



Динамика радиоэлектроники

Под общей редакцией
доктора технических наук
Ю.И. Борисова

Техносфера
Москва
2007

Издание осуществлено при поддержке

Управления радиоэлектронной промышленности и систем управления Роспрома

Динамика радиоэлектроники/ Под общ. ред. Ю.И. Борисова

М.: Техносфера, 2007. — 400с. + цв. вклейка ISBN 978-5-94836-142-0

Книга содержит материал о динамике развития радиоэлектроники — одной из наиболее важных составляющих научно-технического прогресса общества, во многом определяющей его социальные и оборонные возможности. Материалы книги подготовлены группой ученых и инженеров, непосредственно принимавших участие в исследованиях, разработках, испытаниях и применении изделий электронной техники и радиотехнической аппаратуры. Для читателей, интересующихся созданием и развитием отечественной радиоэлектроники и условиями, в которых проходило ее становление в СССР.

*Редакционная коллегия: Ю.И. Борисов, Б.Н. Авдонин, М.И. Критенко,
В.М. Ломакин, С.А. Муравьев, В. М. Пролейко*

© УРЭП и СУ Роспрома, 2007

© 2007, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-142-0

СОДЕРЖАНИЕ

К читателям	4
Вместо предисловия	6
Введение	9
Глава 1. Организация работ по развитию отечественной радиоэлектроники	13
1.1. Планирование и организация разработок	13
1.2. Система управления развитием электронной компонентной базы военной продукции	16
1.3. Поколения электроники и радиотехники.	24
1.4. Эксплуатационная надежность радиоэлектронных средств	30
1.5. Комплексная миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры.	32
1.6. Сопряжение сверхвысокочастотных приборов в аппаратуре	38
Глава 2. Развитие электроники	42
2.1. СВЧ-электроника	42
2.2. Микроэлектроника	100
2.3. Полупроводниковая электроника.	123
2.4. Электронно-лучевые приборы	144
2.5. Квантовая электроника	156
Глава 3. Развитие радиоэлектроники	163
3.1. Динамика развития самолетной радиолокации.	163
3.2. Первая отечественная твердотельная РЛС противовоздушной обороны с активной ФАР	181
3.3. Динамика радиоэлектроники и радиотехники в суперрадиолокации.	199
3.4. Средства и системы радиоэлектронной борьбы	213
3.5. Электроника на службе телекоммуникаций	272
3.6. Некоторые аспекты создания систем и средств связи и передачи информации.	295
3.7. Вычислительная техника и ее база — электроника.	314
3.8. Элементная база — основа динамики развития БЦВМ комплекса «Аргон»	331
3.9. Динамика в конструировании и технологии производства РЭА	343
3.10. Зенитно-ракетные комплексы и системы противовоздушной обороны	360
Заключение.	391
Коротко об авторах.	394



Развитие ведущих индустриальных стран мира в последние 50 лет определяется процессом глобальной электронизации всех сфер жизнедеятельности общества, включая обеспечение необходимой обороноспособности и технологической независимости. Одним из основополагающих факторов процесса электронизации мирового общества является динамичный научно-технический и производственный прогресс в развитии электронных технологий и организация выпуска необходимых приборов и аппаратуры, радиоэлектронных комплексов и систем разного уровня.

Не претендуя на выстраивание исторических приоритетов развития электроники и радиоэлектроники, авторы книги изложили свой взгляд на развитие этих направлений в науке и особенно на их взаимосвязь, которые позволили добиться мировых успехов в освоении космоса, атомной энергетике и обороне.

В книге приведены уникальные данные о развитии этих отраслей отечественной науки, успехах электронной промышленности, радиопромышленности и промышленности средств связи СССР, их взаимном влиянии, что и определило научно-технический прогресс в стране. Нам есть чем гордиться, так как в основе лежали успехи отечественной науки и производства.

Авторы книги не ставили перед собой цель дать всесторонний анализ развития отечественной радиоэлектроники, но по очеркам и воспоминаниям можно достаточно полно представить динамику развития отечественной радиоэлектроники. В книге акцентировано внимание на взаимовлиянии этих отраслей знаний на процесс развития каждой из них.

Безусловно, фамилии десятков тысяч инженерно-технических работников, создававших самую передовую в мире радиоэлектронную аппаратуру, невозможно привести на страницах данного издания, но следует подчеркнуть, что это был успех таланта и кропотливого ежедневного труда каждого из них.

Нам еще предстоит провести системный анализ пройденного пути и что самое важное – определить перспективы развития. Верю, что талант и высокий профессионализм российских ученых и инженеров позволят уже в ближайшем будущем добиться новых успехов в области радиоэлектроники.

Ю.И. Борисов

Начальник Управления
радиоэлектронной промышленности
и систем управления Роспрома

ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ

Радиоэлектроника — термин, объединяющий комплекс областей науки и техники, связанных главным образом с проблемами передачи, приема и преобразования информации при помощи электромагнитных колебаний и волн в радио- и оптическом диапазоне. Термин появился в 50-х годах XX века и является до некоторой степени условным. Радиоэлектроника охватывает радиотехнику и электронику, в том числе полупроводниковую электронику, микроэлектронику, квантовую электронику, ИК-технику, хемотронику, оптоэлектронику, акустоэлектронику, криоэлектронику и другие области. Радиоэлектроника тесно связана, с одной стороны, с радиофизикой, физикой твердого тела, оптикой и механикой, а с другой — с электротехникой, автоматикой, телемеханикой и вычислительной техникой.

Радиоэлектроника успешно и постоянно развивается благодаря присутствию электронике и радиотехнике функциональным, конструктивным и технологическим возможностям. Динамичное совершенствование всех технических и эксплуатационных показателей аппаратуры обусловлено взаимосвязью достижений в электронике и радиотехнике и их взаимным влиянием друг на друга.

Радиоэлектроника — важнейшая составляющая научно-технического прогресса и развития человеческого общества. Она является информационно-управляющей базой общества, использует информационные технологии и определяет научно-технический и оборонный потенциал страны.

Основными признаками информационных технологий являются превращение информационных продуктов и услуг в главный объект производства и потребления современного постиндустриального общества. Можно сказать, что информационные ресурсы являются наиболее существенным потенциальным источником национального богатства. Постоянное увеличение стоимости обновляемых информационных технологий уже достигло более половины мирового валового продукта.

В основе информатики, изучающей структуру и общие свойства научной информации, лежат закономерности ее создания, содержащие технологии анализа, синтеза, передачи и приема информационных данных с целью их использования в различных сферах человеческой деятельности. Материальной базой информационных технологий являются аппаратные и программные средства обработки информации, включающие в себя, в первую очередь, весь комплекс современных радиоэлектронных средств — от простейших бытовых устройств до сверхсложных систем и комплексов гражданского и военного назначения. Состояние и технический уровень этих средств опре-

деляются используемой электронной компонентной базой (ЭКБ). Номенклатуру ЭКБ можно условно сгруппировать по следующим направлениям:

- изделия микроэлектроники и полупроводниковые приборы;
- изделия СВЧ-электроники;
- радиодетали и радиокомпоненты;
- электротехнические изделия.

Первое из этих направлений является ключевым в аппаратных средствах обработки информации: изделия микроэлектроники и СВЧ-техники входят во все виды аппаратуры, используемой в технике вторичной обработки информационных сигналов и технологиях анализа и синтеза информационных данных.

За последние 50 лет XX века в радиоэлектронике произошли две технические революции: в электронике — разработка и производство полупроводниковых (твердотельных) приборов, а в радиотехнике — развитие принципов и использование цифровых методов обработки информации. Развитие и применение полупроводников привело к снижению массогабаритных показателей, энергопотребления в аппаратуре в несколько десятков раз, а внедрение цифровых методов обработки информации существенно улучшило такие важные с точки зрения потребителя показатели аппаратуры, как устойчивость работы, помехозащищенность, скорость обработки и качество информации, позволило создать многофункциональные устройства, разработка которых при использовании аналоговых принципов обработки информации была невозможна. В результате этих революционных преобразований в радиоэлектронике, с одной стороны, сформировалась полная номенклатура полупроводниковых приборов для реализации цифровых методов обработки информации в аппаратуре различного назначения, с другой стороны, были разработаны схемотехнические решения, в которых наиболее полно используются возможности созданной номенклатуры электронных приборов.

Развитие электронных приборов стало возможным благодаря фундаментальным открытиям в области полупроводниковой электроники, квантовой, оптоэлектроники, а также разработке принципиально новых технологий и привело в свою очередь к развитию радиотехники, телемеханики, кибернетики, медицины, метрологии и вообще всех областей деятельности человека.

Высокие темпы реализации новых достижений в радиоэлектронике, расширение функциональных возможностей радиотехнических устройств, повышение их надежности при одновременном снижении энергопотребления, миниатюризация аппаратуры, внедрение цифровых методов обработки информации и их реализация, новые принципы отображения и обработки информации — результат органичного слияния радиотехники и электроники.

Любые существенные изменения в свойствах и конструкции изделий электронной техники (ИЭТ) приводили, как правило, к изменениям в схемотехнике и условий применения их в аппаратуре. Так, например, создание радиационно стойких ИЭТ привело к практически полной переработке аппаратуры нового поколения ракет.

В практике есть примеры и обратного влияния новых схемных решений и принципов конструирования на свойства и характеристики изделий элект-

ронной техники. Так, появление печатного монтажа и микросборок привело к созданию и выпуску изделий электронной техники специальной конструкции, позволяющей применять новые методы монтажа.

Исключительно большое влияние на развитие радиотехники и электроники в интересах радиосвязи, радиолокации и телевидения оказали результаты исследований в тех областях электроники, в которых в качестве носителей информации используются электромагнитные колебания оптического диапазона: квантовая электроника и оптоэлектроника.

Круг вопросов, тем и направление радиоэлектроники и электроники, непосредственно связанных с динамикой устройств и процессов передачи, приема и обработки информации, оказавших революционное влияние на научно-технический прогресс во второй половине XX века, очень широк. Настоящая книга является одним из первых шагов в этом направлении.

Книга содержит конкретный исторический материал о динамике одной из наиболее важных составляющих научно-технического прогресса общества, определяющей его социальные и оборонные возможности, и предназначена для читателей, интересующихся созданием и развитием отечественной радиоэлектроники и теми условиями, в которых проходило становление радиоэлектроники в СССР.

Книга состоит из предисловия, введения, трех тематических глав и заключения.

В первой главе изложены основные направления работ по общим проблемам совместного развития радиотехники и электроники: планирование и проведение разработок, повышение качества и надежности радиоэлектронных изделий и устройств. Также кратко рассмотрены критерии поколений ИЭТ и радиотехнических устройств во взаимосвязи с принципами конструирования и технологией создания аппаратуры, принципы ее комплексной миниатюризации.

Во второй и третьей главах на примерах конкретных видов изделий электронной техники и радиотехники рассматривается изменение их внешнего вида и приводится динамика их эксплуатационных характеристик, технических параметров за период с 1950 по 2000 год.

Материалы книги подготовлены группой ученых и инженеров, непосредственно принимавших участие в исследованиях, разработках, испытаниях и применении изделий электронной техники и радиотехнической аппаратуры.

Введение, предисловие, статьи главы 1 «Планирование и организация разработок», «Поколения электроники и радиотехники», «Эксплуатационная надежность радиоэлектронных средств», «Комплексная миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры», «Сопряжение сверхвысокочастотных приборов в аппаратуре» и заключение подготовлены В.М. Ломакиным. При подготовке материалов учтены предложения Авдониной Б.Н., Борисова Ю.И., Муравьева С.А., Пролейко В.М., Бедревского М.А., Новаченко И.В., Панченко Л.В. В эти материалы также включены отдельные положения статей Мажорова Ю.Н., Кукка К.И., Шубарева В.А., Якубовского С.В., Реброва С.И.

Статья главы 1 «Система управления развитием электронной компонентной базы военной продукции» написана Критенко М.И.

В статьях 2 и 3 глав использованы материалы Гельвича Э.А., Тельца В.А. и Седунова Э.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение развития радиоэлектроники, как одной из важнейших областей науки и техники, влияющей на развитие человеческого общества, является основой как для формирования приоритетов в этой области, так и для составления прогнозов на будущее.

В СССР до 1961 года работы в интересах радиоэлектроники велись в судостроительной и электротехнической промышленности, в Госкомитете радиолокации, министерствах промышленности связи и радиотехнической промышленности. Наука и производство электронных изделий были распланы по отдельным НИИ, КБ и предприятиям различных министерств и ведомств. Такое положение отрицательно сказывалось особенно на развитии электроники. Действительно, большие средства как финансовые, так и материальные, которые требовались для развития электронных предприятий, уходили на радиозаводы. Имело место необоснованное увеличение номенклатуры ИЭТ, неоптимально решались вопросы унификации ИЭТ, что удорожало массовое производство изделий и усложняло поставку в условиях эксплуатации аппаратуры. В то же время номенклатура разрабатываемых и производимых электровакуумных и газоразрядных приборов, резисторов, конденсаторов, трансформаторов и радиокомпонентов постоянно расширялась. Создавались новые технологии полупроводниковых приборов, расширялась номенклатура приборов сверхвысокочастотного диапазона, развивалось производство специальных материалов для электронной промышленности. Появилась необходимость выделения из аппаратостроительных отраслей отрасли изделий электронной техники. Постановлением Совета Министров СССР от 16.03.1961 г. был создан Государственный Комитет по электронной технике, преобразованный в Министерство электронной промышленности СССР в марте 1965 года. Концентрация научных, производственных и финансовых ресурсов позволила значительно увеличить потенциал электронной промышленности и способствовала динамичному ее развитию. Так, число предприятий отрасли с 1964 по 1991 год увеличилось более чем в 10 раз. Объем производства отрасли за период с 1960 по 1990 год вырос более чем в 185 раз.

Выделение электронной промышленности в самостоятельную отрасль сыграло огромную роль в создании отечественной электронной промышленности. Была создана высокоинтеллектуальная научная база, построены высокотехнологичные предприятия, выпускающие изделия электронной техники, которые по уровню технических параметров и эксплуатационных характеристик, как правило, не уступали мировым достижениям. Количество

и номенклатура изделий были достаточны для удовлетворения основных потребностей страны отечественными изделиями, многие изделия поставлялись за рубеж. Не менее динамично развивалась и радиотехническая промышленность.

Характерная особенность наших НИИ и КБ — наличие мощных опытных заводов, которые призваны обеспечить быстрое создание и отработку опытных образцов для освоения их в серийном производстве.

В 1960-х годах, вскоре после появления первых серийно выпускаемых полупроводниковых интегральных схем широкого применения и после накопления определенного опыта их применения в аппаратуре, стало ясно, что в целях реализации перспективных принципов конструирования РЭА необходимо создание полупроводниковых схем частного применения и обеспечение разработок приоритетных видов аппаратуры.

До середины 1970-х годов потребности разработок и поставок военной радиоаппаратуры в элементной базе, производимой на предприятиях электронной промышленности (полупроводники, ИС, резисторы, конденсаторы, линии задержки, электровакуумные приборы и др.), в основном удовлетворялись. Хотя уже начинал сказываться не столько количественный, сколько качественный дефицит. Электронная промышленность не успевала производить в требуемых количествах не только изделия широкого применения, соответствующие мировому уровню, но и не могла обеспечить поставки соответствующей номенклатуры изделий в полном объеме.

С развитием микроэлектроники, с увеличением степени интеграции на кристалле микросхемы размещалось все больше и больше функциональных элементов и узлов, и постепенно процессы проектирования и разработки узлов радиоаппаратуры перемещались в институты электронной промышленности. Для проектирования интегральных микросхем потребовалось развитие в электронной промышленности института специалистов в области схемотехники и системотехники.

В то же время развитие новых технологий в построении аппаратуры на основе модулей с применением бескорпусных изделий электронной техники, а также потребность в создании специализированных микросхем требовало развития и освоения в аппаратостроительной отрасли технологий, применяемых в электронной промышленности.

Создание и производство микросхем, интегральных элементов и других компонентов на аппаратостроительных предприятиях требовало специального оборудования, технологии, специальных методов контроля, «чистых помещений» и др. В то же время при принятом отраслевом принципе преимущественное право на получение такого оборудования имела лишь электронная промышленность. МЭП стало монопольным получателем нового оборудования, в том числе импортного, а МРП и МПСС были лишены такой возможности.

Заказать в МЭП новую специализированную микросхему, которая требовалась для конкретного изделия, было невозможно, если она не имела массового применения.

Возник системный кризис, в основе которого лежали психологические проблемы разработчиков изделий электронной техники, усугубленный принятой в стране специализацией отраслей и амбициями их руководителей.

Началось технологическое отставание предприятий-разработчиков аппаратуры.

Проходили бурные споры между представителями электронной промышленности и радиопромышленности по вопросу: должны ли аппаратостроительные предприятия заниматься разработкой и производством микроэлектронных схем или эту задачу должны решать специализированные предприятия МЭП. Эти споры продолжались до тех пор, пока в 1974 году на совещании в Научном центре (г. Зеленоград) при участии представителей МРП, МЭП и Минобороны не было принято решение: квалифицировать микросхемы частного применения (специализированные) как новый класс изделий микроэлектроники — микросборки, предназначенные для целей комплексной миниатюризации конкретной аппаратуры. Добавка слова «сборка» придавала окраску аппаратурной принадлежности.

Переход от дискретных полупроводниковых элементов к чипам, монокристалльным интегральным схемам потребовал сложного оборудования. Предприятия, создающие аппаратуру и не имеющие конструкторско-технологической базы интегральной электроники, были не в состоянии разрабатывать и производить современную электронную аппаратуру.

И тогда на правительственном уровне принимается решение о развитии специализированной электроники в каждой отрасли оборонной промышленности. Такое решение не противоречило мировой практике и, казалось, должно было бы улучшить положение с обеспечением современной электроникой. На многих предприятиях аппаратостроительной промышленности появились участки, цеха и центры по производству специализированных изделий электронной техники, в основном, по производству микросборок. Одновременно перед всеми отраслями оборонной промышленности были поставлены задачи освоения специального технологического оборудования, разработки и производства чистых материалов для электронной промышленности. В определенной степени были решены задачи по производству микросхем с невысоким уровнем интеграции и микросборок.

Так, например, в Центральном научно-исследовательском радиотехническом институте (ЦНИРТИ) создание микроэлектронной базы для интеграции таких узлов было поручено Научно-производственному центру «Микроприбор». В Центр были привлечены специалисты по пассивным и активным узлам, по антенно-фидерным устройствам, по тонко- и толсто пленочной технологиям, конструкторы микросборок и микромодулей.

В Ленинградском научно-исследовательском технологическом институте (ЛНИТИ) была создана полупроводниковая лабораторно-производственная база и отработана технология совмещенных интегральных схем с изоляцией диэлектрическим слоем, разработана система базовых матричных кристаллов (БМК) для интегральных совмещенных микросхем специального назначения. Было создано несколько типов БМК, на основе которых были разработаны диодно-транзисторные матрицы, р-и-п-диодные СВЧ-коммутаторы. В определенной степени были решены задачи по акустоэлектронике, производству микросхем с невысоким уровнем интеграции и микросборок. По-прежнему не было микросхем с высоким уровнем интеграции, радиоэлементов для поверхностного монтажа, мощных линейных СВЧ-транзисторов и т.д.

Таким образом, в стране была создана мощная радиоэлектронная промышленность, способная вести глубокие научные исследования и выпускать электронные и радиотехнические изделия высокого технического уровня, соответствующие требованиям обеспечения обороноспособности страны.

В конце XX века при преобразовании плановой системы в рыночную экономику и вследствие связанного с этим кризиса радиоэлектронная промышленность страны утратила многие достижения. Объем производства как промышленной, так и наукоемкой продукции сократился в несколько раз. Прекратила свое существование почти половина предприятий и научных организаций. Возникли трудности с обеспечением даже ограниченного числа разработок аппаратуры изделиями электронной техники. Отечественная радиоэлектронная продукция активно стала замещаться изделиями зарубежного производства.

Промышленность высоких технологий сильно пострадала после развала Советского Союза. Но электронная промышленность заложила свое отставание от зарубежного уровня еще в советское время. Причин много, но важнейшие из них следующие:

- неоправданное копирование зарубежных образцов, что предопределило привычку «плестись в хвосте», но этому процессу наступил естественный конец. Высокоразрядная электроника не поддавалась копированию, а навыки к новым разработкам оказались атрофированными;
- отвлечение мощностей электронной промышленности на изготовление «конечного» продукта в виде бытовых приборов, поступающих непосредственно в торговую сеть (товары народного потребления). Объем этих товаров вырос в 1970 году по отношению к 1960 году в 7,2 раза, а в 1990 году в 293,7 раза;
- недостаточное внимание к современным технологиям и технологическому оборудованию, а также производству чистых материалов;
- отсутствие жесткой заинтересованности предприятий-изготовителей в увеличении выхода годных изделий.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО РАЗВИТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. Планирование и организация разработок

Динамичному развитию военной радиоэлектроники в стране способствовал ряд факторов, важнейшими из которых являлись:

- постоянно растущие требования Минобороны как генерального заказчика радиоэлектронных средств вооружения;
- действующий порядок планирования работ в области радиоэлектроники;
- координирующая роль Комиссии Президиума Совета Министров СССР по военно-промышленным вопросам (ВПК).

Требования Минобороны к радиоэлектронному вооружению устанавливались в разделах Программы вооружения, разрабатываемой головными по направлениям техники научно-исследовательскими институтами Минобороны и промышленности на определенный временной период. В начале 1980-х годов впервые была разработана Программа важнейших работ по развитию изделий электронной техники и электротехники в обеспечение Программы вооружения на период до 1995 года.

С развитием средств защиты и нападения, тактики их использования требования к радиоэлектронной аппаратуре в период с 1950 по 2000 год постоянно возрастали практически по всем тактическим и техническим показателям.

Требовалось увеличение дальности и достоверности обнаружения целей в условиях уменьшения их отражающих поверхностей и применения помех при сокращении времени на принятие решения, повышение точности наведения и управления оружием поражения в сложных помеховых условиях. Расширение комплекса задач, решаемых радиоэлектронным вооружением, привело к разработке многофункциональных и многорежимных комплексов наземного, морского и воздушного базирования. С усложнением тактико-технических характеристик аппаратуры возрастали требования к мобильности и надежности радиоэлектронного вооружения при максимальном снижении массогабаритных показателей. К началу 1990-х годов в связи с существенным развитием различных видов средств вооружения и тактики их применения разработка средств радиоэлектронного вооружения с элементами искусственного интеллекта стала первоочередной задачей.

Усложнение задач радиоэлектронной борьбы, создание средств управления оружием в оптическом диапазоне привело к разработке комплексов обороны, которые должны решать задачи не только обнаружения и анализа



угрозы, но и создания помех нескольким целям с временным и пространственным управлением имеющихся ресурсов противодействия.

В создании принципиально новых средств радиоэлектронного вооружения и совершенствовании существующих значительную роль играли совместные рассмотрения на заседаниях НТС Комиссии Президиума Совета Министров СССР по военно-промышленным вопросам тактико-технических требований к радиотехническим устройствам и необходимым для их реализации изделиям электронной техники. По результатам таких рассмотрений принимались решения, в которых предусматривалось проведение работ по созданию конкретных радиотехнических средств и оптимальной, функционально полной номенклатуры важнейших ЭРИ, определяющих основные тактико-технические характеристики (ТТХ) радиоэлектронного вооружения, предусмотренного к разработке.

«Работа в ВПК была сложной — как правило, на ее рассмотрение выносились вопросы, по которым возникали противоречия между заказчиками и исполнителями или между основными разработчиками и их смежниками. Для подготовки решения приходилось глубоко разбираться в существе дела с выездом на место — в НИИ, КБ, на заводы» (Н.С. Строев).

Координирующая роль ВПК и системный подход к развитию новых направлений в технике особо наглядно проявились при разработке программы развития микроэлектроники в стране.

Проблема решалась комплексно. Создается Научный Центр из ряда размещенных в одном месте НИИ и заводов. Они должны работать вместе, в конце производственного цикла — интегральные микросхемы и аппаратура на их основе. В течение трех лет (1962-1965 гг.) происходит организация пяти научно-исследовательских институтов с опытными заводами: НИИ точной технологии (НИИТТ) с заводом «Ангстрем» (разработка и выпуск интегральных микросхем по гибридной технологии); НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ) с заводом «Микрон» (разработка и производство полупроводниковых интегральных микросхем); НИИ материаловедения (НИИМВ) с заводом «Элма» (основное направление работ — материалы для микроэлектроники); НИИ точного машиностроения (НИИТМ) с заводом «Элион» (разработка специального технологического оборудования) и НИИ микроприборов с заводом «Компонент» (системное предприятие по созданию радиоэлектронных устройств на базе интегральных микросхем). Поисковыми исследованиями должен был заниматься НИИ физических проблем. Для работы с потребителями было создано Центральное бюро применения интегральных микросхем.

В это же время в Киеве, Риге, Вильнюсе создаются новые научные учреждения, конструкторские бюро. Существующие КБ заводов полупроводниковых приборов переориентируются на решение проблем микроэлектроники. Это происходит в Воронеже, Минске, Новосибирске.

В развитии работ в области военной электроники и радиотехники существенную роль сыграло применение метода комплексно-целевого программного планирования развития ИЭТ и, как следствие, внедрение соответствующих комплексно-целевых (для конкретных классов и групп изделий электроники) и аппаратурно-ориентированных (с привязкой изделий электроники к конкретным системам и комплексам) программ.

Комплексно-целевые программы развития важнейших направлений электроники (КЦП) стали разрабатываться в 1960-х годах при формировании электронной промышленностью пятилетних планов. Они включали комплексы работ по созданию изделий, а также обеспечивающие НИОКР в области новых материалов, технологий, оборудования, измерительных установок. На начальном этапе КЦП разрабатывались разработчиками изделий электронной техники с участием представителей Генерального заказчика от Минобороны по отдельным направлениям развития изделий. Такой подход к разработке программ создания изделий электронной техники без непосредственного привлечения к их разработке потребителя объясняется тем, что в этот период в разработках вакуумных электронных изделий по параметрам, номенклатуре было достигнуто определенное насыщение. Функционально полная номенклатура электронных приборов, использующих другие принципы функционирования, удовлетворяющая требованиям разработчиков РЭА, только еще формировалась. В 1970–1980-х годах КЦП по созданию ИЭТ стали разрабатываться электронной промышленностью при участии разработчиков РЭА и Генерального заказчика практически по всем группам электронных изделий. Общее количество КЦП на один период времени достигло 79.

Комплексный подход к созданию ИЭТ позволил перейти к разработке аппаратурно-ориентированных программ (АОП) создания комплектующих изделий для определенного класса аппаратуры.

Программное аппаратурно-ориентированное планирование позволяло не только оптимизировать номенклатуру изделий, подлежащих разработке, но и обеспечило возможность максимального использования функциональных возможностей новых изделий электронной техники и электротехники в новых схемных и технологических решениях, разрабатываемых радистами при конструировании радиоэлектронной аппаратуры.

Так, в 1971–1972-х годах заказчиком совместно с разработчиками ИЭТ и средств радиоэлектронного противодействия была разработана АОП по обеспечению радиоэлектронных средств противодействия самолетов и вертолетов. В дальнейшем АОП стали разрабатываться для обеспечения радиоэлектронных средств вооружения близких по назначению и областям применения комплексов, независимо от принадлежности к заказывающим управлениям (например, для ЗРК — ПВО, ВМФ, СВ и т.д.). В 1975 году Минобороны совместно с аппаратостроительными министерствами была разработана АОП в интересах обеспечения специальной элементной базой разработок стратегических ракет. Формирование таких программ позволило оптимизировать количество разработок комплектующих изделий за счет широкой их унификации, обеспечивающей их применение в оптимальных по режимам схемных позициях в значительном количестве близких по назначению образцов вооружения и военной техники.

Комплексно-целевое и аппаратурно-ориентированное планирование явилось основой унификации изделий электроники, формирования оптимального числа типов по классам и группам комплектующих изделий, их нормативного документирования через системы определяющих параметров и, тем самым, рационального расходования выделяемых бюджетных средств на развитие электроники и обеспечение потребностей в комплектации ЗИП, формировании ремонтных органов и др.

К середине 1980-х годов были сформированы единые в стране принципы управления развитием и применением изделий электроники и радиотехники. В соответствии с этими принципами координировались направления совместной деятельности специалистов электроники и радиотехники в части разработки новых системно-технических и схмотехнических решений.

1.2. Система управления развитием электронной компонентной базы военной продукции

Бурное развитие военной техники, начавшееся еще в предвоенные годы, предопределило настоятельную необходимость широкого использования все усложняющихся радиоэлектронных средств. Опыт Великой Отечественной войны показал, что применение радиоэлектронных средств резко повышает боевую эффективность всех видов ВС и родов войск. Поэтому, начиная с 1940-х и особенно в 1950-е годы, эта проблема приобрела государственное значение. Так, Постановлением Государственного Комитета Обороны от 4 июля 1943 года был создан Совет по радиолокации при Государственном Комитете Обороны, сыгравший определяющую роль в развитии радиоэлектронных средств вооружения и изделий электронной техники. В дальнейшем принимается ряд постановлений Правительства СССР, направленных на создание оборонных министерств, НИИ и КБ промышленности. В Министерстве обороны вводится должность заместителя Министра обороны по радиоэлектронике, создается система заказывающих управлений во всех видах ВС и родах войск, научно-исследовательских организациях Минобороны, аппарате военных представителей. Координирующая роль по проблеме развития электронной техники возлагается на 5 Главное управление Минобороны. В последствии правопреемником этого управления в части развития электронной компонентной базы (ЭКБ) становится 16 Управление Минобороны. В основу военно-технической политики Минобороны в области развития и применения ЭКБ положены научно-технические исследования, проводимые головной организацией Минобороны 22 ЦНИИ МО совместно с другими НИО Минобороны, НИИ и КБ промышленности. Главные направления этих исследований учитывают интересы всех видов ВС и родов войск, тенденции развития радиоэлектронных средств вооружения (РЭСВ) и ЭКБ, а также мировую практику создания современной электронной компонентной базы. На 16 Управление возлагаются практически все основные управленческие и координационные функции по:

- организации прогнозных исследований ЭКБ;
- формированию основных направлений и планов развития ЭКБ;
- обоснованию оптимального числа типов унифицированных изделий;
- разработке аппаратурно-ориентированных и комплексно-целевых программ создания ЭКБ для применения в жестких условиях эксплуатации;
- участию в разработке технических заданий на НИОКР в интересах всех видов ВС;

- осуществлению военно-научного сопровождения разработок ЭКБ;
- проведению Государственных испытаний ЭКБ;
- формированию Перечней изделий, разрешенных для применения при разработке (модернизации) военной РЭА;
- проведению экспертизы правильности применения ЭКБ и подконтрольной эксплуатации РЭСВ в войсках.

Специфика, сложность и комплексность перечисленных выше задач обусловили разработку в Минобороны системы управления развитием межвидовой ЭКБ и предопределили главную роль 16 Управления Минобороны в организации работ по их решению с широким привлечением других министерств и ведомств. Система управления развитием ЭКБ постоянно совершенствовалась и, в целом, подтвердила свою эффективность и оперативность. Определяющим элементом системы является разработка и обоснование требований Минобороны к техническим и эксплуатационным характеристикам, к рациональной номенклатуре ЭКБ, объемам и срокам ее разработки и производства при реализации Государственной программы вооружения.

В основу методологии определения рациональных направлений развития электронной компонентой базы были положены следующие основные принципы:

- обоснование сбалансированного развития ЭКБ на основе анализа потребностей ВВТ, возможностей организаций (предприятий) оборонных отраслей промышленности, финансовых и других ресурсов;
- рациональное распределение и концентрация ресурсов на наиболее приоритетных направлениях развития ЭКБ;
- использование имеющегося научно-технического задела с учетом инфраструктуры промышленности по реализации планов и программ.

На работы по созданию ЭКБ в интересах Минобороны разработчик изделия разрабатывал проект технического задания, который согласовывался с основным потребителем изделия Минобороны, и утверждался руководством электронной промышленности. В процессе выполнения работы ее ход контролировался военным представителем на этом предприятии. По завершению разработки изделие проходило государственные испытания и принималось комиссией, состав которой согласовывался с Минобороны. Председателем комиссии по приемке изделий, разработанных в интересах Минобороны, был ее представитель. По результатам испытаний принималось решение о возможности поставки данного изделия и оно включалось в Перечень ЭКБ, разрешенных для применения в военной аппаратуре.

Впоследствии они заняли самостоятельное место как унифицированные, межвидовые изделия снабжения Вооруженных сил.

К концу 1980-х годов ЭКБ представляла собой широкий спектр изделий, включая приборы СВЧ и микроэлектроники, полупроводниковой техники и фотоэлектроники, изделия волоконной оптики и квантовой электроники, радиодетали, радиокомпоненты и другие, находящиеся на тот период по ряду важнейших направлений на уровне мировых достижений и практически полностью удовлетворяющие требованиям Минобороны. Объем поста-

вок ЭКБ в интересах Минобороны составлял до 80–90% от всего объема поставок электронной промышленности.

Электронные компоненты, прошедшие государственные испытания и принятые представителями военной приемки 16 Управления, поставлялись для разработок аппаратуры и эксплуатации во всех видах радиоэлектронных средств вооружения и военной техники. С целью систематизации и унификации требований Министерства обороны к РЭСВ и ЭКБ по условиям их применения по инициативе 16 Управления при головной роли 22 ЦНИИ Минобороны были разработаны комплексы государственных военных стандартов «Мороз» и «Климат», содержащие требования, нормы и методы испытаний на аппаратуру, ЭКБ и материалы, применяемые в военной электронике.

В связи с появлением и принятием на вооружение ядерного оружия по инициативе заказывающих управлений Министерства обороны и в соответствии с решением ВПК, с целью обеспечения требуемой радиационной стойкости РЭСВ была создана предприятиями отечественной промышленности необходимая номенклатура ЭКБ, отвечающая этим требованиям и вошедшая в специальный Перечень ЭКБ с повышенной радиационной стойкостью. Координирующую роль при решении вопросов по данной проблеме осуществляло 16 Управление Министерства обороны, а военно-научное сопровождение указанных разработок — 22 ЦНИИ МО.

В связи с ростом решаемых задач системами и комплексами ВВТ и, как следствие, значительным повышением сложности РЭСВ были предложены принципы комплексной миниатюризации аппаратуры, включающие значительное уменьшение их массогабаритных характеристик и энергопотребления на основе достижений твердотельной электроники. Были разработаны требования к показателям комплексной миниатюризации РЭСВ по видам техники, методы их обеспечения и критерии цен. Внедрение этих документов в практику работы предприятий оборонных отраслей промышленности стимулировало широкое использование изделий микроэлектроники и создание другой ЭКБ, совместимой с изделиями, создаваемыми по интегральной технологии.

Оснащение армии радиоэлектронными средствами вооружения потребовало обеспечения отказоустойчивости и необходимости выявления причин и исследования механизмов отказов. Для решения этой задачи и в развитие ранее проводимых работ по надежности решением ВПК был создан при 22 ЦНИИ МО Межведомственный Центр анализа отказов радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих ее изделий. Особое внимание уделялось анализу причин повторяющихся отказов РЭА и ЭКБ и принятию предупреждающих и корректирующих мер по их исключению на аппаратостроительных предприятиях и предприятиях, создающих ЭКБ. Для обеспечения деятельности Центра была отработана система сбора, поступления и обработки информации о надежности РЭА и ЭКБ, введенная директивой начальника ГШ ВС.

В интересах динамичного развития РЭСВ требовалось формирование целевых заказов на разработки ЭКБ, организация и методологическое обеспечение государственных испытаний, военной приемки и поставки этой продукции как самостоятельных предметов снабжения Вооруженных сил.

Такой подход к организации работ со стороны Минобороны позволил к концу 1980-х годов сформировать номенклатуру ЭКБ военного применения, включающую изделия СВЧ и микроэлектронной, полупроводниковой техники и фотоэлектроники, изделия волоконной оптики и квантовой электроники, радиодетали, радиокомпоненты и другие, находящиеся на тот период по ряду важнейших направлений на уровне мировых достижений и практически полностью удовлетворявших требованиям Минобороны.

Распад СССР и, по существу, развал экономики страны привели в начале 1990-х годов к значительным потерям в электронной отрасли, особенно в военной электронике. Электронная отрасль, державшаяся на почти 100% оборонном заказе, в течение короткого времени практически полностью лишилась рынка сбыта. Объем закупок ЭКБ по линии Министерства обороны снизился более чем в 10 раз. Положение усугублялось также тем, что в военно-промышленном комплексе России в связи с изменением ее территориально-государственного устройства сложилась ситуация, когда изготовители отдельных критически важных для комплектации боевых комплексов классов изделий электронной техники и радиоэлектроники остались за границами страны. Для России оказались утраченными (вследствие размещения в странах СНГ и Балтии) производства в таких областях, как:

- микроэлектроника (до 100% компараторов напряжения, делителей частоты, устройств выборки и хранения, ИС для радиовзрывателей; аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, операционных усилителей, свыше 70 % микропроцессоров и микроЭВМ; 40% логических схем; свыше 30% схем запоминающих устройств);
- полупроводниковые приборы (100% низкочастотных варикапов и импульсных диодов; до 60% низкочастотных тиристоров; до 80% ограничительных СВЧ-диодов; до 50% выпрямительных диодов и столбов);
- СВЧ-техника (до 88% ЛБВ малошумящих и средней мощности);
- компоненты волоконно-оптических линий связи и передачи информации (100%);
- радиодетали и радиокомпоненты (90% высоковольтных, высокотемпературных и прецизионных проволочных резисторов; 80% помехоподавляющих конденсаторов; 100% соединителей для авиационной диагностической аппаратуры; 40% высоковольтных вакуумных выключателей);
- электротехника (более 90% высокочастотных реле и реле времени).

Политические и экономические преобразования, проводимые в России, привели к общему кризису отечественной промышленности радиоэлектронного комплекса, резкому спаду объемов производства радиоэлектронных средств вооружения. Объем производства РЭСВ за последние 10 лет сократился по РЭА в 10–20 раз, по ЭКБ и материалам — в 10–30 раз.

Министерство обороны РФ, понимая большую роль и важность РЭСВ и ЭКБ для поддержания боеготовности ВС РФ и с целью обеспечения соответствующего технического уровня ВВТ, в это сложное время при очень ограниченных финансовых возможностях продолжало осуществлять заказы изделий по приоритетным отраслевым производствам, составляющим

основу военной электроники. При этом мотивационным фактором поддержки электронной промышленности со стороны Минобороны явилась необходимость создания научно-технического задела в разработках новых поколений изделий для реализации последующих серийных заказов перспективных образцов ВВТ, сохранения промышленного потенциала и высококвалифицированных научно-технических кадров оборонных отраслей промышленности. В этот период по инициативе и заказам Минобороны были созданы так называемые «пилотные линии» по развитию микропроцессорной техники нового поколения, получили поддержку твердотельная СВЧ-электроника, фотоэлектронные приборы с повышенными техническими характеристиками, компоненты волоконной оптики и др. В дальнейшем поддержка радиоэлектронной отрасли страны Министерством обороны способствовала «новому витку» развития ЭКБ. С середины 1990-х годов начинается проведение мероприятий по частичной реструктуризации отраслей электронной и электротехнической промышленности, занятых выполнением государственного оборонного заказа. Это позволило сконцентрировать имеющиеся интеллектуальные, производственные и финансовые ресурсы на сохранении, восстановлении, а по возможности на воспроизводстве целого ряда классов и типов элементной базы военного назначения. Однако в условиях жестких ресурсных ограничений проведенные мероприятия не смогли до настоящего времени полностью обеспечить вооружение отечественной комплектацией соответствующего технического уровня и надежности.

Одна из новых причин, сдерживающих динамичное восстановление отечественной электронной промышленности — снижение заказов на разработку и производство отечественной ЭКБ из-за продвижения во все более широких масштабах на отечественный рынок продукции иностранных фирм. Зарубежные фирмы, обладающие огромным опытом конкурентной борьбы в условиях рыночной экономики и располагающие мощными современными производствами с высокой степенью автоматизации, значительным научно-техническим потенциалом, с эффективной системой управления качеством по международным стандартам, поставляют на рынок продукцию высокого технического уровня, причем ассортимент ее изменяется быстро.

С середины 1990-х годов при разработке образцов ВВТ стали активно использоваться электронные модули и электрорадиоизделия иностранного производства (ЭРИ ИП). Проведенный анализ применимости ЭРИ ИП в перспективных образцах ВВТ, включенных в Программу вооружения, подтвердил это положение. С целью исключения возможности снижения оборонного потенциала страны и зависимости от зарубежных поставок в Министерстве обороны разрабатывается методология постепенной замены импортных электронных компонентов на отечественные. В случае применения в ВВТ импортные изделия должны иметь необходимый уровень качества и надежности. Однако ввиду отсутствия соответствующих международных договоров и соглашений на поставку в Россию высококачественных и надежных изделий для военного применения и ракетно-космической техники, разработчики ВВТ вынуждены использовать ЭРИ ИП коммерческого или индустриального исполнения, импорт которых не ограничен. Кроме того,

применение ЭРИ ИП сопряжено с техническими проблемами, влияющими на требуемый уровень качества, надежности и других эксплуатационных характеристик образцов ВВТ. Это связано с отличиями в подходах к установлению соответствующих гарантий на эксплуатационные характеристики в зарубежной и отечественной практике, отсутствием у потребителей полной и достоверной информации об изделиях. Для решения указанных проблем было признано необходимым введение системы обеспечения качества ИП. Алгоритм обеспечения и контроля качества ЭРИ ИП установлен соответствующим положением о порядке применения электронных модулей, комплектующих изделий, электрорадиоизделий и конструкционных материалов иностранного производства в системах, комплексах, образцах вооружения и военной техники и их составных частях. Порядок применения и сертификации ЭРИ ИП и материалов в интересах комплектования образцов ВВТ утвержден и введен в действие.

Политико-экономические преобразования в стране и разрушение оборонной промышленности потребовали и изменения подходов в Минобороны к обеспечению качества и надежности ЭКБ военного назначения. Сложившаяся в 1970—1980-е годы система обеспечения и контроля качества вооружения и военной техники эффективно действовала в условиях плановой экономики с централизованным управлением в условиях приоритетности выполнения государственного оборонного заказа, его существенной (до 80—90%) доли в общем производстве предприятий и при наличии действенных рычагов влияния представительства заказчика Минобороны на управление разработкой, производством и качеством продукции. В этих условиях эффективно действовали военные стандарты: ГОСТ 20.57.402-81 «КСКК. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические требования к обеспечению качества», ОСТ 11.091.127-82 «СУКП. Основные положения отраслевой системы», стандарты СРПП ВТ, КС «Мороз-5», КС «Климат-6». Основные образцы ВВТ разработок 1970—1980-х годов соответствовали предъявляемым им требованиям по качеству.

После 1980-х годов наблюдается тенденция ухудшения качества и надежности РЭСВ, возрастание по отдельным группам ЭРИ процента рекламаций в 2—10 раз и существенное увеличение доработок техники в войсках.

Причинами снижения уровня качества и надежности РЭСВ вследствие общего кризиса промышленности являются:

- слабое функционирование систем управления качеством на предприятиях, резкое сокращение соответствующих служб;
- нарушение существовавших ранее кооперативных связей между предприятиями; сокращение работ по совершенствованию и разработке нормативно-технической базы в обеспечение качества и надежности;
- отставание уровня развития производственной и испытательной баз от современных требований;
- сокращение квалифицированного персонала на предприятиях и обслуживающего персонала в войсках;
- практическое прекращение информационного обмена данными об отказах и др.

В то же время в условиях реформирования Вооруженных сил России существенно возросли требования к эффективности, качеству и надежности ВВТ, включая РЭА, ЭРИ и материалы.

С целью выполнения требований Минобороны по реализации единого системного подхода к обеспечению качества и надежности всех комплектующих ВВТ было предложено ввести в практику деятельности организаций Минобороны и промышленности принципиально новую межотраслевую систему обеспечения и контроля качества и сертификации, обладающую высокой эффективностью.

Для реализации такой системы обеспечения и повышения качества РЭСВ предусматривались:

1. Разработка отечественных военных стандартов различных уровней, регламентирующих требования, методы и процедуры системы качества применительно к классам (группам) продукции военного назначения с более подробной регламентацией методов и процедур, адаптированных к реальному промышленному потенциалу отечественных предприятий и учитывающих положительный опыт отечественных предприятий в этой области.
2. Внедрение системы качества по военным стандартам на предприятиях оборонного комплекса с разработкой высокоэффективных алгоритмов информационных технологий управления качеством.
3. Организация эффективного контроля за функционированием систем качества на предприятиях.
4. Создание межотраслевой системы управления качеством (взамен распавшихся отраслевых систем), базирующуюся на квалифицированном контроле за внедрением и результатами функционирования системы качества на предприятиях по всей цепочке создания РЭСВ (материалы — электрорадиоизделия — радиоэлектронная аппаратура) и обеспечивающую эффективное управление размещением государственного оборонного заказа в условиях ограниченных ресурсов.

Для комплексной регламентации требований к организации и функционированию системы качества на предприятиях и ее контролю были разработаны:

- новый комплекс основополагающих государственных военных стандартов на электрорадиоизделия военного назначения — КС «Кли-мат-7»;
- руководящие документы системы сертификации «Военэлектронсерт»;
- нормативные документы на группы однородной продукции.

Новый комплекс стандартов обеспечивал преемственность основных положений действующей системы и тем самым позволял сохранить значительный положительный опыт, накопленный в отечественной практике создания и военной приемки изделий.

После 1995 года в Минобороны потребовалось решение вопроса по поставкам ЭКБ малыми партиями.

Из-за резкого сокращения объемов военных заказов электронные приборы военного назначения зачастую производились и поставлялись малыми

партиями, а изделия СВЧ-электроники, фотоэлектроники и квантовой электроники, как правило, единичными экземплярами. Эти тенденции сохранятся, во многом, на ближайший период, а для сложных многофункциональных изделий, уникальных изделий и изделий узкоцелевого назначения мелкосерийное и единичное производство будет основным и в условиях экономического возрождения и подъема. В связи с этим потребовалось совершенствование системы качества и сертификации РЭА, ЭРИ и материалов военного назначения в условиях неритмичного (прерывистого) и мелкосерийного (единичного) производства. Были усилены меры по обеспечению и контролю качества в процессе разработки и производства, это позволило существенно сократить затраты на приемку изделий, выпускаемых в таких условиях, с сохранением достигнутого уровня качества.

Сертификация РЭА, ЭРИ и материалов военного назначения, проводимая представителями Минобороны, дополняет действующую систему разработки и производства ВВТ процедурами, обеспечивающими повышение гарантий комплектования образцов ВВТ электрорадиоизделиями, РЭА и материалами требуемого качества.

Высокие требования Минобороны к участникам оборонного заказа стимулировали разработчиков, изготовителей и поставщиков оборонной продукции повысить активность в области сертификационной деятельности, что, в конечном счете, приведет к повышению качества продукции, которое является основным критерием эффективности функционирования системы качества предприятий и системы сертификации в целом.

В условиях финансовых сложностей существования предприятий оборонного комплекса с целью сохранения научно-технического и производственного потенциала многие предприятия вынуждены были провести реструктуризацию, в том числе изменение форм собственности, организацию холдинговых компаний, выделение дочерних предприятий, организацию эффективного функционирования испытательных центров при совместном их использовании несколькими предприятиями.

В такой ситуации Минобороны при формировании Государственного оборонного заказа (ГОЗ) отработало механизм повышения эффективности его размещения на основе проведения лицензирования деятельности предприятий, работающих в сфере обороны. Разработанная под руководством 14 Управления Минобороны методология оценки способности и готовности предприятий обеспечивать выполнение оборонного заказа по результатам сертификации систем качества и проведения комплексного аудита (проверки экономической и технической состоятельности организаций, состояния мобилизационных мощностей) стала основой для принятия решения о выдаче лицензий, что закреплено в действующей законодательной базе.

Внедрение новой системы обеспечения качества и надежности на предприятиях-разработчиках (изготовителях) и потребителях военной продукции позволило повысить качество и надежность модернизируемых радиоэлектронных средств вооружения в 1,5-2 раза, снизить количество рекламаций в 2-10 раз, обеспечить продление сроков эксплуатации 76 объектов боевой техники сверхназначенного ресурса в среднем в 1,35 раза.

1.3. Поколения электроники и радиотехники

Открытия и достижения в радиотехнике и электронике, внедренные в разработки электронных изделий и радиотехнических устройств, изменяли их облик и расширяли функциональные возможности, появлялись новые схемотехнические решения в радиоаппаратуре. С другой стороны, стремление увеличить дальность передачи радиосигналов за счет мощности передающих устройств требовало при разработке мощных генераторных ламп применения специальных материалов и встроенных систем охлаждения. Создание магнетронных генераторов, клистронных усилителей и других приборов СВЧ-диапазона позволило решить задачи раннего обнаружения самолетов и других летательных и подвижных аппаратов. Наряду с совершенствованием конструкции электронных изделий, работающих на уже известных принципах, постоянно велись поиски новых способов генерирования и усиления радиосигналов, позволяющих использовать новые схемотехнические решения в аппаратуре и получать передающие и приемные устройства, работающие с большей эффективностью в широком диапазоне частот.

С развитием электровакуумных ламп существенно улучшались эксплуатационные характеристики приемных устройств — расширился рабочий диапазон частот, увеличился коэффициент усиления каскадов, снизился коэффициент собственных шумов, расширился динамический диапазон входных сигналов и др. Стремление улучшить качество изображения телевизионных сигналов при приеме и передаче привело к разработке и совершенствованию приборов преобразования изображения в электрические сигналы.

Одновременно с усилительными и генераторными (активными) электронными приборами разрабатывалась и совершенствовалась номенклатура пассивных изделий (резисторов, конденсаторов, электрических соединителей, коммутационных изделий и др.), обеспечивающих возможность применения активных электронных приборов в оптимальных электрических режимах. На определенных этапах развития создавалась функционально полная номенклатура электронных изделий, позволяющих в этот период решать практически все задачи, которые возникали при проектировании и создании радиотехнических устройств на основе действующих в то время принципов конструирования и технологии монтажа. Это поколение функционально полной номенклатуры электронных изделий характеризовалось присущими и свойственными им конструктивными и эксплуатационными особенностями, а также способом их монтажа в аппаратуре. Такая номенклатура электронных изделий определялась как поколение, а аппаратура, создаваемая с их применением, определялась как аппаратура соответствующего поколения.

Последующее поколение аппаратуры отличалось от предыдущего более высокими функциональными возможностями, эксплуатационными характеристиками и техническими параметрами.

С начала 1950-х годов и до 2000 года был сформирован ряд поколений как изделий электронной техники, так и радиотехнических устройств. У каждого поколения свои критерии:

- основные активные комплектующие изделия электронной техники,
- технология монтажа в аппаратуре,

— удельные показатели функций (усиление, преобразование и т.п.) на один конструктивный элемент (объем элементов).

Можно выделить следующие поколения РЭА.

Первое поколение электровакуумных ламп, навесного (объемного) ручного монтажа элементов схемы с пайкой элементов на монтажных стойках, с реализацией отдельных функций в многокаскадном исполнении.

РЛС, ЭВМ, радио- и связная аппаратура 1950—1960-х годов (рис. 1.3.1).

Второе поколение полупроводниковых диодов, транзисторов, смешанного навесного монтажа с пайкой на монтажных стойках и печатных платах, с реализацией функций в однокаскадном модульном исполнении.

РЛС, ЭВМ, радио и связная аппаратура 1960—1970-х годов (рис. 1.3.2).

Третье поколение полупроводниковых диодов, транзисторов и микросхем малой степени интеграции, смешанного навесного монтажа с пайкой на печатных платах (функциональные модули), с реализацией функций в одно- и многокаскадном исполнении.

РЛС, ЭВМ, радио и связная аппаратура 1970—1980-х годов (рис. 1.3.3).

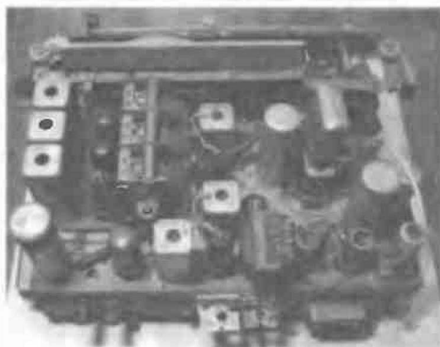
Четвертое поколение микросхем средней и большой степени интеграции с автоматизированным монтажом, групповой пайкой элементов на печатных платах, применением толсто пленочной технологии монтажа и с реализацией отдельных функциональных устройств в объеме одного кристалла микросхемы.

РЛС, ЭВМ, радио и связная аппаратура 1980—1985-х годов.

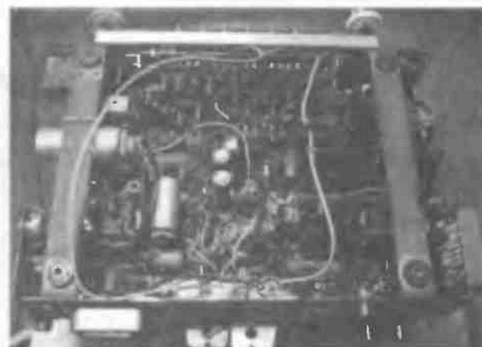
Пятое поколение микросхем большой и сверхбольшой степени интеграции с элементами самонастройки и элементами искусственного интеллекта. Электронные устройства с высоким уровнем функциональной интеграции.

РЛС, ЭВМ, радио и связная аппаратура начало 1990—начало 2000-х годов.

Шестое поколение устройств и систем на одном кристалле.



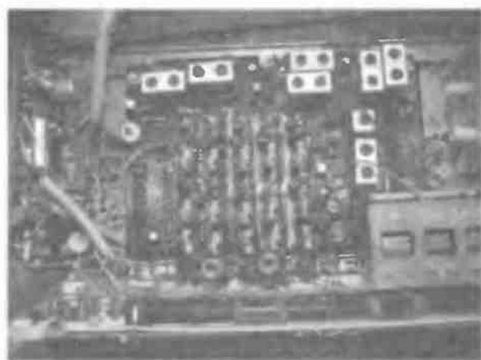
а



б

Рис. 1.3.1. Шасси (а) и вид монтажа (б) приемника первого поколения.

Диапазон принимаемых частот от 19 до 2000 м — 6 поддиапазонов. Чувствительность ДВ — 180 мкВ, СВ — 180 мкВ, на КВ — 80 мкВ. Напряжения питания 110, 127 и 220 В. Потребление от сети 120 Вт. 12 ламп. Масса шасси с монтажом около 10 кг, габариты 450 × 350 × 250 мм



а



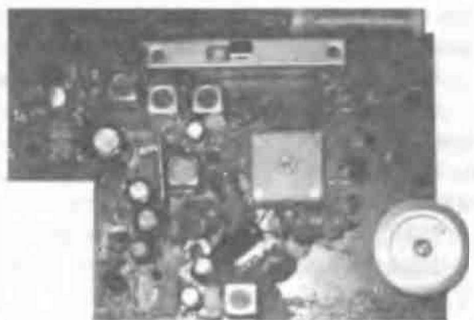
б

Рис. 1.3.2. Шасси (а) и вид монтажа (б) приемника второго поколения.

Диапазон принимаемых частот от 25 до 2000 м — 5 поддиапазонов, УКВ. Чувствительность ДВ, СВ, КВ — 30–150 мкВ, УКВ — 5–15 мкВ/м. 19 транзисторов. Напряжение питания 12 В. Мощность потребления от сети не более 35 Вт. Масса печатной платы с монтажом 1,5 кг, габариты 320 × 100 × 25 мм



а



б

Рис. 1.3.3. Печатная плата (а) и вид монтажа (б) модуля приемника третьего поколения.

Диапазон принимаемых частот от 19 до 600 м — 6 поддиапазонов: СВ, 3КВ, УКВ, ЧМ. Чувствительность СВ 0,5–07 мВ/м, КВ — 80 мкВ/м, УКВ, ЧМ — 5–15 мкВ/м. Напряжение питания — 4,5 В. Число транзисторов 6 шт., одна микросхема. Масса печатной платы с монтажом 150 г, габариты 110×80×12 мм. Мощность потребления от сети не более 0,05 Вт

Указанные временные интервалы поколений являются ориентировочными. Они зависят от развития аппаратуры конкретного направления, степени применения новых технологий аппаратостроительными предприятиями, а также от времени появления данного класса аппаратуры.

Не умоляя значимости в построении радиотехнических комплексов всех классов и групп изделий электроники, необходимо заметить, что, начиная с третьего поколения, определяющую роль в принципах конструирования ап-

паратуры и во внедрении групповых технологий монтажа стала играть микроэлектроника, включая интегральные микросхемы, полупроводниковую СВЧ-электронику, фотоэлектронику, квантовую и оптоэлектронику. Новые принципы конструирования и монтажа аппаратуры способствовали не только реализации многофункциональной малогабаритной аппаратуры, но и оказали определяющее влияние на динамику радиоэлектроники в целом.

Начиная с четвертого поколения и особенно в пятом и шестом поколениях, происходит перенос схемотехнических функций, ранее выполняемых узлами, блоками и даже устройствами радиоэлектронной аппаратуры, на электронную компонентную базу.

Каждое новое поколение электронных приборов приводило к появлению новых технических решений в радиотехнике. И наоборот поиск новых принципов реализации систем и комплексов радиоэлектронной аппаратуры диктовал свои требования к облику, функциональному назначению и параметрам изделий электроники.

Проектирование функционально сложных интегральных микросхем и электронных модулей на ранних стадиях их создания без участия схемотехников, конструкторов радиоэлектронной аппаратуры стало невозможным. На всех этапах проектирования была необходима реализация процессов соответствующей технической интеграции, где каждый раз оцениваются требуемые схемотехнические варианты построения изделий, их выходные параметры и сопоставляются с возможностями интегральной технологии.

Динамику развития и изменения поколений РЭА можно наглядно иллюстрировать по указанным выше критериям поколений, а также по потребляемой мощности и количеству выполняемых функций в расчете на единицу объема. В таблице 1.3.1 в обобщенном виде представлена динамика развития РЭА, даны значения основных показателей.

В таблицах 1.3.2 и 1.3.3 приведены примеры конкретной аппаратуры различных поколений, иллюстрирующие повышение их потребительских и эксплуатационных показателей.

Таблица 1.3.1. Динамика развития РЭА

Поколения РЭА	Основные виды ИЭТ	Способы монтажа	Плотность компонентов, эл./см ³	Удельная потребляемая мощность, Вт/дм ³	Функциональная сложность, число функций/дм ³
1 поколение	ЭВП, дискр. эл.	Объемный	0,1	10–30	1–5
2 поколение	ПП приборы, дискр. эл.	Печатный	0,5	10–30	3–10
3 поколение	ИС, МСБ, дискр. эл.	Многослойные платы	2,0	10–30	10–50
4 поколение	БИС, МСБ, ИФЭ	Поверхностный	10	10–30	20–100
5 поколение	СБИС, комплекс. изделия	Платы 4-го и 5-го класса точности	20	10–30	100–500

Таблица 1.3.2. Телевизионные приемники

Поколения ТВ-приемников	Основные виды ИЭТ	Способ монтажа	Вес радиоэлектронной части телевизора (без ЭЛТ), кг	Потребляемая мощность, Вт	Число каналов, способ управления
1 поколение	ЭВП, дискретные элементы	Объемный	15	250	12, механическое переключение
2 поколение	ПП, специализированные ИС, дискретные элементы	Печатный	2,5	90	более 30, электронное, дистанционное

Таблица 1.3.3. Связная аппаратура

Поколения РЭА связи тактического звена	Основные виды ИЭТ	Количество рабочих частот	Вес, кг	Объем, дм ³	Плотность компоновки, эл/дм ³
1 поколение 1950–1960 гг.	Мини-ЭВП, дискретн. элементы	400	18	27	20
2 поколение 1960–1970 гг.	Субминиатюрные ЭВП, дискрет. элементы	600	12	15	50
3 поколение 1972–1977 гг.	Дискретные ПП, ГИС	1700	4	8	$2 \cdot 10^3$
4 поколение 1977–1985 гг.	Монолит. ИС, микросборки	2000	3	7	$8 \cdot 10^3$

На примере поколений навигационной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (НАП СНС) иллюстрируется характер изменения технических параметров и функциональных возможностей аппаратуры различных поколений с 1984 года до настоящего времени (таблица 1.3.4). Разработки первого поколения относятся к началу 1980-х годов, времени, когда техника спутниковых навигационных систем начала активно развиваться в интересах потребителей (рис. 1.3.4).

Таблица 1.3.4. Аппаратура потребителей спутниковых навигационных систем

Поколения аппаратуры НАП	Число функций	Число каналов	Точность определения координат, м	Основные ИЭТ	Вес, кг	Функциональная сложность, число функций/дм ³
1 поколение	2	2	120–300	Транзисторы, гибридные и монолитные ИС малой степени интеграции	49	0,03
2 поколение	7	8	30	Транзисторы, ИС малой, средней степени интеграции	4,5	0,9
3 поколение	8	14	10–30	Транзисторы, ИС СВЧ, ИС средней степени интеграции	1,6	5,2
4 поколение	8	16–24	5–15	Транзисторы, ИС СВЧ, БИС	0,4	32



Рис. 1.3.4. Поколения навигационной аппаратуры потребителей

При разработке и производстве каждого поколения на аппаратостроительных предприятиях использовались свои принципы конструирования и технология производства аппаратуры. Приемы монтажа ИЭТ в аппаратуре во многом зависят от конструктивных особенностей и допустимых температурных и механических нагрузок на электронные компоненты. В свою очередь, технология монтажа (автоматизация, навесной монтаж, печатные платы, групповая технология и др.) устанавливает специальные требования к конструктивным размерам и допускам комплектующих элементов (бескорпусные элементы, паяемость, допуски на размеры и т.д.).

Развитие прогрессивных технологических процессов и технологического оснащения серийного производства изделий электронной техники, а также разработка новых методов конструирования радиоэлектронной аппаратуры были невозможны без специальных исследований.

До начала 1950-х годов основной технологией изготовления аппаратуры была технология навесного (объемного) монтажа. В 1952–1953-х годах начала разрабатываться и внедряться на заводах технология печатного монтажа.

Внедрение печатного монтажа создавало реальные предпосылки для коренного преобразования инфраструктуры проектирования и производства РЭА, что обеспечивало резкое сокращение сроков разработки, повышение надежности аппаратуры и создавало условия для широкой механизации ее производства, а также для реализации принципов построения аппаратуры на основе унифицированных функциональных узлов.

Был разработан комплекс средств малой механизации для формовки выводов дискретных радиоэлементов и микросхем, лужения выводов, установок на печатные платы, монтажа в узлах и блоках электропаяльниками, а на печатных платах — групповыми способами.

В конце 1960-х годов в радиопромышленности был разработан отраслевой стандарт, регламентирующий установочные размеры ИЭТ для монтажа на печатные платы. При разработке этого стандарта был использован опыт как зарубежных, так и отечественных предприятий. К этому времени уже был создан комплекс механизированного и автоматизированного оборудования для сборки узлов на печатных платах.

В процессе внедрения разработанного стандарта выявилось, что отечественные ИЭТ в части точности размеров, технологических ограничений по температурным, механическим и другим воздействиям, способам упаковки не отвечают требованиям автоматизированного производства. Совместно с головными предприятиями электронной промышленности по видам элементной базы (резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы) был разработан межотраслевой стандарт, регламентирующий:

- конструкции корпусов электрорадиоэлементов, материалы выводов, виды покрытий, способы маркировки;
- размеры корпусов и их допустимые отклонения;
- присоединительные размеры;
- технологические режимы в процессах автоматизированной сборки;
- способы упаковки и размеры тары.

Однако сначала этот стандарт не был принят электронной промышленностью, а был введен в радиопромышленности как отраслевой.

В дальнейшем аппаратостроительные министерства, потребляющие ИЭТ, поставляемые предприятиями электронной промышленности, ввели этот стандарт в действие, что фактически превратило его в межотраслевой, и руководство электронной промышленности вынуждено было согласиться с необходимостью введения этого стандарта на своих предприятиях. И в 1984 году был выпущен и введен в действие ГОСТ 20.39.405-84 «Изделия электронной техники и электротехнические для автоматизированной сборки аппаратуры». Введение этого стандарта способствовало выпуску на предприятиях электронной промышленности широкой номенклатуры ИЭТ и эффективному применению прогрессивных методов автоматизированного монтажа ИЭТ в аппаратуре.

1.4. Эксплуатационная надежность радиоэлектронных средств

Совместные исследования надежности ИЭТ и РЭА в условиях эксплуатации были начаты в 1950-х годах, в том числе путем подконтрольной эксплуатации конкретных образцов радиоэлектронных средств с примененными в них электронными изделиями. Первые систематические исследования надежности РЭА и ИЭТ начались с организации и проведения в 1956—1957-х годах

опытной эксплуатации 50 тыс. шт. ЭВП (генераторные, модуляторные, приемо-усилительные лампы, тиратроны), которые были проверены и промаркированы, в аппаратуре ПВО, ВВС и ВМФ.

Результаты опытной эксплуатации аппаратуры наземных РЛС, станций оружейной наводки, самолетных бомбоприцелов и поставленных в эту аппаратуру ЭВП позволили совместно с предприятиями промышленности и заказывающих управлений определить показатели надежности РЭА и ЭВП, оценить влияние режимов работы ламп на безотказность их работы в обследованных видах аппаратуры.

Проводились экспериментальные исследования влияния внешних воздействующих факторов и циклического режима работы на надежность бортовой ракетной аппаратуры. В результате проведенной работы была увеличена средняя наработка на отказ этого парка аппаратуры в 2-3 раза.

Широкий круг исследований стал возможен благодаря созданию специальных исследовательских организаций в Минобороны и оборонной промышленности — Центральным бюро применения. Система организаций, ведущих исследование надежности ИЭТ и РЭА в стране, постоянно совершенствовалась, разрабатывались новые методы и методики исследований надежности с применением совершенного диагностического оборудования и методов неразрушающего контроля. Расширялся круг задач, подлежащих исследованию в интересах повышения надежности ИЭТ и РЭА, в связи с поступлением на вооружение образцов радиоэлектронных средств, аппаратура которых построена на модульном принципе с широким применением изделий микроэлектроники, с качественно новыми схемотехническими и конструктивными решениями и технологическим исполнением сменных модулей.

Для оперативного анализа причин отказов и исследования надежности важнейших типов РЭА и комплектующих ее ИЭТ на стадиях разработки, производства и эксплуатации решением Комиссии Президиума Совета Министров СССР ВПК № 206 (1978 г.) была создана структура анализа отказов РЭА и ЭРИ, состоящая из отраслевых Центров анализа отказов во главе с Межведомственным Центром исследования надежности и анализа отказов радиоэлектронной аппаратуры военного назначения и комплектующих ее электрорадиоизделий.

Были определены порядок проведения работ по исследованию и оперативному анализу отказов военной радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих ее изделий и основные задачи Центра, а также образован при Центре Межведомственный экспертный Совет (МЭС) по анализу отказов военной радиоэлектронной аппаратуры.

Центром проводились работы по проведению оперативного и экспертного анализа причин отказов конкретных образцов РЭА и комплектующих ее ИЭТ, оценка правильности выбора номенклатуры и проверка режимов работы ИЭТ в РЭА с целью предупреждения отказов на этапах разработки и изготовления опытных образцов и другие работы.

В период с 1980 по 1990 год были выполнены комплексные научно-исследовательские работы по исследованию надежности и анализу причин отказов 156 важнейших типов РЭА в условиях эксплуатации методом специальной подконтрольной эксплуатации и 123 типов аппаратуры на стадиях разработки и освоения в серийном производстве с участием научно-иссле-

довательских организаций Минобороны и головных организаций оборонных отраслей промышленности.

Исследовались: бортовой радиотехнический комплекс системы управления ракет, радиолокационный прицельный комплекс самолетов, радиолокатор обзора самолета, зенитный ракетный комплекс, навигационный комплекс и др.

Были выявлены недостатки разработки, производства и эксплуатации этой аппаратуры и комплектующих ее ИЭТ. Установлено, что многие типы резервированной аппаратуры не обладали требуемой отказоустойчивостью. Нестыковка параметров СВЧ-приборов с параметрами СВЧ-трактов аппаратуры во всех режимах работы и условиях эксплуатации из-за не оптимально установленных для них норм и недостаточных конструктивно-технологических запасов являлась причинами отказов комплекса.

Проведенными исследованиями установлено, что отказы аппаратуры в ряде случаев возникают из-за неучета при ее разработке свойств и особенностей конструкции, топологии и технологии изготовления полупроводниковых ИЭТ, определяющих их высокие динамические, амплитудно-частотные и временные характеристики, а также неучета распределенных емкостей и индуктивностей многослойных печатных плат и протяженных линий межплатных связей. Результаты исследований позволяли оперативно вносить изменения в конструкцию как электронных изделий, так и аппаратуры.

В результате проводимых исследований по надежности ИЭТ и РЭА были разработаны требования к уровню внешних воздействующих факторов (климатических и механических нагрузок, спецфакторов) на аппаратуру и ИЭТ, отраженные в комплексе государственных стандартов «Мороз» и «Климат».

Важнейшей составляющей в работах по повышению надежности аппаратуры являлись работы по контролю за правильностью применения и оптимальному сопряжению режимов ИЭТ в РЭА. В аппаратуре выявлялись схемные позиции, в которых ИЭТ использовались с нарушением режимов и условий работы, разрабатывались рекомендации по совершенствованию схемных и конструктивных (а позднее и технологических) решений в аппаратуре.

Так, при обследовании около 200 объектов РЭА всех классов, содержащих более 1,5 млн. комплектующих ИЭТ, было выявлено до ста тысяч потенциально ненадежных схемных позиций. Устранение такого количества недостатков разработки РЭА на ранних этапах их создания позволило в 3–7 раз снизить вероятность отказов при испытаниях и эксплуатации и обеспечило значительный экономический эффект.

1.5. Комплексная миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры

Проблемы уменьшения габаритов и снижения энергопотребления радиоэлектронной аппаратуры и устройств военного назначения были актуальны всегда. Специалисты радиоэлектронной промышленности постоянно вели научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по миниатюризации ИЭТ и аппаратуры. Эффективное использование достижений элек-

троники и радиотехники и их взаимовлияние способствовали существенно-му снижению массогабаритных показателей РЭА на основе комплексной миниатюризации аппаратуры.

Под комплексной миниатюризацией радиоэлектронной аппаратуры понимается совокупность схемотехнических, конструктивно-технологических и организационно-производственных решений, базирующихся на широком использовании интегральных микросхем, гибридно-пленочных микросборок, изделий функциональной электроники, специализированных полупроводниковых схем на основе базовых матричных кристаллов (БМК), прогрессивных средств коммутации. Оптимизированные базовые несущие конструкции охватывают все без исключения узлы, блоки и устройства аппаратуры. Комплексная миниатюризация — это увеличение функциональной сложности различных классов РЭА, повышение ее надежности и технологичности, улучшение экономических показателей, радикальное снижение веса, габаритов и энергопотребления, уменьшение материалоемкости и улучшение других показателей при обеспечении выполнения РЭА заданных тактико-технических требований.

Необходимость учета всех перечисленных выше факторов в процессе создания РЭА потребовало комплексного подхода к ее конструированию.

Системные исследования в области комплексной миниатюризации начались в 1965 году при выполнении НИР «Ландыш» (головной исполнитель — 22 ЦНИИ МО), включающей разработку требований к комплексной миниатюризации радиоэлектронных средств вооружения и военной техники и методов их подтверждения с учетом специфики авиационной, ракетно-космической, наземной и морской техники.

Результаты НИР были обсуждены на заседании ВПК, где было принято целевое решение об их учете при создании конкретных систем и комплексов радиоэлектронных средств. Требования к показателям комплексной миниатюризации РЭА, включая требования к проценту перевода функциональных блоков в микроэлектронное исполнение, были признаны конструкторами, согласованы и документально оформлены, а комплексная миниатюризация признана как важное направление создания РЭА военного и двойного назначения.

Поэтому одной из важнейших задач радиоэлектронного приборостроения 1960-х годов являлась реализация принципов комплексной миниатюризации при построении большинства блоков и устройств аппаратуры. На первых этапах внедрения этих принципов стало ясно, что существенное улучшение массогабаритных и удельных характеристик РЭА возможно, если при конструировании и размещении на единых конструктивных платах используется номенклатура комплектующих элементов интегральной технологии и повышенной функциональной сложности, элементов, обладающих конструктивной, параметрической, метрологической, а для некоторых изделий и информационной совместимостью. Кроме того, развитие микроэлектроники и модульных принципов конструирования привело к разработке новых схемотехнических и системотехнических решений. Появившиеся отечественные интегральные схемы позволили существенно сократить габариты и вес отдельных электронных блоков, особенно для цифровой обработки.

Однако в разрабатываемой в то время аппаратуре, особенно в аналоговой РЭА, интегральные схемы составляли лишь небольшую часть. В аппаратуре имелось значительное количество элементов, узлов и устройств, которые в силу особенностей функционирования или из-за экстремальных электрических параметров не могли быть реализованы на типовых интегральных схемах. К ним относятся устройства частотной и временной селекции (фильтры, резонаторы, линии задержки, трансформаторы, дроссели, катушки индуктивности); устройства ВЧ- и СВЧ-тракта (УВЧ, УПЧ, фазовращатели, разветвители, переключатели); схемы с прецизионными элементами (высокоточные резистивные для АЦП, дифференциальные схемы); запоминающие устройства; мощные преобразователи и вторичные источники энергии (усилители мощности, формирователи мощных импульсов, источники питания, передающие устройства, элементы АФАР); датчики динамических величин; функциональные электромеханические устройства (устройства сельсинной автоматики, электромеханические преобразователи информации, ленточные магнитные ЗУ, периферийные устройства); силовые электромеханические устройства (антенные устройства РЛС) и многое другое. Все эти изделия выполнялись традиционными методами, имели низкую технологичность и надежность. Как бы предельно не уплотняли блоки на интегральных схемах, масса и габариты аппаратуры будут всецело определяться указанными выше элементами и устройствами. Было очевидно, что назрела проблема комплексного подхода к развитию электронных изделий в интересах миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры, необходим был поиск новых направлений и механизмов их реализации.

Таким новым направлением стала функциональная электроника, как направление науки и техники, изучающее принципы построения радиотехнических устройств на основе динамических неоднородностей, т.е. путем использования физических процессов в среде для реализации радиотехнических функций без применения общепринятых схемных элементов R , L , C , транзисторов, диодов и др.

Работа проводилась по следующим направлениям: акустоэлектроника, оптоэлектроника, магнитоэлектроника, термоэлектроника.

Большое развитие получила *акустоэлектроника*. Была создана материаловедческая база по производству пьезопластин кварца и ниобата лития, акустоэлектронных поглотителей и других материалов, создан дополнительный ряд металlostеклянных корпусов специально для акустоэлектронных изделий (АЭИ). Была разработана межотраслевая программа стандартизации изделий акустоэлектроники, создана нормативно-техническая документация в виде отраслевых и государственных стандартов по конструированию и технологии АЭИ на поверхностных акустических волнах (ПАВ), типоразмерным рядам пьезоплат, параметрическим рядам изделий, методам измерений параметров.

Применение АЭИ позволило существенно улучшить тактико-технические характеристики аппаратуры, в том числе массогабаритные параметры, помехоустойчивость, точностные характеристики, быстродействие.

На рис. 1.5.1 показана гиперзвуковая линия задержки, которая нашла широкое применение в аппаратуре. Создавались также комплексированные изделия на ПАВ, например, банк фильтров (рис. 1.5.2).

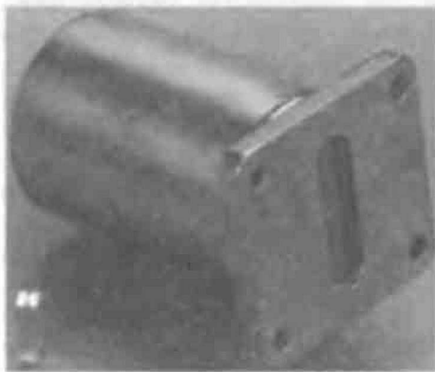


Рис. 1.5.1. Гиперзвуковая линия задержки — имитатор эхо-сигнала

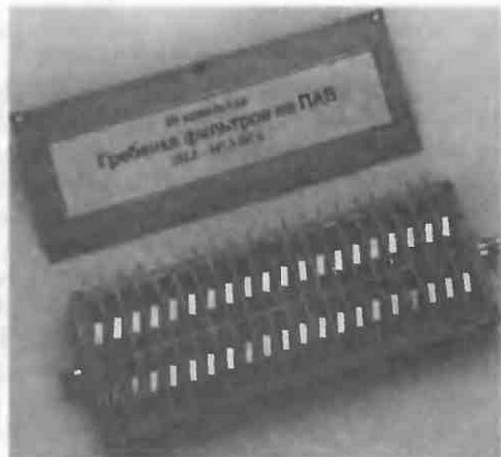


Рис. 1.5.2. Банк фильтров (40 каналов) на ПАВ

В последние годы продолжились разработки АЭИ с высоким уровнем параметров на основе поверхностных акустических волн в диапазоне частот до 2 ГГц и объемных акустических волн (ОАВ) до 10 ГГц.

Магнитоэлектроника — второе важное направление в функциональной электронике. Еще в 1958 году были начаты работы по созданию тонких магнитных пленок. В те годы создавались электронно-вычислительные машины, в которых для обеспечения оперативной памяти необходимо было перейти от использования матриц на основе ферритовых кольцевых сердечников к тонким магнитным пленкам. Это позволяло резко увеличить объем памяти, повысить быстродействие записи и считывания информации, улучшить технологичность конструкции накопителей и перейти к интегрально-групповому способу производства.

Были разработаны первые в стране вакуумные установки с магнитными полями для получения магнитных пленок с требуемыми свойствами, в том числе автоматическая линия АЛИМ-12. Разработанные магнитные блоки были внедрены в спецвычислитель «Вектор». По тем временам блок оперативной памяти на основе магнитных пленок обладал рекордно высоким быстродействием при очень малых массогабаритных параметрах. Работы в этом направлении были прекращены к началу 1980-х годов в связи с появлением на рынке персональных компьютеров на основе полупроводниковой технологии и сменных дисков.

Создание магнитных сред на основе полученного опыта было продолжено в работах по ядерному магнитному резонансу для создания конвольверов на основе «спинового эха». Было разработано несколько типов устройства корреляционной обработки сигналов РЛС на основе магнитных пленок кобальта с рабочей частотой 215 МГц и полосой частот 20 МГц. По своей сути это был оригинальный физический принцип получения эхо-сигнала, однако данное направление имело принципиальный недостаток — невозможность гибко варьировать рабочую частоту и полосу пропускания, из-за чего этот

вид изделий не смог выдержать конкуренцию с устройствами обработки сигналов на ПАВ.

Следующим направлением функциональной электроники явилось начатое в 1974 году создание активных компонентов для волоконно-оптических систем связи, передачи и обработки информации для бортовой аппаратуры, аппаратуры объектовой и межобъектовой связи, кабельного телевидения, телефонии, аппаратуры управления энергетическими установками. Разрабатывались фотоприемные и светоизлучающие микросборки, приемопередающие модемы, электронно-оптические преобразователи. Конструктивно устройства были выполнены в виде гибридных микросборок в металlostеклянных корпусах, герметизируемых лазерной сваркой. Было разработано около 30 типов аналоговых и цифровых изделий. Уже первый опыт применения этих устройств в аппаратуре показал возможность существенного уменьшения массы применяемых кабелей и проводов, принципиального исключения электромагнитных наводок и повышения помехоустойчивости и скрытности передачи информации. Для передачи сигналов используются стандартные длины волн: 0,85; 1,3; 1,55 мкм. Аналоговые устройства работают в диапазоне частот до 500 МГц, а цифровые имеют быстродействие до 34 Мб.

Использование современных эффективных светоизлучающих диодов, лазеров и р-і-п-фотоприемников позволило обеспечить уровень мощности излучения до 10 мВт и пороговой чувствительности до 10^{-8} Вт. Разработанные устройства внедрены в специальную аппаратуру РЛС ПВО, ЗРК и др.

Направление *термоэлектроники* проявилось в создании ряда термопечатающих матриц для безударного вывода информации на бумажные носители. Термопечатающие матрицы были разработаны с использованием пиролитических пленок окиси олова, обладающих высокой износостойкостью. Матрицы производились серийно и были применены в регистрирующем устройстве самолета АН-124. В постсоветский период работы были прекращены.

Все микросборки, изделия функциональной электроники и другие специализированные изделия, предназначенные для комплексной миниатюризации, были названы изделиями специальной микроэлектроники.

Опыт дальнейшей работы показал, что широкое применение микросборок, изделий функциональной электроники и других прогрессивных научно-технических решений действительно позволило значительно улучшить структуру и параметры аппаратуры. Особенно важным результатом комплексной миниатюризации устройств РЭА была возможность существенного повышения технологичности и снижения трудоемкости изготовления изделий радиоэлектронной аппаратуры. В аппаратуре радиосвязи, телевизорах и радиоприемниках, радарх, аппаратуре аналоговой обработки сигналов использовалось значительное количество моточных электрорадиоэлементов: катушек индуктивности, фильтров, дросселей. Трудоемкость их изготовления, сборки и настройки составляла до 10-15% от трудоемкости производства РЭА в целом, поэтому замена моточных изделий была основой сокращения затрат и высвобождения резервов производства. В то же время физика твердого тела уже тогда предоставляла большие возможности для построе-

ния этого класса изделий на основе поверхностных и объемных акустических волнах. Их преимущество заключается не только в резком снижении трудоемкости за счет интегрально-группового способа производства и исключении настроечно-регулирующих работ, но и в существенном расширении диапазона параметров.

Акустоэлектронные изделия (резонаторы, фильтры, линии задержки, дисперсионные линии задержки на ПАВ, гиперзвуковые линии задержки на ОАВ) нашли широкое применение в радиоэлектронных системах и комплексах, в том числе в С-300, С-400, ЗРК «Тор-М1», наземных РЛС ПВО, в бортовых РЛС, аппаратуре панорамной съемки в радиодиапазоне, аппаратуре радиоразведки, РЛС навигации и управления воздушным движением, корабельных РЛС и системах связи и др. Применение АЭИ позволило существенно улучшить тактико-технические характеристики аппаратуры в том числе массогабаритные параметры, помехоустойчивость, точностные характеристики, быстродействие.

Таким образом, повсеместное внедрение в аппаратуру широкой номенклатуры микросборок, в том числе СВЧ-диапазона, прогрессивных средств коммутации на основе полиимидных пленок, прецизионных гибридных АЦП, модулей АФАР, акустоэлектронных изделий на поверхностных и объемных акустических волнах, применение оптоэлектронных датчиков угол-код, волоконно-оптических приемопередающих модулей межблочной и межприборной связи, вторичных источников питания нового поколения в сочетании с базовыми несущими конструкциями позволило в корне изменить структуру, конструктивно-технологическую сущность и облик электронной аппаратуры, существенно улучшив ее тактико-технические и экономические характеристики.

Благодаря широкому внедрению в аппаратуру интегральных схем, применению микросборок, изделий функциональной электроники, прогрессивных средств коммутации, уровень комплексной миниатюризации и плотность компоновки аппаратуры (см. таблицу) неуклонно возрастал.

Таблица. Динамика роста плотности компоновки по уровням разукрупнения (по годам)

Аппаратура	Плотность компоновки, число элементов/см ³				
	1950	1960	1970	1980	1990
Микросборки, ИС, БИС, СБИС	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁵
Электронный модуль 1-го уровня	1	5	20	60–100	100–300
Электронный модуль 2-го уровня	0,3	2	7	20	50
РЭА	0,1	0,5	2	10	20

С целью оперативного внедрения принципов комплексной миниатюризации РЭА в аппаратостроительных отраслях проводилась большая работа по их пропаганде в научных учреждениях и производственных предприятиях. В головных промышленных организациях были расширены исследова-

ния, направленные на разработку новых методов конструирования с использованием принципов комплексной миниатюризации.

В 1970-х годах были обобщены первые результаты работ и методы комплексной миниатюризации РЭА, а также проведены сравнительные оценки отечественного и зарубежного уровней. Проведены исследования технических решений в области схмотехники, системотехники и конструирования, принимаемых конструкторами РЭА. Результаты обобщения включались в специальные бюллетени по комплексной миниатюризации РЭА.

Для координации работ по этой проблеме решением Правительства был создан Межведомственный координационный совет по комплексной миниатюризации во главе с заместителем Министра радиопромышленности.

1.6. Сопряжение сверхвысокочастотных приборов в аппаратуре

Сверхвысокочастотные приборы (СВЧ-приборы) отличаются повышенной чувствительностью к условиям сопряжения с другими элементами аппаратуры, режиму питания, внешним климатическим и другим нагрузкам. Поэтому в процессе создания приборов и их применения в аппаратуре особое внимание уделялось исследованиям по определению режимов оптимального сопряжения приборов СВЧ как между собой, так и с узлами и блоками РЭА. Такие исследования, как правило, проводились совместно разработчиками СВЧ-приборов и передающих устройств.

Актуальность работ по сопряжению возросла в связи с широким использованием пассивных помех для подавления импульсных РЛС, что потребовало применения режима селекции подвижных целей с использованием эффекта Доплера. Основным требованием реализации такого режима является высокая стабильность СВЧ-колебаний передатчика. Созданные ранее модуляторы и магнетроны не могли обеспечить требуемую стабильность и поэтому первые РЛС, принятые на вооружение, имели недостаточную эффективность в условиях интенсивных пассивных помех. Потребовались постановка и проведение специальных работ, направленных на повышение стабильности колебаний приборов СВЧ и доработку модулирующих устройств в части повышения стабильности питающих напряжений.

Стабильность и эффективность работы генератора СВЧ существенно зависит и от степени его согласования с высокочастотной нагрузкой во всем диапазоне его рабочих частот. Даже незначительные рассогласования могут приводить к скачкообразному неуправляемому изменению частоты генерируемых колебаний. Обеспечение стабильной работы в этом случае достигается либо соответствующей настройкой выходного сопротивления СВЧ-прибора с входным сопротивлением его высокочастотной нагрузки, либо применением специальных согласующих (развязывающих) устройств.

Внедрение фазированных антенных решеток (ФАР) с использованием широкополосных сигналов в 1970-е годы привело к возрастанию требований как к линейности и идентичности амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик приборов СВЧ, так и к стабильности источников питающих напряжений в каналах ФАР. Опыт разработок и применения приборов СВЧ

показал необходимость формирования специальных требований по сопряжению к мощным усилительным приборам СВЧ с учетом объединения отдельных каскадов усилителей в виде интегрированного усилительного устройства — модулей, моноблоков, комплексированных устройств. Построенные на модульном принципе устройства имели существенно меньшие массогабаритные характеристики при высокой стабильности частотных и амплитудных характеристик за счет оптимального сопряжения составляющих элементов устройства при их настройке в заводских условиях.

Опыт эксплуатации ряда РЛС показал, что в некоторых случаях в процессе их работы в передающих устройствах возникали пожары. Было установлено, что возгорание в передатчике возникает из-за мощного излучения паразитных колебаний через катодный ввод высокого напряжения магнетрона. Изменение в конструкции магнетрона, выполненное его разработчиком, а также использование поглощающих материалов на вводе высокого напряжения в модуляторе позволили решить эту проблему.

Для надежной и эффективной работы передатчика СВЧ-колебаний требуется оптимальное сопряжение по соотношениям мощностей генератора и модулятора. Как недостаточная мощность модулятора, так и ее превышение могут приводить к нарушению в работе генератора и, в частности, увеличению времени готовности. Требование минимального времени готовности особенно важно для таких устройств, как радиовзрыватели. Известен случай, когда при очередных регламентных проверках ракет зенитных комплексов было установлено, что время готовности радиовзрывателей у ряда ракет вместо нескольких секунд достигает одной-двух минут. Увеличение времени готовности наблюдалось у магнетронов после их продолжительного перерыва в работе и, как правило, в штатном модуляторе радиовзрывателя, не имеющего запаса по мощности. На заводском модуляторе со значительным запасом по мощности по отношению к мощности магнетрона этот эффект практически отсутствовал. Было установлено, что выявленный дефект связан с незначительным ухудшением вакуума в магнетроне за счет выделения газа из внутривакуумных элементов конструкции. При включении магнетрона на заводском модуляторе в первый момент (доли секунды) между анодом и катодом магнетрона возникал достаточно мощный газовый разряд, при этом анодное напряжение оставалось близким к рабочему, происходило «жестчение» вакуума и магнетрон стабильно запускался. В штатном модуляторе при возникновении разряда между анодом и катодом магнетрона напряжение модулятора резко падало, процесс «жестчения» из-за снижения разрядного тока замедлялся (или прекращался), и магнетрон не входил в рабочий режим в требуемое время готовности. Для устранения указанного эффекта была проведена доработка магнетрона с целью повышения его сохранности и изменен режим работы штатного модулятора.

На первых этапах разработок и применения многофункциональных и высокоэффективных радиотехнических систем повышенной помехозащищенности, в передатчиках которых использовались мощные усилительные цепочки из приборов СВЧ, потребовались дополнительные работы по их сопряжению в составе усилительной цепочки радиотехнических комплексов. Выявленные в процессе создания передатчиков и проведения испытаний особенности применения и сопряжения мощных каскадов усилителей под-

твердили необходимость реализации особых требований и использования специальных мер как в процессе разработки самих СВЧ-приборов, так и при разработке передатчиков.

Одно из таких требований — исключение нестабильной работы самих приборов СВЧ, а также электрических пробоев по высоковольтным цепям передатчика. Опыт разработки мощных передатчиков, свободных от электрических пробоев, показал, что в реальных условиях эксплуатации подвижных РЛС высоковольтное напряжение питания мощного прибора СВЧ не должно превышать 50–60 кВ, а в стационарных — 150 кВ.

В передающих устройствах 1960-х годов в качестве выходных усилителей могли применяться либо усилители магнетронного типа (М-типа), либо одноручевые клистроны.

Ниже приведены зависимости, характеризующие изменение в период 1961–1967 годов значения выходной импульсной мощности (рис. 1.6.1) и средней мощности (рис. 1.6.2).

Одноручевые клистроны, при равных с усилителями М-типа импульсных мощностях порядка 4–5 МВт, требовали для работы в 2,5–3 раза большее напряжение (порядка 150 кВ у клистрона и 50 кВ у амплитрона). Очевидно, применение усилителей М-типа было предпочтительным в передатчиках мобильных РЛС (это обстоятельство использовано при создании подвижного ЗРК). Однако приборы М-типа, в силу своего принципа действия, не могут работать в режимах с изменением в широких пределах длительности и скважности по питанию, которые требуются в многорежимных РЛС.

В 1970-е годы использование в радиолокации сигналов сложной формы позволило перейти к соответствующим по энергетическому потенциалу средним значениям мощности при сохранении импульсной мощности на уровнях, приемлемых для разработки многорежимных РЛС. На рис. 1.6.2 приведена динамика выходной средней мощности усилителей М-типа и

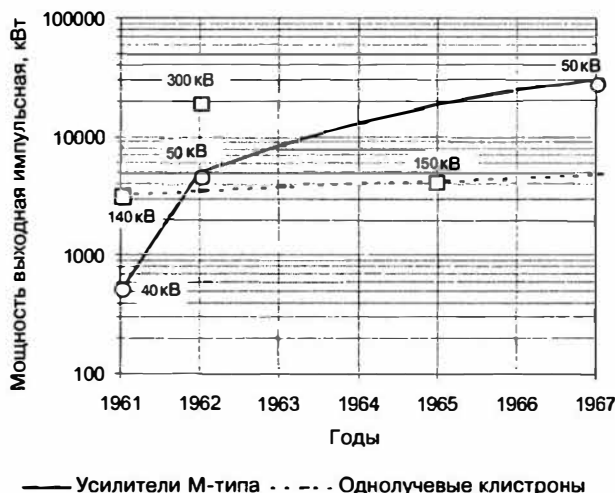


Рис. 1.6.1. Изменения импульсной мощности по мере развития усилителей. Точками указаны значения питающих напряжений

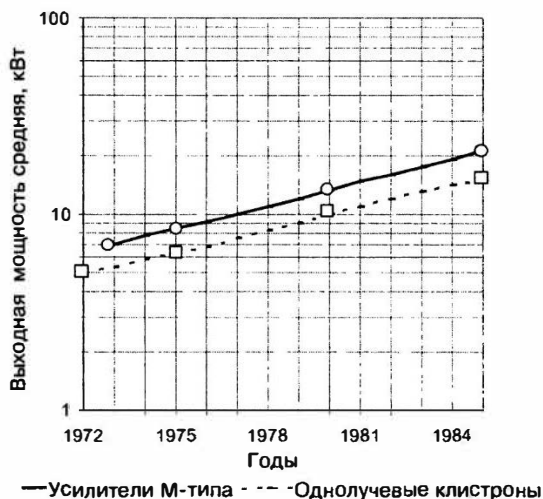


Рис. 1.6.2. Изменение средней мощности по мере развития усилителей

многолучевых клистронов, у которых значения питающих напряжений при равных мощностях практически совпадают. С созданием многолучевых клистронов, имеющих сеточное управление импульсным режимом питания, стали возможными оптимальные режимы, приемлемые в подвижных много-режимных РЛС.

При написании раздела использованы отдельные материалы В.А. Шубарева, С.В. Якубовского.

Литература

40 лет отечественной электроники. — Электронная промышленность, 2001, вып. 1.

60 лет Российской радиоэлектроники. — Электроника, НТБ, 2003, № 4.

Навигационная аппаратура потребителей спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Каталог. ЗАО «КБ навигационных систем». — М.: 2005.

Вместе с развитием электроники. — Мытищи, 22 ЦНИИ МО, 2005.

Встраиваемые навигационные приемники. — Электроника НТБ, 2004, № 3.

Концепция развития электроники России. — Электроника НТБ, 2006, № 3.

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

2.1. СВЧ-электроника

2.1.1. Электронная СВЧ-техника

С.И. Ребров, доктор технических наук, профессор

В конце 1940-х и начале 1950-х годов отмечается рост внимания разработчиков аппаратуры различного назначения к применению колебаний сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн. СВЧ-колебания применяются для создания пространственного информационного поля сигналов, обеспечивая передачу, прием и первичную обработку информационных сигналов с широкой рабочей полосой, динамическим диапазоном и высокой тактовой частотой.

Накопленный к этому времени опыт использования СВЧ-колебаний для целей радиолокации, а также созданные мощные и маломощные генераторы, кристаллические смесительные диоды и усилители показали высокую эффективность применения этого диапазона длин волн. Велись работы по использованию таких колебаний в интересах навигации, радиорелейных линий связи. После запуска спутников Земли в космос стали особенно очевидными такие преимущества колебаний СВЧ-диапазона, как возможность узконаправленной передачи и приема информации, относительно небольшие затухания на всей протяженности линии связи, возможность использования широких полос частот для передачи информации.

К концу 1960-х годов весь участок СВЧ-диапазона длин волн от 300 МГц до 30 ГГц (по определению American Electronic Laboratories) был полностью распределен для использования в следующих технических средствах (рис. 2.1.1.1 и 2.1.1.2): радионавигации; радиолокации; спутниках Земли; наземных станциях связи со спутниками; международной космической связи; радиоастрономии; метеорологических наблюдениях и исследованиях; радиорелейных линиях связи; радиовысотомерах; системах посадки и контроля за воздушным пространством; системах охраны побережья; для внутригородской связи; мобильной связи; в телевидении.

Аппаратура СВЧ-диапазона намечалась к использованию в стационарных, подвижных наземных, морских, воздушных и космических средствах. Микроволновые технологии и СВЧ-техника, основанная на их использовании, были, есть и остаются критическими базовыми технологиями, являющимися показателями принадлежности страны к высокому уровню технической цивилизации и развития. Продукция этих технологий обеспечивает

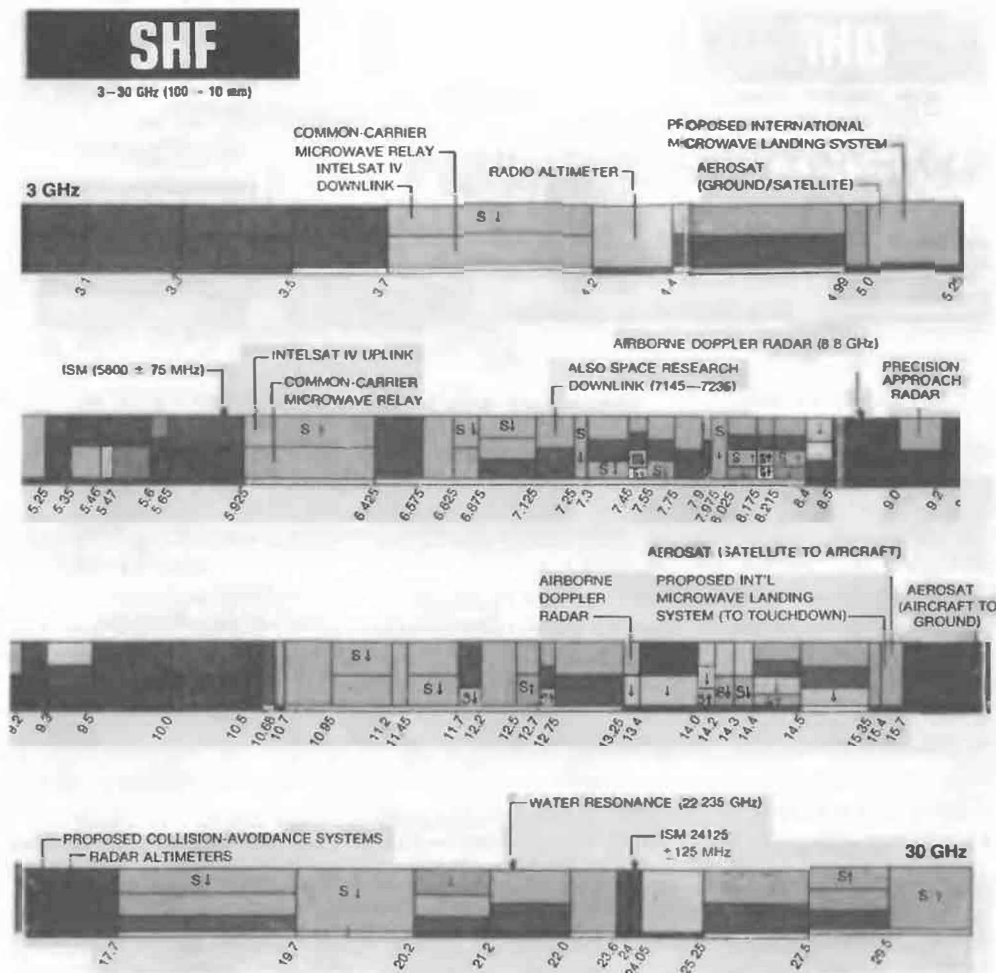


Рис. 2.1.1.2. Распределение частот SHF диапазона 3–30 ГГц

чественной СВЧ-техники от вакуумного триода СВЧ до multifunctional комплексированных устройств и монолитных СВЧ-микросхем на примере головной организации ФГУП «НПП «Исток». Многочисленные направления современной СВЧ-техники базируются на двух крупнейших принципиально различных разделах электроники:

- технике и технологии мощных вакуумных усилителей и генераторов;
- технике и технологии монолитных СВЧ-микросхем.

В дальнейшем остановимся на анализе состояния и динамики отдельных укрупненных технических направлений СВЧ-техники в период с 1950 по 2000 год, использующих эти базовые микроволновые технологии.

ОТ ПРИЁМНО-УСИЛИТЕЛЬНОЙ ЛАМПЫ ДО



K-50



"Анод"

Разработки серии ПУЛ "Анод", отрезательных клистронов и импульсных триодов успешно использовались при создании РЛС конца 40-х годов.

Первый отечественный кинескоп для РЛС и телевизоров КВН (1949г.)

Мощные импульсные магнетроны с быстрой перестройкой частоты 50-80-х годов использовались в мощных защищённых РЛС маломощных самолётных и корабельных ЗРК систем ПВО С 25, С-75 С 125 и др.

Сверхмощные предельно-волноводные магнетроны обеспечивали создание уникальной системы ПВО Москвы и первой системы ПРО страны осуществившей в мире поражение головной межконтинентальной баллистической ракеты в 1962г. Аналогичный результат получен в США почти 20 лет спустя.

Самые первые клистроны серии 30-х годов применялись в мощных передаточных системах связи "Буревестник", "Градиент", ЗРК С 200, С-225, БУК, в аппаратуре траекторного измерения "Воя", самолётных РЛПК "Селена", ЗМ, в космических центрах РФ, Китая, США.

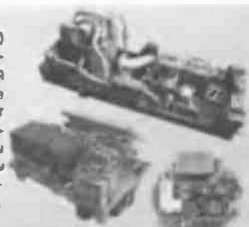
На основе мировых аналогов созданы первые усилители на быстрых волнах, многоканальные клистроны и ЛБВ разработки 70-80-х годов позволили создать многофункциональные системы и комплексы ЗРК "ТОР", С 300, С 300х, С 400, С 400х, РЛС дальнего обзора "Искра", РЛС ближнего обнаружения "Кинжал", "Сарик", АРС для ракет РВВ, АБ и др.

Серии комплексированных изделий СВЧ техники (КИ) на основе мощных ЗВП и твердотельных СВЧ приборов разработки 80-90 годов вызвали качественный скачок в дальнейшем развитии систем и комплексов радиоэлектронного вооружения. КИ представляют собой многофункциональные генераторно-преобразовательные, усилительные устройства и синтезаторы частот для когерентной радиолокации и аппаратуры связи. Обеспечивают высокую надёжность и улучшенные массогабаритные характеристики аппаратуры.

С середины 70-х годов одним из главных направлений развития НПП "Исток" становится твердотельная СВЧ электроника, вначале на основе гибридно-интегральной и затем монокристаллической СВЧ микроэлектроники и мощных СВЧ транзисторов. На основе техники и технологии твердотельной электроники созданы инфракрасные преобразователи, миниатюрные многоканальные приемники СВЧ синтезаторы частот, одно- и многофункциональные модули для радиолокации радиоэлектронного противодействия и аппаратуры связи.

Развитие многофункциональной СВЧ техники основывалось на творческих достижениях созданной в НПП "Исток" научной школы, унифицированных технологических процессах разработанных в фундаментальной комплексной работе "Операция" и развитием машиностроения. За прошедший период машиностроителями предприятия созданы около 1000 типов прецизионных электроникровых и лазерных станков в специальных технологических и радиотехнических установках произведено более 7000 единиц этого уникального оборудования.

По решению ВПК СМ СССР в конце 80-х годов по теме "Союз-Синтез" созданы цифровая многофункциональная БРЛС и АРС, переработанная в 1996-2002 годах в лучшую активную головку самонаведения ракет класса "В-В" в мире.



Мощный транзистор (увеличение 500 000 раз)



АРС С-50



БРЛС "Синтез-10"

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СВЧ ТЕХНИКИ

Рис. 2.1.1.3. Динамика развития отечественной СВЧ-техники

Мощные вакуумные приборы М-типа

Типичные представители семейства отечественных приборов магнетронного типа, использующих скрещенные электрические и магнитные поля, представлены на рис. 2.1.1.4. В начале 1950-х годов в качестве автогенераторов СВЧ-передатчиков РЛС, станций орудийной наводки и бортовых радиолокационных прицелов использовались импульсные магнетроны в 3- и 10-сантиметровом диапазоне длин волн с фиксированной частотой излучения. Отсутствие перестройки частоты являлось серьезным недостатком этого класса приборов, так как в значительной мере ограничивало частотную совместимость радиолокационных средств и их помехозащищенность, что существенно ухудшало тактико-технические характеристики аппаратуры.

Новое поколение РЛС 1950-х годов выставило в качестве обязательного требования наличие быстрой перестройки частоты магнетронных СВЧ-автогенераторов, значительно усложняющего конструкцию и технологию изготовления магнетронов. К этому требованию добавлялись стабильность задержки фронта нарастания СВЧ-колебаний относительно фронта импульса напряжений и устойчивость характеристик к влиянию рассогласованных нагрузок с изменяющейся фазой, в том числе и при изменении частоты генерируемых колебаний. Реализация указанных требований позволила решить принципиальную проблему селекции воздушной движущейся цели на фоне пассивных помех. На этих принципах были построены в 1950-х годах зенитные ракетные комплексы (ЗРК) С-75, С-125 и др. В качестве СВЧ-автогенераторов в передатчиках комплексов использовались мощные импульсные магнетроны (см. рис. 2.1.1.4, 1-я колонка).

Дальнейшее развитие ЗРК в начале 1960-х годов было связано с наращиванием потенциальных характеристик аппаратуры и, в первую очередь, ее дальности действия. Для решения поставленной задачи было необходимо создание принципиально новых магнетронов. Ее решение реализовалось в виде предельно-волноводной конструкции, которая позволила на порядок увеличить пространство взаимодействия СВЧ-поля с электронным пучком в фокусирующей системе магнетрона при сохранении заданных стабильности частоты и спектра несущих колебаний от импульса к импульсу (см. рис. 2.1.1.4, 2-я колонка). Благодаря этой конструкции, не имеющей аналогов за рубежом, излучаемая мощность в импульсе была увеличена до 10 МВт (ЗРК С-25) и 30 МВт для первой системы противоракетной обороны страны. Именно этой системой ПРО была сбита боеголовка межконтинентальной баллистической ракеты в 1962 году. О сложности этого высочайшего достижения говорит тот факт, что в США этот эксперимент был повторен лишь спустя 20 лет. Магнетроны, на базе которых были созданы первые РЛС систем ПРО, по параметрам не имеют себе равных до настоящего времени.

В конце 1950-х годов началась разработка первых отечественных усилителей М-типа — амплитронов, на базе которых была создана РЛС дальнего обнаружения корабельного базирования «Круг» и многоцелевые корабельные РЛС «Фрегат» и «Фрегат МА». Дальнейшее развитие эти работы получили в создании серии амплитронов с широкой (до 10%) полосой усиливаемых частот и высокой средней и импульсной мощностью (см. рис. 2.1.1.4, 3-я колонка). Для аппаратуры связи специального назначения были разра-

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНЕТРОНЫ

СВЕРХМОЩНЫЕ ПРЕДЕЛЬНО- ВОЛНОВДНЫЕ МАГНЕТРОНЫ

МОЩНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ АМПЛИТРОНЫ

Серия мощных импульсных магнетронов с быстрой перестройкой и высокой стабильностью частоты позволила создать помехозащищённые РЛС наземных, самолётных и корабельных ЗРК систем ПВО (системы С-25, С-75, С-125).

Сверхмощные предельно-волноводные магнетроны обеспечили создание уникальной системы ПВО Москвы системы "Круг" и многоцелевой и первой системы ПРОвы страны.

Мощные импульсные амплитроны стали основой РЛС дальнего обнаружения РЛС "Фрегат", Фрегат МА" современных кораблей



ТЕХНИЧЕСКИЕ

Частота, ГГц	1...10	2...3	2...3
P _{вых} (имп.) МВт	0,3...2	10...30	0,06...2
P _{средн} (непр.) Вт	-	-	-
КПД%	30...60	60...60	30...60
U _{кв} кВ	≤ 20	≤ 50	≤ 30
Масса, кг	8...10	≤ 50	≤ 30
Количество типов	40	3	10

АМПЛИТРОНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

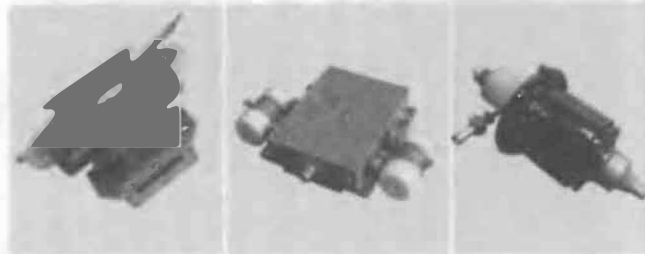
Амплитроны непрерывного действия работают в самолётных и космических системах связи повышенной надёжности (авиационная правительственная связь, проект "Венера-Комета Галлея").

МИНИАТЮРНЫЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ МАГНЕТРОНЫ

Не имеющие аналогов в мире миниатюрные магнетроны обеспечили создание переносных и бортовых систем спутниковой связи (проект "Венера-15" система космического противоракетного мониторинга, радиостанция "Барьер-Т").

МАГНЕТРОНЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Области применения пищевая, химическая, резиновая, деревообрабатывающая промышленности, плазменная металлургия, строительная индустрия, сельское хозяйство: утилизация отходов, в том числе радиоактивных



ХАРАКТЕРИСТИКИ

0...0	2...0	433; 914 2400; 5800 МГц
-	-	-
50...220	5...40	0,5...100 Вт
50...60	50...72	80...90
≤ 3	0,6...1,4	-
≤ 1,5	0,08...0,12	-
6	6	10

Рис. 2.1.1.4. Приборы М-типа

ботаны амплитроны непрерывного действия с выходной мощностью 50–200 Вт в рабочей полосе частот 5–6% (см. рис. 2.1.1.4, 4-я колонка). Для носимых наземных передатчиков спутниковой связи в диапазоне частот 2–6 ГГц были созданы сверхминиатюрные магнетроны, отличающиеся высокими значениями КПД — 60–70% (см. рис. 2.1.1.4, 5-я колонка).

Наконец, в 1970-х годах были заложены научно-технические основы, а затем разработана серия высокоэффективных мощных магнетронов для применения в различных отраслях промышленности и медицинской технике, перекрывающих диапазон мощностей от 200 Вт до 100 кВт в непрерывном режиме и диапазон длин волн от 10 до 70 см. Магнетроны отличаются оригинальной простой конструкцией, обеспечивающей высокую эксплуатационную надежность (см. рис. 2.1.1.4, 6-я колонка).

Мощные вакуумные усилительные клистроны

В 1960–1970-х годах продолжается активное освоение СВЧ-диапазона длин волн. Расширяется фронт работ по использованию свойств этого диапазона для построения многоцелевых РЛС повышенной помехозащищенности наземного, морского и самолетного базирования. Активно разрабатываются станции обнаружения и управления ракетами в системах ЗРК, в интересах ПРО и космических систем.

Усложнение решаемых радиоэлектронным вооружением задач и повышение их функциональных возможностей требуют дальнейшего повышения стабильности частоты от импульса к импульсу до значений 10–100 Гц, применения сложных сигналов и методов их обработки. Реализация таких устройств возможна только с использованием усилительных схем построения передатчиков, когда сигнал необходимой формы формируется на низком уровне, а затем усиливается до величины мощности, необходимой для получения заданного потенциала станции. Для обеспечения когерентности сигналов в режимах приема и передачи выставляются требования низкого уровня амплитудных и фазовых шумов.

Было установлено, что такие требования могут быть выполнены с помощью многорезонаторных усилительных клистронов. Приборы этого вида разрабатываются на малые, средние, большие и сверхбольшие уровни мощности. В 1950-х годах работы по созданию мощных клистронов находились на начальной стадии. Велись исследования по созданию мощных однолучевых многорезонаторных клистронов, отрабатывались конструкция и технология их создания. В период с 1970 по 1980 год была создана целая гамма однолучевых клистронов, работающих в импульсном и непрерывном режимах различного уровня мощности. Были созданы:

- на диапазон частот 6,5–15 МГц клистроны малого и среднего уровня мощности, соответственно 0,02–0,7 кВт и 3–15 кВт;
- на диапазон частот 0,6–9 МГц клистроны мощностью 59–100 кВт;
- на диапазон частот 2–3 ГГц сверхмощные импульсные клистроны мощностью 20–30 МВт.

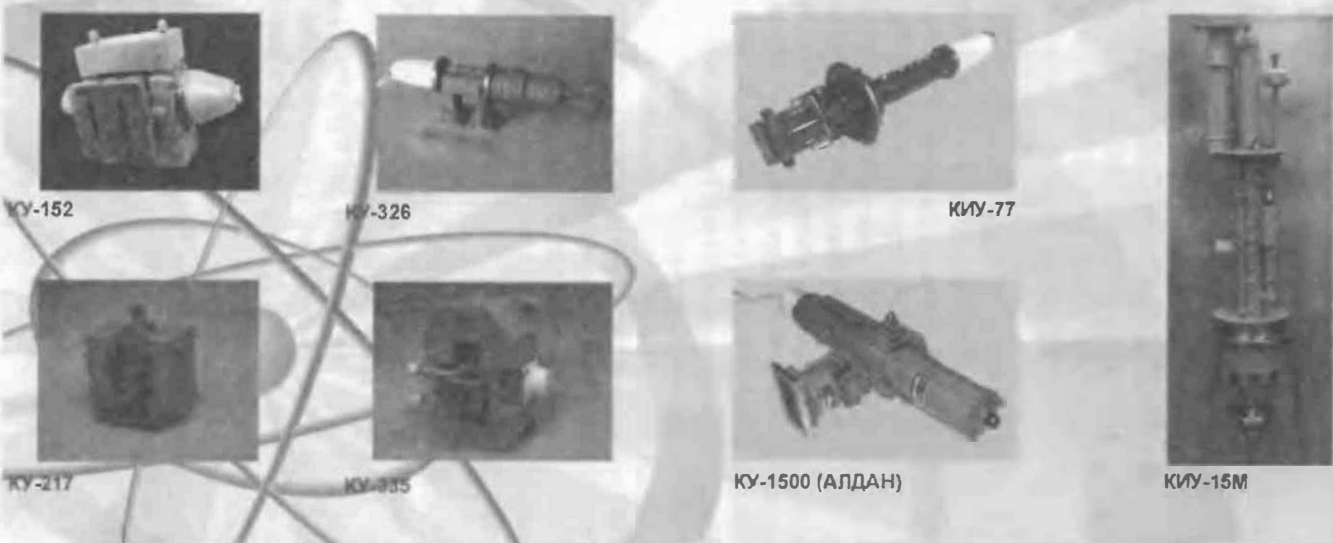
Всего было разработано более 30 типов однолучевых клистронов для систем связи, РЛС обнаружения воздушных целей, ЗРК, бортовых РЛПК истребителей и ускорителей заряженных частиц. Типичные представители однолучевых клистронов и области их применения приведены на рис. 2.1.1.5.

Однолучевые усилительные клистроны характеризуются высокой надежностью и стабильностью выходного сигнала, низким уровнем амплитудных и фазовых шумов. Они находят широкое применение

в различных наземных и бортовых системах военной техники, в телевидении и связи, в ускорительной технике. Разработано 30 типов клистронов

Параметры	Типы		Классы мощности	
	малого уровня мощности	среднего уровня мощности	мощные	сверхмощные
$P_{\text{вых}}, \text{ кВт}$	0,02–0,7	3–15	50–100, 400*	20000–30000*
$\lambda_{\text{св}}, \text{ см}$	40–100	12–50	10–50	30–50
$K_{\text{св}}, \text{ Дб}$	30–40	40–45	45–55	45–55
	20–30	35–40	45–50	45–50

*Импульсный режим



ПРИМЕНЕНЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ "ГОРИЗОНТ", "ГРАДИЕНТ", "ОРБИТА", ЗРК С-200, С-300 "БУК", С-225, В СИСТЕМЕ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ "ВЕГА", САМОЛЕТНЫХ РЛС МИГ-23М, В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЦЕНТРАХ РФ, КНР, США (РАЗОГРЕВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКАХ ТИПА "ТОМОАК"), В УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Рис. 2.1.1.5. Мощные однолучевые клистроны

Характерной особенностью однолучевых клистронов является высокое напряжение катода, достигающее в мощных клистромах сотен киловатт, относительно низкий КПД и значительные массы магнитных фокусирующих систем, что затрудняет их применение в передатчиках подвижной и бортовой радиотехнической аппаратуры. Поэтому в России началось интенсивное развитие оригинального отечественного многолучевого клистрона, не имеющего аналогов за рубежом.

В 1960-х годах были созданы многолучевые клистроны (МЛК), имеющие в 2–3 раза меньшее питающее напряжение и пониженную в 3–4 раза массу прибора при увеличении полосы рабочих частот по сравнению с однолучевыми клистронами в 2–5 раз. Такие клистроны были разработаны на различные уровни выходной импульсной мощности от единиц до сотен киловатт в импульсе в диапазонах частот 6–18 ГГц, величина рабочей полосы частот до 400 МГц. Малогабаритные и средней мощности МЛК работают в постоянных магнитах на основном виде колебаний, число лучей от 7 до 37, отличаются уникальными массогабаритными характеристиками и низким рабочим напряжением. Мощные МЛК работают на основном и высших видах колебаний, число лучей от 6 до 36. В качестве магнитной системы используются как соленоиды, так и постоянные магниты. Всего разработано свыше 80 типов МЛК. В обзоре ведущих специалистов США отмечалось, что именно в России созданы многолучевые клистроны с количеством лучей от 6 до 60, усилением 40–45 дБ и КПД 30–45%, не имеющие аналогов за рубежом.

В системах, где доминирующими требованиями являются как можно меньшие масса и габаритные размеры передатчика и высокое качество усиленного сигнала (сверхмалые шумы, высокая фазовая и частотная стабильность), многолучевые клистроны являются основными источниками мощных СВЧ-колебаний. Многолучевые клистроны используются в передатчиках современных перспективных самолетных, морских и наземных многофункциональных радиоэлектронных системах повышенной помехозащищенности: ЗРК «Тор», С-225, С-300, самолетных системах «Шмель», РЛС бокового обзора «Штык», «Шомпол», РЛС морского базирования «Кинжал», «Кортик», ракете РВВ АЕ и др.

Типичные отечественные многолучевые клистроны, их технические характеристики и области применения приведены на рис. 2.1.1.6.

В 1995–2002 годах специалисты ФГУП «НПП «Исток», основываясь на своем 25-летнем опыте разработок и производства многолучевых СВЧ-приборов, создали новую конструкцию мощного клистрода с фирменным названием «Истрон». Переход к многолучевой конструкции позволил разработать приборы, обладающие определенными преимуществами по сравнению с западными однолучевыми клистродами. В их числе снижение рабочего напряжения, увеличение коэффициента усиления, патентная чистота.

«Истрон» неоднократно демонстрировался на международных и отечественных выставках и прошел испытания в составе передатчиков итальянской фирмы ITELKO и в аппаратуре АООТ «МАРТ» (С.-Петербург). «Истрон» — гибридный тетродный и пролетный клистрон — обладает высокими КПД, амплитудной и фазовой линейностью и выходной мощностью, соответствует самым жестким требованиям применения в современных аналоговых и цифровых телевизионных передатчиках.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ КЛИСТРОНЫ



Многолучевые усилительные клистроны (МЛК) начали широко внедряться в современные системы РЗА с шестидесятих годов 20-го столетия. За эти годы были созданы многолучевые конструкции клистронов на основном и высших видах колебаний, МЛК позволяют уменьшить питающие напряжения в 2-3 раза, массу прибора в 4 раза, увеличить полосу рабочих частот и значительно уменьшить габариты радиопередающих устройств. Благодаря этому они являются основой передатчиков современных перспективных бортовых, морских и наземных

комплексах.

МЛК подразделяются на малогабаритные, средней мощности и мощные.

Малогабаритные и средней мощности МЛК работают в постоянных магнитах, на основном виде колебаний с числом лучей от 7 до 37, отличаются уникальными массогабаритными характеристиками и низким рабочим напряжением.

Для расширения полосы рабочих частот используются 2-х и 3-х зазорные резонаторы и многоконтурная выходная система.

Мощные МЛК работают на основном и высших видах колебаний, число лучей от 6 до 36, в качестве магнитной фокусирующей системы в основном используется соленоид.

Всего разработано 50 типов МЛК.

Параметры	Типы		
	Малогабаритные	Средней мощности	Мощные
Рабочая частота, ГГц	0,5 - 10	0,1 - 1	2 - 10
Выходная импульсная мощность, кВт	0,1 - 1,2	15 - 150	150 - 900
Выходная средняя мощность, кВт	0,05 - 0,5	1 - 5	10 - 17
Полоса рабочих частот, МГц	40 - 200	100 - 400	100 - 350
Коэффициент усиления, дБ	50 - 35	30 - 40	20 - 40
Рабочее напряжение, кВ	1 - 4	12 - 15	22 - 32
Масса, кг	0,4 - 2	5 - 15	15 - 20

КЛИСТРОНЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ



МОЩНЫЕ КЛИСТРОНЫ



ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК "ТОР", С-225, С-300, САМОЛЁТНЫХ СИСТЕМАХ "ШМЕЛЬ", РЛС БОКОВОГО ОБЗОРА "ШТЫК", "ШОМПОЛ", РЛС МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "КИНЖАЛ", "КОРТИК", РАКЕТАХ РВВ 4Е.

Рис. 2.1.1.6. Многолучевые клистроны

Мощные лампы бегущей волны

В начале 1950-х годов в России создается первая отечественная малошумящая ЛБВ в 10-сантиметровом диапазоне длин волн. По чувствительности (коэффициент шума около 10 дБ) эта ЛБВ соответствовала зарубежным аналогам. На ее базе была разработана серия стеклянных малошумящих ЛБВ для оснащения отечественных РЛС, перекрывающая весь сантиметровой и часть дециметрового диапазона длин волн. Для целей радиоразведки и радиопротиводействия в последующем были созданы ЛБВ, перекрывающие весь сантиметровой диапазон длин волн.

Выдающимся достижением и заключительным этапом направления малошумящих ЛБВ стала разработка и создание оригинального отечественного прибора металлокерамической конструкции с ленточным электронным пучком и с фокусировкой электронного пучка однородным магнитным полем. На базе первой лампы с ленточным пучком для РЛС были созданы десятки типов сверхчувствительных (коэффициент шума до 3 дБ) ЛБВ сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Одновременно с развитием малошумящих ЛБВ для связи и радиопротиводействия стали разрабатываться ЛБВ малой и средней мощности. Первые такие ЛБВ были созданы для радиорелейных линий связи. Фокусировка электронного пучка осуществлялась магнитным полем соленоида. Вскоре создаются первые отечественные ЛБВ, пакетированные с магнитной периодической фокусирующей системой на основе феррит-бариевых магнитов. Разрабатывается малошумящая ЛБВ с периодической магнитной фокусировкой, а к началу 1960-х годов — десятки типов пакетированных ЛБВ с уровнями мощности от десятков милливатт до двадцати ватт, охватывающие весь сантиметровой диапазон длин волн.

На границе 1950—1960 годов появляются космические ЛБВ для первых отечественных спутников связи. Благодаря усовершенствованию технологических процессов и оборудования, внедрению машинных методов проектирования стало возможным создание космических ЛБВ для спутников связи последующих поколений. Если первые ЛБВ обеспечивали минимальную нагрузку в 5—10 тыс. ч, то ЛБВ для спутника связи «Горизонт», транслировавшего в 1980 году Олимпийские игры из Москвы на весь мир, обеспечивала не менее, чем трехлетний срок активного существования аппаратуры (около 30 тыс. ч). Современные отечественные космические ЛБВ, работающие в различных участках сантиметрового диапазона с выходной мощностью от единиц до сотен ватт, обеспечивают срок активного существования бортовой аппаратуры ретрансляторов на спутниках связи в десять и более лет.

Развитие техники ламп бегущей волны для РЛС в СССР вплоть до 1980 года по темпам уступало зарубежному, главным образом, из-за конкуренции с успехами в области многолучевого клистроностроения. Однако требования многофункциональности бортовых радиолокационных прицельных комплексов самолетов-истребителей стимулировали разработки в этом актуальном техническом направлении. Используя все достижения технологии клистроностроения, передовые научные коллективы к середине 1980-х годов создали и внедрили в производство образцы ЛБВ, не уступающие лучшим зарубежным аналогам.

Особый интерес представляют многолучевые так называемые «прозрачные» ЛБВ для систем связи и многофункциональных РЛС. Эти приборы обеспечивают широкий набор режимов работы передатчика, вплоть до непрерывного, при меньших в 1,5–2 раза напряжениях питания. На базе «прозрачной» ЛБВ был создан экспериментальный образец передатчика многофункциональной РЛС с общей массой 27 кг при выходной импульсной мощности в режиме обзора 5 кВт (скважность 3) и в режиме подсвета около 1 кВт при длительном непрерывном излучении. Этот тип ламп отличается также очень низким уровнем шума в области доплеровских частот.

Широкое распространение, начиная с 1970-х годов, получили ЛБВ средней мощности для спутников связи. Наибольшее количество разработок в направлении ЛБВ проводилось в области широкополосных ламп, предназначенных главным образом для аппаратуры постановки активных помех. Технология их изготовления и основные параметры близки к зарубежным аналогам.

Космические ЛБВ обладают высоким (до 60%) КПД, большим коэффициентом усиления (40–60 дБ), малыми амплитудными и фазовыми нелинейными искажениями усиливаемого СВЧ-сигнала, малыми габаритами и массой (до 1 кг). Минимальная наработка таких ЛБВ, как правило, превышает 100 тыс. ч.

В последующие годы существенно возрос уровень выходной мощности пакетированных ЛБВ для аппаратуры радиоэлектронной борьбы. Разработаны широкополосные (до октавы) ЛБВ с мощностью до 500 и даже 1000 Вт на различных участках сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.

В середине 1960-х годов были созданы первые отечественные мощные ЛБВ 3- и 4-сантиметрового диапазонов длин волн на замедляющих системах типа цепочки связанных резонаторов с выходной мощностью 1–2 кВт в непрерывном режиме. ЛБВ предназначались для наземных базовых станций спутниковой связи, тропосферной связи, наземных и морских станций широкополосных помех с полосой частот 18%.

Следующий этап развития мощных ЛБВ — создание пакетированных ламп с высоким КПД, выдерживающих жесткие механические и климатические воздействия, для помехозащищенной высокостабильной аппаратуры связи. Первая отечественная пакетированная ЛБВ 5-сантиметрового диапазона с мощностью 1,5 кВт, КПД 25% стала основой серии ламп 7-, 3- и 1-сантиметрового диапазонов с шириной полосы рабочих частот 500 МГц, долговечностью до 3 тыс. ч. Особенностью этих приборов является их унификация по параметрам питания, что значительно облегчило разработку современной аппаратуры спутниковой и тропосферной связи.

Значительные успехи достигнуты в области создания мощных многорежимных усилителей для бортовых РЛС на базе цепочек ЛБВ с выходной многолучевой «прозрачной» ЛБВ, позволяющих обеспечивать перепад мощностей 5–10 дБ при переходе из режима поиска в режим подсвета. Такие цепочки имеют существенно более низкие рабочие напряжения, более высокий промышленный КПД и более широкую полосу рабочих частот по сравнению с другими типами многорежимных СВЧ-усилителей. Одним из преимуществ такого построения СВЧ-передатчика является отсутствие не-

обходимости подстройки напряжения и входной мощности при всех режимах его работы. В диапазоне рабочих частот 3 и 2 см получен уровень выходной импульсной мощности 30 кВт при средней мощности 1–2 кВт, усиление более 50 дБ, КПД 35–40% и полоса рабочих частот 7–10%.

Типичные образцы отечественных ЛБВ различных классов показаны на рис. 2.1.1.7. Там же приведены их основные характеристики и применяемость в отечественной радиоаппаратуре.

Приборы СВЧ малой мощности

Вакуумные генераторы СВЧ малой мощности используются в качестве гетеродинов и задающих генераторов в бортовых, наземных радиоустройствах. В 1950-х годах наиболее распространенными маломощными приборами СВЧ были отражательные клистроны и лампы обратной волны. Отличительной особенностью этого вида приборов является наличие у них электронной перестройки частоты колебаний, что позволяло в аппаратуре простым способом обеспечивать быструю автоматическую подстройку частоты колебаний путем изменения питающего напряжения. В 1950–1975 годах была создана и выпускалась промышленностью широкая номенклатура таких вакуумных приборов. Приборы работали в диапазоне частот 3–14 ГГц, имели мощность от десятков до сотен милливатт. Диапазон электронной перестройки частоты был в пределах 8–10%. Лампы обратной волны работали как в сантиметровом диапазоне, так и миллиметровом. Диапазон электронной перестройки частоты ЛОВ достигал 40%.

Вакуумные генераторы СВЧ малой мощности используются в устройствах радиолокации, радиоразведки, радиомаяках, радиовзрывателях, системах связи и телевидения, измерительной и медицинской аппаратуре. Было разработано более 200 типов приборов, которые применялись более чем в 65 видах аппаратуры. Типичные представители этого класса приборов показаны на рис. 2.1.1.8.

В 1970-х годах начинается постепенная замена маломощных вакуумных генераторов СВЧ твердотельными. В отличие от вакуумных генераторов, для нормальной работы которых были необходимы напряжения питания в несколько сотен вольт, твердотельные генераторы работают в диапазоне напряжений единицы-десятки вольт. Для их работы не требуется отдельный источник питания катода прибора.

Твердотельные генераторы малой мощности разрабатываются для бортовой и наземной аппаратуры военного и гражданского назначения. В качестве активных элементов в них используются диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды и, главным образом, биполярные и полевые транзисторы. Создаются в виде завершенной конструкции генераторы с электрической перестройкой частоты, стабилизированные по частоте, многочастотные модули, генераторы с фазовой автоматической подстройкой частоты. На основе биполярных и полевых транзисторов со стабилизацией диэлектрическими резонаторами разрабатываются генераторы с низким уровнем частотных шумов в доплеровском диапазоне частот. Разработаны генераторы с широким диапазоном электрической перестройки частоты в пределах 10–67% на основе биполярных транзисторов и варакторных диодов.

Мощные ЛБВ на цепочке связанных резонаторов (ЦСР) - широкополосные вакуумные приборы СВЧ с уровнем мощности до нескольких десятков киловатт применяемые в системах радиопротиводействия (РПД) дальней, тропосферной и космической связи, многоцелевой радиолокации, ракетно-зенитных комплексах.



ЛБВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ



САМОЛЕТНАЯ ЛБВ



ЛБВ ДЛЯ РПД

В России разрабатываются и выпускаются для систем РПД мощные ЛБВ непрерывного действия с мощностью более 1 кВт в 20% рабочей полосе в 3-х см диапазоне длин волн; серию мощных пакетированных приборов для систем дальней, космической и тропосферной связи. Применение в ЛБВ 3С типа "встречные штыри" и унифицированной магнитной системы позволило уменьшить массу приборов в 2,5 раза. Для связанных систем работающих в широком диапазоне частот (до 10% в режиме одновремениого усиления) большого числа сигналов разработана спиральная ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью 1,2 кВт.

Создано новое направление многолучевые "прозрачные" ЛБВ. Это позволило реализовать многорежимность передающих систем по выходной мощности. Разработан ряд цепочек приборов, состоящих из предварительной ЛБВ и выходной "прозрачной" ЛБВ обеспечивающих регулировку мощности от сотен ватт до нескольких десятков киловатт, высокий КПД и широкую полосу при сравнительно низких питающих напряжениях. Созданы импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона с выходной мощностью 20 Вт в диапазоне 3 мм и 2 кВт в диапазоне 3 см.

Для самолётной РЛС разработана серия ЛБВ с низковольтным сеточным управлением, многоступенчатыми коллекторами и коэффициентом усиления до 60 дБ.

Всего разработано 4 типа ЛБВ.

Параметры	ЛБВ непрерывного действия	Импульсные ЛБВ	Спиральная ЛБВ непрерывного действия	Многолучевые "прозрачные" ЛБВ	ЛБВ миллиметрового диапазона
Рабочий диапазон, ГГц	4 - 14,5	8-17	5,5-8,5	8-14,5	27-94
Выходная мощность, кВт	1,5-2		1,2		0,15-0,02
Выходная импульсная мощность, кВт		0,3-10		5-30	2-0,02
Полоса рабочих частот, %	0,5-20	10	40	10	6-0,6
Коэффициент усиления, дБ	до 40	40-60	40	10-13	30-40
КПД, %	27	26-33	30	30-33	10
Рабочие напряжения, кВ	10-11	8-30	11-12	8-25	25-18
Минимальное напряжение, кВ		3-10		10-15	10-12

• для "прозрачной" ЛБВ



СПИРАЛЬНАЯ ЛБВ



МИЛЛИМЕТРОВАЯ ЛБВ НА 34 ГГц



МНОГОЛУЧЕВЫЕ "ПРОЗРАЧНЫЕ" ЛБВ



МИЛЛИМЕТРОВАЯ ЛБВ НА 93 ГГц

ПРИМЕНЕНЫ В СИСТЕМАХ ТРОПОСФЕРНОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ "ЛИВЕНЬ" СИСТЕМАХ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ, ЗЕНИТНО-РАКЕТНОМ КОМПЛЕКСЕ "ПАНИЦЬ", СИСТЕМЕ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "БОЛИД".

Рис. 2.1.1.7. Мощные лампы будущей волны

1950-1975 годы - период широкого использования СВЧ вакуумных генераторов малой мощности. Разработано свыше 200 типов изделий, применяемых более чем в 65 системах бортовой и наземной аппаратуры.

КЛИСТРОНЫ

Основные параметры	f ГГц	Уре В	Рвых мВт	$\Delta f/f$ электр.	$\Delta f/f$ механ.
Отражательные с электронной перестройкой частоты	3-6	200-300	60-100	8-10	
Отражательные с механической перестройкой частоты	3-14	300-400	60-100	0,4-0,6	4-60
Отражательные с повышенной выходной мощностью	4-9	750-850	500-1500	0,5-0,8	2,5-3
Пролётные	4-10	300-700	120-500		10

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ КЛИСТРОН "К-30"
Уникален высокой надёжностью и практически неограниченным числом (миллионы) быстрых (<1 с) механических перестроек частоты

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ КЛИСТРОН "КГ-22"
Не имел аналогов по уровню частотных шумов (<130 дБ/Гц на 5 кГц).
Повышенная мощность (0,6Вт)

ПРОЛЁТНЫЙ КЛИСТРОН "К-140"
Сочетал низкое напряжение резонатора (300В) с высоким значением частоты (10%), низким уровнем частотных шумов (120 дБ/Гц на 5 кГц) и кратковременной мощностью <10*

ВАКУУМНЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НАШЛИ СВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В СЛЕДУЮЩИХ СИСТЕМАХ: "ТОПОЛЬ-2", "КЛАБ", "ДВИНА-А", "ТРОСТНИК", "РЕЗЕДА-Б", "ШМЕЛЬ", "КУРС", "ФИЛИН", "ТАНГЕНС", "НЕЗАБУДКА" С-300 и т.д.

ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

Основные параметры	f ГГц	$T_{\text{эф}}$ с	Рвых мВт	Упит кВ
СМ и ДМ диапазон Малитная фокусировка	0,1-20	5-30	20-50	0,2-2
СМ и ДМ диапазон Периодическая электростатическая фокусировка	1-40	30-40	50-1000	0,1-0,8
ММ диапазон Пакетированные	35-260	15-80	6-40	0,4-1,9
С-Б ММ диапазон Непакетированные	25-1400	15-60	0,5-10	1-6



СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ НЕПАКЕТИРОВАННАЯ "ЛОВ" "ОВ-85"
Диапазон рабочих частот 1176 - 1400 ГГц
Выходная мощность 0,5 - 2 мВт
Рабочее напряжение 1,5 - 6 кВ
Фокусирующее магнитное поле 11000Г

ПАКЕТИРОВАННАЯ ЛОВ "ОВ-86" С МИНИАТЮРНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Диапазон рабочих частот: 118 - 177 ГГц
Выходная мощность: 6 - 20 мВт
Рабочее напряжение: 500 - 1500 В
Общая масса: <1кг

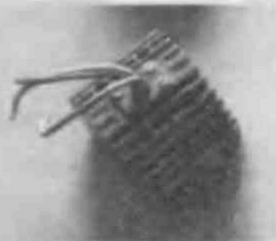


Рис. 2.1.1.8. Вакуумные генераторы малой мощности

В 70-х годах начались разработки твердотельных генераторов малой мощности для бортовой и наземной аппаратуры военного и гражданского назначения. Работано более 120 типов изделий, применяемых более чем в 30 системах РЭА

Генераторы с электрической перестройкой частоты

Основные параметры	F ГГц	$\Delta F/F$, %	S МГц/В	P _{вых} , мВт
На биполярных и полевых транзисторах	0,1 - 14	10 - 67	5 - 500	10 - 300
На диодах Ганна и ЛПД	8 - 110	10 - 40	50 - 900	3 - 100

Генераторы, стабилизированные по частоте

Основные параметры	F ГГц	ΔF , отн. ед.	γ_f на 10 кГц, дБ/Гц	P _{вых} , мВт
На биполярных и полевых транзисторах с диэлектрическими резонаторами	1 - 18	4×10^{-4}	(85 - 118)	10 - 130
Кварцевые генераторы	0,05 - 0,4	5×10^{-6}	(150 - 160)	10 - 500
На леукоалфавиновых резонаторах	7 - 10	5×10^{-6}	-140	10 - 50

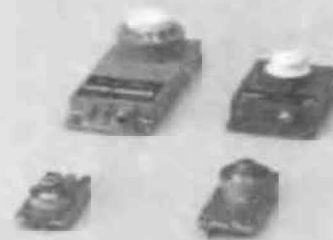
Многочастотные модули

Основные параметры	F, ГГц	$\Delta F/F$, %	ΔF , отн. ед.	γ_f на 10 кГц, дБ/Гц	T _{пер.} , мкс	P _{вых} , мВт
Многогенераторные модули с быстрой перестройкой частоты	3 - 18	3 - 30	$2,5 \times 10^{-4}$	(95 - 115)	1 - 3	5 - 50
Генераторы с ФАПЧ	1 - 12	1×10^{-2} - 1×10^{-3}	1×10^{-4} - 1×10^{-5}	(90 - 110)	-	10 - 300
Синтезаторы частот	1 - 18	1 - 10	1×10^{-4} - 1×10^{-5}	(75 - 110)	100 - 1000	10 - 100

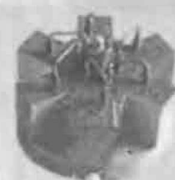
Твердотельные СВЧ генераторы малой мощности широко используются в системах: «Ренегат-М», «Зоопарк», «Кредо», «Висение», «Челнок», «Гладиолус», «Шмель», «Энергия-Буря», «Москит», «Олимп»



Генераторы с широким диапазоном электрической перестройкой частоты на основе биполярных транзисторов и варакторных диодов со сверхрезким переходом



Параметрический ряд высокостабильных СВЧ генераторов на биполярных и полевых транзисторах со стабилизацией частоты диэлектрическими резонаторами, отличающихся низким уровнем частотных шумов (γ_f) в доплеровском диапазоне частот



Быстро переключаемые генераторные модули на 4, 6, 8 и более значений фиксированных частот

Рис. 2.1.1.9. Твердотельные генераторы малой мощности

К 1990 годам было разработано свыше 120 типов твердотельных генераторов, которые нашли применение более чем в 30 системах радиоэлектронной аппаратуры. Твердотельные генераторы работали в диапазоне частот от 0,1 до 110 ГГц при выходной мощности от 3 до 300 мВт. Типичные представители этого класса приборов показаны на рис. 2.1.1.9.

На основе клистронов, полупроводниковых диодов и транзисторов СВЧ было разработано более 30 типов приборов, предназначенных для использования в качестве малошумящих задающих генераторов с выходной мощностью 0,1–1 Вт в передатчиках когерентных доплеровских РЛС в диапазоне 6–15 ГГц.

Применение таких генераторов обеспечило:

- возможность обнаружения целей на малых углах над горизонтом;
- повышенную помехозащищенность от активных помех и мешающих отражений от местных предметов;
- высокую разрешающую способность при когерентной обработке сигнала;
- возможность электрического переключения рабочих частот.

Типичные представители этого класса приборов и области их применения в аппаратуре показаны на рис. 2.1.1.10.

С развитием полупроводниковой технологии начались разработки твердотельных СВЧ-приборов различного функционального назначения. Так, были разработаны монолитные и гибридно-монолитные СВЧ-микросхемы для генерирования, усиления, преобразования сигнала, умножения и деления частоты. Созданные приборы работали в участках диапазона от 1 до 18 ГГц. В общей сложности было разработано более 75 типов схем СВЧ.

В конце 1970-х годов в маломощных генераторах и усилителях различного назначения (приемные устройства радиотехнических и связных средств, измерительная аппаратура и др.) вакуумные приборы СВЧ были полностью заменены на твердотельные полупроводниковые приборы. Эта замена позволила на порядок повысить надежность устройств СВЧ и существенно сократить величину питающих напряжений, повысив КПД устройств, при значительном улучшении массогабаритных характеристик.

Комплексированные изделия СВЧ-техники¹

Постоянное усложнение задач, решаемых современными средствами локации, навигации, управления и связи, требует создания все более сложных по своей структуре СВЧ-сигналов. Их формирование и первичная обработка осуществляются СВЧ-частью приемопередатчика. Она состоит из цепочек (комплексов) СВЧ-приборов, соединенных между собой различными регулирующими и развязывающими пассивными СВЧ-элементами. В зависимости от степени сложности сигнала в состав цепочек могут входить СВЧ-приборы, способные генерировать, преобразовывать, модулировать, усиливать как излучаемый, так и гетеродинный СВЧ-сигналы.

¹При написании этой части статьи был использован материал, подготовленный Э.А. Гельвичем



КЛИСТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМБИНИРОВАННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ (ВЫСОКОДОБРОТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ) И ТРАНЗИСТРОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



ГЕНЕРАТОР НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ



СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ НА ТРАНЗИСТОРАХ ТЕХНОЛОГИИ ГИС

ПРИМЕНЯЮТСЯ В КАЧЕСТВЕ ЗАДАЮЩИХ

За время развития направления малошумящих высокостабильных задающих генераторов произошло существенное улучшение всех технических параметров приборов качественно изменились их элементная база и технология изготовления принципиально электрические схемы и конструкции электродинамических систем, освоены новые диапазоны частот. Создано 30 типов промышленных СВЧ генераторов нового поколения на базе клистронов, полупроводниковых СВЧ диодов и транзисторов, многорезонаторных и микрополосковых электродинамических систем с высокодобротными стабилизирующими резонаторами различных типов.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ.

• Применение сильносвязанных многоконтурных колебательных систем.

• Стабилизация частоты.

• Интеграция компонентов и управляющих полупроводниковых элементов.

• Комбинированная параметрическая и электрическая (системой ФАПЧ) стабилизация частоты.

• Компенсация частотных шумов в режиме двойного использования высокодобротного резонатора с целью стабилизации частоты деления шумного сигнала.

• Использование высокостабильных частот с использованием кварцевого генератора.



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ

ГЕНЕРАТОРОВ В ПЕРЕДАТЧИКАХ КОГЕРЕНТНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ РЛС

	Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Стабиль- ность частоты	Полоса рабочих частот	Уровень шумов, дБГц	Уровень импуль- сных шумов, дБГц	Питание, В
Клистронные генераторы	5-15	0,3-1	$10^4 - 10^6$	0,5-1	-100(-140)	-140(-150)	1000-5000
Полупроводниковые генераторы	2-15	0,03-0,1	$10^4 - 10^5$	0,1-1,0	-100(-130)	-130(-140)	15-60

Представленные в таблице значения электрических параметров могут быть получены на любой из частот указанного диапазона в соответствии с требованиями конкретного применения и обеспечиваются выбором типа генератора и особенностями его построения.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ МАЛОШУМЯЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- возможность радиолокации при малых углах цели над горизонтом;
- помехоустойчивость от активных помех и «блуждающих отражений» от поверхности Земли;
- высокую разрешающую способность при когерентном построении передатчика;
- возможность электрического переключения рабочих частот.



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМБИНИРОВАННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И ТРАНЗИСТРОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ПО ТЕХНОЛОГИИ ГИС



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ (ДИСКРЕТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ) СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ЧАСТОТЫ



ТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЧАСТОТНЫХ ШУМОВ

ПРИМЕНЯЮТСЯ В ЗЕНИТНО-РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСАХ С 200Д, С-300П, С300ВМ, С-300В, С-400, «ТОР», БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ С-23, С-23МЛ, СИСТЕМАХ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ «КИНЖАЛ», «ПОЛИМЕНТ-РЕДУТ».

Традиционно, до 1970-х годов, устройства СВЧ, входящие в состав этих цепочек, поставлялись потребителю в виде отдельных приборов. Для обеспечения нормальной работы аппаратуры параметры СВЧ-приборов в составе цепочки должны быть взаимно согласованы. Так как значения параметров приборов каждого типа имеют естественный (по нормальному закону) разброс, то для обеспечения взаимозаменяемости приборов при их эксплуатации это согласование должно было проводиться по типовым характеристикам приборов. При этом мог не обеспечиваться оптимальный режим работы для каждого отдельного экземпляра прибора. Кроме того, типовое согласование требовало больших запасов по сопрягаемым параметрам СВЧ-приборов и регулирующих устройств, обеспечивающих надежную стыковку приборов цепочки. Большие запасы приводили к значительному росту массы и габаритов как СВЧ-приборов, так и аппаратуры. Для получения наиболее высоких характеристик радиоэлектронной системы (РЭС) нередко требовалось при производстве аппаратуры проводить работы по оптимальному, а не типовому сопряжению СВЧ-приборов, входящих в цепочку. Иногда настройку СВЧ-тракта приходилось проводить практически при каждой смене СВЧ-прибора в эксплуатационных условиях.

Эти особенности применения сложных цепочек СВЧ-приборов очень усложняли их использование и сдерживали развитие современных и перспективных приемопередающих радиотехнических устройств, особенно тех, которые должны были обеспечить, начиная со второй половины XX века, высокие тактико-технические характеристики многофункциональных и особенно бортовых РЭС.

Решение этой проблемы в значительной степени было обеспечено разработкой и производством отечественной электронной промышленностью комплексированных изделий (КИ), созданных в начале 1970-х годов в НПО «Исток». Комплексированное изделие представляет собой взаимозаменяемое компактное устройство, состоящее из двух или более активных электронных приборов СВЧ и пассивных СВЧ-элементов, функционально и конструктивно связанных между собой. Настройка КИ производится специалистами в условиях завода-изготовителя СВЧ-приборов. СВЧ-приборы в КИ сопрягаются не по типовым, а по индивидуальным характеристикам, т.е. подбор приборов производится селективно по их функционально связанным параметрам. Индивидуальное сопряжение и селективный подбор приборов в условиях производства позволяют значительно уменьшить величину необходимых запасов по сопрягаемым параметрам приборов, в том числе и за счет уменьшения деградации параметров, вносимой трактом и регулирующим устройством, необходимым в аппаратуре при сопряжении приборов по их типовым характеристикам. В результате функциональной интеграции появляется возможность использования управляющей обратной связи внутри КИ, что позволяет компенсировать влияние внешних дестабилизирующих факторов в широких пределах, сохраняя значения выходных параметров устройства вблизи их номинальных значений. В частности, как правило, удается существенно расширить допуск на нестабильность питающих напряжений, исключив необходимость их стабилизации.

Особенности функциональных связей в КИ СВЧ позволяют влиять на характеристики входящих в них СВЧ-приборов и пассивных СВЧ-элементов.

тов. В частности, достигается значительное уменьшение массы и габаритов благодаря сокращению запасов по параметрам СВЧ-приборов и резкому уменьшению необходимой амплитуды регулировки управляющих устройств или их исключению.

Такой принцип построения КИ СВЧ позволил:

- резко уменьшить массогабаритные характеристики СВЧ бортовых передатчиков;
- реализовать в одном устройстве функции: генерацию, усиление, переключение, умножение, преобразование формируемых сигналов и их фильтрацию;
- оптимизировать режимы работы входящих в КИ приборов и получить наилучшие показатели по выходным параметрам, в частности, минимальные уровни шумов и искажений;
- повысить эксплуатационную надежность;
- снизить требования к стабильности первичных источников питания в передатчике;
- исключить необходимость регулировки приборов КИ в условиях эксплуатации.

Перечисленные положительные свойства стали возможными благодаря селективному согласованию в КИ СВЧ-параметров функционально связанных между собою СВЧ-приборов.

Вначале комплексированные изделия строились на основе только электровакуумных приборов СВЧ. В дальнейшем, с развитием полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ-приборов, а также гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллической технологий, задающая часть КИ стала формироваться на основе твердотельных приборов, включая: генераторы и синтезаторы частот, твердотельные промежуточные усилители, умножители частоты, смесители и преобразователи частоты, фильтры широкого назначения, регуляторы и оптимизаторы выходной мощности, переключатели рабочих частот и управляющих сигналов, устройства индикации параметров и защиты узлов от перегрузок и др.

Широкополосное усилительное КИ, как правило, состоит из предварительного полупроводникового усилителя, возбуждающего мощный выходной вакуумный прибор, обычно многолучевой клистрон, или предвыходную ЛБВ.

Отличительной чертой мощных КИ СВЧ (МКИ СВЧ) является наличие в его составе одного или нескольких мощных электровакуумных приборов и предварительной (задающей) СВЧ-части. Так, одно из созданных МКИ СВЧ для бортового радиолокатора самолета выполняло функции мощного маломощного двухчастотного усилителя импульсного сигнала. Выходная мощность МКИ, работающего в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн, составляла 100 кВт в импульсе при скважности 300 и коэффициенте усиления более 60 дБ в полосе частот 1%. В качестве предварительных усилителей были применены узкополосные усилительные клистроны (что обеспечивало хорошую фильтрацию сигнала) и на выходе — мощный широкополосный усилительный МЛК с рабочим напряжением ≤ 20 кВ. Это бортовое МКИ отличалось компактностью конструкции и малой массой (8 кг). Эквивалентная СВЧ-часть передатчика, сконструирован-

ного по традиционному принципу, имела массу около 40 кг и занимала большой, почти на порядок, объем. В дополнение к экономии по массогабаритным характеристикам МКИ позволяло в два раза увеличить число рабочих частот радиолокатора.

Другим примером широкополосного МКИ является изделие с полосой усиления 6%, в котором в качестве предварительного усилителя применялись лампа бегущей волны и полупроводниковые оптимизаторы входной мощности мощного выходного усилителя на многолучевых клистронах.

Положительные свойства КИ:

- широкая мгновенная полоса усиливаемых частот (6%), позволяющая решить задачу частотного электронного сканирования луча по углу места в течение одного импульса;
- высокий уровень импульсной мощности (до 75 кВт) и средней выходной мощности (более 1,5 кВт), позволивший решить задачу обнаружения целей с малой эффективной поверхностью рассеивания;
- низкий уровень вносимых фазовых и амплитудных шумов, дающий возможность решить задачу обнаружения низколетящих целей;
- низкое напряжение анода мощного выходного усилителя (15 кВ) и способность работы при значительных изменениях питающих напряжений ($\pm 5\%$), что позволило исключить крупногабаритный стабилизатор напряжения из состава передатчика.

Отсутствие необходимости стабилизировать напряжения мощного источника питания, уникальные массогабаритные (вес 20 кг) и электрические параметры МКИ позволили создать многоцелевой высокопотенциальный мобильный радиолокатор обнаружения ПВО ЗРК «Тор» с электрическим сканированием луча в пространстве.

Спектр функциональных возможностей современных КИ, включающих как вакуумные, так и полупроводниковые приборы различных типов, чрезвычайно широк. Он определяется гибкой структурой КИ, соответствующей содержанию конкретных задач, решаемых прибором. К основным возможностям функциям, выполняемым КИ, следует отнести: генерирование опорного сигнала, преобразование частот, сдвиг и умножение частот, формирование излучаемого и гетеродинных сигналов, их амплитудную и (или) фазовую модуляцию, усиление сформированных сигналов до заданного уровня мощности. Компактные размеры КИ позволяют эффективно их использовать в малогабаритных бортовых системах.

Характерным представителем этого направления является КИ 2-сантиметрового диапазона длин волн. Изделие состоит из двух основных частей: твердотельного возбуждателя, изготовленного по гибридно-интегральной и гибридно-монолитной технологиям, и выходного усилителя мощности на миниатюрном МЛК. КИ обеспечивает выходную импульсную мощность более 400 Вт (средняя мощность 150 Вт) при КПД 25–30% (без учета ВИП). Нестабильность частоты излучаемого сигнала менее 2×10^{-4} при уровне частотных шумов на частоте анализа 5 кГц не более 90 дБ/Гц и вносимых амплитудных и фазовых шумов –125 дБ/Гц на частотах анализа 5–500 кГц. Параметры КИ сохраняются в интервале температур от –50 до 70°C. Масса КИ $\leq 1,7$ кг (без ВИП).

В общей сложности отечественной электронной промышленностью было создано более 30 типов КИ, которые работают в участках диапазона частот от 7 до 30 ГГц, с полосой рабочих частот до 6%, с низким уровнем фазовых и частотных шумов.

Ниже в историческом плане рассматривается динамика развития принципов построения КИ СВЧ на конкретных разработках радиоэлектронной аппаратуры. Впервые к активному использованию принципов построения изделий СВЧ обратились в начале 1970-х годов, когда перед разработчиками авиационных радиолокационных прицельных комплексов (РЛПК) была поставлена задача обнаружения и поражения скоростной малозаметной цели на фоне земли. Ее решение осложнялось наличием сигнала, отражаемого земной поверхностью, величина которого на много порядков превышала сигнал от цели. Характеристики ранее созданных РЛПК с использованием передатчиков на мощных магнетронных СВЧ-автогенераторах не позволяли применить принцип селекции движущихся целей в связи со слишком большой нестабильностью частоты от импульса к импульсу. Необходимо было использовать усилительные цепочки с высокостабильным маломощным задающим генератором, в выходных каскадах которых использовались мощные усилители-клистроны или ЛБВ.

Головная организация НПО «Фазотрон» по созданию РЛПК для разрабатываемого истребителя МиГ-23 вместе со специалистами НПП «Исток» выбрали передатчик СВЧ, построенный на трехкаскадной клистронной цепочке. Совместными усилиями его удалось разместить в требуемых габаритных размерах. Такой трехкаскадный СВЧ-передатчик полностью соответствовал техническому заданию. Облеты подтвердили эффективность выбранного решения по выполнению требований по дальности обнаружения и сопровождения целей на фоне земли. Однако при этом возникла неучтенная проблема радиосовместимости групповых действий истребителей в заданном квадрате.

СВЧ-передатчик на клистромах излучал мощный сигнал только на одной несущей частоте, и заданные боевые совместные действия группы из четырех истребителей были невозможны из-за взаимных помех при работе по целям на фоне земли. Размещение четырех усилительных цепочек с тремя дискретными клистронами и соединяющей их между собой волноводной аппаратуры было физически невозможно в заданных размерах отсека самолета. Специалистами НПП «Исток» было предложено неординарное решение: используя возможности электронных технологий, разработать на базе НПП «Исток» комплексированное изделие «Альтернатива» в виде единого двухчастотного моноблока из трех клистронов и элементов их соединений, поставляемых по кооперации из НПО «Фазотрон». Предложенная миниатюризация СВЧ-передатчика позволила разместить в пределах тех же массогабаритных параметров РЛПК два моноблока «Альтернатива» и полностью удовлетворить всем тактико-техническим требованиям на истребитель МиГ-23МЛ. Серийные поставки моноблока были начаты заводом НПП «Исток» в 1975 году и до 1980 года совместно с заводом «Генератор» (г. Киев) было поставлено на комплектацию и эксплуатацию самолетов более 5000 изделий. Так было создано первое комплексированное изделие СВЧ-техники (КИ СВЧ).

Решение по созданию комплексированных устройств для бортовых РЛПК было настолько удачным, что все дальнейшие разработки 1970-х и 1980-х годов были сделаны по этому принципу. Так, в 1975 году в аварийном порядке было принято решение перепроектировать когерентный СВЧ-передатчик радиолокационной системы «Заслон» для истребителя-перехватчика МиГ-31 с переводом его с дискретных цепочек на два СВЧ-модуля: «Азов» — для станции обзора и «Верша» — для станции подсвета цели. Все работы были выполнены совместно с НИИП им. В.В. Тихомирова (г. Жуковский) в установленные сроки, и создана самолетная РЛС с пассивной фазированной антенной решеткой, что дало возможность впервые в мире поражать одновременно четыре цели ракетами с полуактивным наведением.

На рис. 2.1.1.11 показаны типичные представители комплексированных изделий на основе вакуумных СВЧ-приборов для бортовой наземной и воздушной аппаратуры.

Развитие полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ-приборов и полосковой гибридно-интегральной и монокристаллической технологий привело к дальнейшей миниатюризации КИ СВЧ с одновременным расширением их функциональных возможностей. В состав КИ СВЧ на основе вакуумных приборов дополнительно вошли: полупроводниковые умножители частоты, смесители и преобразователи частоты, фильтры широкого назначения, регуляторы и оптимизаторы выходной мощности, переключатели рабочих частот управляющих сигналов, устройства индикации параметров и защиты узлов от перегрузок и др.

КИ СВЧ выполняют функции генерации, переключения, умножения, преобразования, фильтрации, усиления, оптимизации, защиты. В результате в 3–5 раз увеличена средняя наработка КИ СВЧ, а также значительно снижено количество регламентных работ при эксплуатации СВЧ-части передатчиков РЛС. На рис. 2.1.1.12 приведены типичные представители многофункциональных комплексированных изделий на основе мощных вакуумных и твердотельных приборов СВЧ, их характеристики и области применения.

Твердотельная СВЧ-электроника и устройства на ее основе

Несмотря на продолжающееся развитие традиционных и новых направлений вакуумной СВЧ-электроники создание перспективной радиоэлектронной аппаратуры базируется, главным образом, на достижениях твердотельной СВЧ-техники и, в частности, на твердотельных многофункциональных модулях и широком использовании монокристаллических СВЧ-микросхем.

С развитием полупроводниковой технологии на предприятиях электронной промышленности стали внедряться принципы и технологии, присущие радиоэлектронным отраслям. Такое положение было обусловлено физической общностью процессов изготовления полупроводниковых приборов СВЧ и их монтажа в аппаратуре. Стали реальными разработка и изготовление на предприятиях электронной промышленности на основе полосковой гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллической технологий сложных мно-



МОЩНОЕ УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



МАЛОГАБАРИТНОЕ УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЕ МАЛОШУМЯЩЕЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ

Созданное в НПП "Исток" в 70-х годах в электровакуумной промышленности новое оригинальное направление комплексированных изделий СВЧ (КИ СВЧ) позволило:

- резко уменьшить массогабаритные характеристики СВЧ части бортовых передатчиков;
- одновременно значительно увеличить число выполняемых функций;
- генерацию, усиление, переключение, преобразование формируемых сигналов;
- оптимизировать режимы работы входящих в КИ приборов;
- повысить эксплуатационную надежность;
- снизить требования к стабильности источников питания.

РАЗРАБОТАНО 10 ТИПОВ КИ СВЧ



УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ

Параметры	КЛАСС КИ СВЧ		
	Усилительно-преобразовательное	Усилительно-преобразовательное	Генераторно-усилительно-преобразовательное
Рабочий диапазон	70-14 ГГц	80-14 ГГц	8,5-16 ГГц
Полоса пропускания частот	1,5-6%	1-6%	1-3%
Выходная импульсная мощность передающего канала	20-120 кВт	4,5-25 кВт	15-150 кВт
Длительность импульса	10-200 мкс	0,55-500 мкс	0,5-12 мкс
Сквозность	200	2,5-12	2,5-65
Уровень фазовых шумов в сигнале передающего канала, дБ/Гц	минус 90/2,5кГц	минус 90/2кГц	минус 90/1кГц
Уровень частотных шумов в сигнале гетеродинного канала, дБ/Гц		минус 105/5кГц	минус 90/2,5кГц
Частота выходного сигнала, ГГц		30-1000 МГц	30-1000 МГц
Количество рабочих частот			1-4



ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ВЫСОКОСТАБИЛЬНОЕ МАЛОШУМЯЩЕЕ МАЛОГАБАРИТНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ

ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК "С 300 В", "ТОР", "ТОР-1М", В БОРТОВЫХ РЛС СИСТЕМЫ "ЗАСЛОН", В РЛС МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ "ФОРУМ", "КИНЖАЛ"

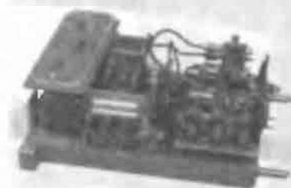
Рис. 2.1.1.11. Комплексированные изделия на основе ЭВ приборов СВЧ

Развитие полупроводниковых генераторных и усилительных СВЧ приборов и полосковой гибридно-интегральной и гибридно-монокристаллической технологий привело к дальнейшей миниатюризации КИ СВЧ с одновременным расширением их функциональных возможностей. В состав КИ СВЧ на основе вакуумных приборов дополнительно вошли:

- полупроводниковые умножители частоты;

- смесители и преобразователи частоты;
- фильтры широкого назначения;
- регуляторы и оптимизаторы выходной мощности;
- переключатели рабочих частот управляющих сигналов;
- устройства индикации параметров и защиты элементов от перегрузок и др.

КИ СВЧ выполняют следующие функции: генерация, переключение, умножение, преобразование, фильтрация, усиление, оптимизация, защита. В результате в 3-5 раз увеличена средняя наработка КИ СВЧ, а также значительно снижено количество регламентных работ при эксплуатации СВЧ части передатчиков РЛС.



ЗАДАЮЩЕЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



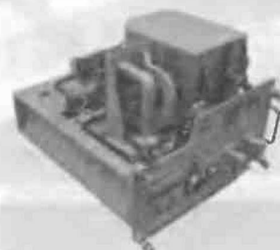
МОЩНОЕ УМНОЖИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ



ЗАДАЮЩЕЕ МАЛОМОЩНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



Параметры	КИ для мобильной аппаратуры	КИ для бортовой аппаратуры
Рабочий диапазон	8,0-14 ГГц	8,5-16 ГГц
Полоса рабочих частот	1-8%	1-3%
Выходная импульсная мощность передаточного канала	0,002-25 кВт	0,3-85 кВт
Длительность импульсов	0,5-200 мкс	15-60 мкс
Сквозимость	5-300	3-140
Уровень фазовых шумов в сигнале передаточного канала, дБ/Гц	Минус 90 кГц, минус 130/4кГц	Минус 90/0,2кГц
Уровень частотных шумов в сигнале гетеродинного канала, дБ/Гц	Минус 115/4кГц	Минус 60/0,2кГц
Частота входного сигнала ГГц	100 МГц	28-1000 МГц
Количество рабочих частот	4-24	1-9
Время переключения частоты	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$



МОЩНОЕ ШИРОКОПОЛОСТНОЕ ГЕНЕРАТОРНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНО-УСИЛИТЕЛЬНОЕ КИ СВЧ



ПЕРЕДАЮЩЕЕ КИ СВЧ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

ПРИМЕНЕНЫ В ЗРК "С 300 В", "С300 ВМ", "ИМБИРЬ", В БОРТОВЫХ РЛС СИСТЕМ "РАВЕНСТВО", "ОКО".

Рис. 2.1.1.12. Комплексируемые изделия на основе ЭВ и ТТ приборов СВЧ

гофункциональных твердотельных устройств. С использованием различных вариантов схемного объединения в одном корпусе нескольких однофункциональных твердотельных узлов создавались многофункциональные модули. Была разработана гамма приемных и приемопередающих твердотельных модулей, модулей для фазированных антенных решеток. Гибридно-интегральные модули в системах радиоразведки, радиолокации, станциях активных помех, головках самонаведения, аппаратуре связи обеспечивали: прием и передачу сигналов, активную и пассивную защиту входных малошумящих усилителей, управление уровнем усиления, фазой приемных и передающих каналов, преобразование входных сигналов в сигналы промежуточной частоты, усиление по промежуточной частоте, детектирование сигнала.

Многофункциональные твердотельные модули разрабатывались для работы в участках диапазона частот от 2,7 до 15 ГГц. Были разработаны когерентные передающие, приемные и приемопередающие модули и блоки миллиметрового диапазона длин волн для применения в перспективных радиолокационных комплексах.

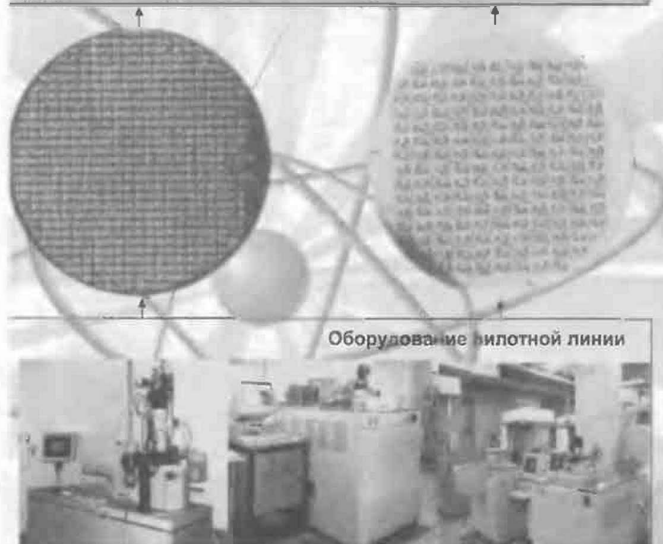
Таким образом, отечественная твердотельная СВЧ-техника охватывает все необходимые технические направления и в ряде из них имеет достижения, близкие к мировому уровню. Так, созданный образец малогабаритного трехканального СВЧ-приемника в гибридном исполнении для моноимпульсной обработки сигнала, входящего в состав антенного моноблока АРГС РВВ АЕ (о нем подробнее будет рассказано дальше), по совокупности характеристик практически не уступает мировому уровню.

Параметры усилителей мощности, особенно в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, заметно ниже мирового уровня. Основной причиной этого является состояние технологии производства мощных транзисторов и их основных исходных материалов. С целью повышения технического уровня отечественных мощных транзисторов СВЧ реализуется проект пилотной линии по производству монокристаллических СВЧ-микросхем с топологическими нормами 0,1–0,2 мкм и организации производства гетероструктур на основе арсенида и нитрида галлия. Проектируемые производственные мощности пилотной линии позволят удовлетворить потребности радиоэлектронной промышленности до 2010 года (рис. 2.1.1.13).

Надо отметить, что в США объем выпуска приборов на основе арсенида галлия в 2001 году превысил 3,5 млрд. долл., причем применение этих приборов в аппаратуре промышленных средств связи составило более 60%, а в военной аппаратуре — лишь 4%. Широкое использование GaAs-технологии в промышленной аппаратуре обеспечивает полномасштабную ритмичную загрузку производственных мощностей твердотельной СВЧ-электроники. При этом резко повышается эффективность инвестиций в микроволновые технологии и существенно снижается себестоимость продукции, в том числе и военного назначения. В отечественной практике разработки и применения СВЧ электронных приборов проводились в основном (более 80%) в интересах военной техники.

Развитие твердотельной СВЧ-электроники подобно тому, как развитие больших интегральных микросхем способствовало широкой реализации цифровых методов обработки информации, открывает возможности широкого применения активных антенных фазированных решеток (АФАР).

	Рабочий диапазон частот, ГГц	Кш, дБ	Ку, дБ	Рвых, мВт
Монолитные и гибридные СВЧ-микросхемы				
Усилители	1 - 18	2 - 4	10 - 20	60 - 1500
Преобразователи (осцилляторы)	1 - 16	10	0	16
Умножители и делители	1 - 18		0	20 - 80
Генераторы	8 - 12			20 - 25
Транзисторы				
Маломощные	1 - 18	1 - 3	8 - 10	7
Мощные	1 - 14		7 - 12	1000-2000



Конструктив	МИС	ГМИС	Типы
СВЧ			
			40
			8
			10
СВЧ			
			2
			9

В настоящее время в НПП «Исток» используются технологии изготовления:

- гибридно-монолитных интегральных схем (ГМИС) на пластинах монокристаллического сапфира;
- малошумящих и мощных транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм;
- металлизированных отверстий в арсениде галлия;
- "воздушных мостов" для межпересечений;
- резисторов, конденсаторов и индуктивностей для пассивной части МИС СВЧ.

Для достижения паритета в развитии отечественной технологии монолитных СВЧ микросхем разрабатываются:

- технология изготовления Т-образного затвора длиной 0,1 мкм;

- технология изготовления гетероструктур с высокой подвижностью электронов,
- чистые условия производства.

Для решения этих задач во ФГУП НПП «Исток», в период 2002-2005 гг. строится первая в России пилотная линия по разработке и производству транзисторов и МИС СВЧ с размерной обработкой 0,1 мкм и объемом выпуска 1 000 000 МИС СВЧ в год.

Создание этой линии решает задачу производства современных транзисторов типа HFET, pHEMT и МИС СВЧ на их основе в диапазоне 1-40 ГГц, что позволит удовлетворить самым высоким требованиям мирового уровня техники и обеспечит транзисторами и МИС СВЧ всех заинтересованных заказчиков.

с разрешением 0,1 мкм



Рис. 2.1.1.13. Твердотельные приборы и монолитные СВЧ-микросхемы

Разработка АФАР имеет длинную историю, но практическая их реализация стала возможной только в последнее десятилетие в связи с успехами в создании монолитных (твердотельных) СВЧ-микросхем. Активные твердотельные антенные решетки позволяют радикально повысить эксплуатационные характеристики фазированных антенн (надежность, коэффициент полезного действия, удобство обслуживания) и гибкость управления, достигаемую благодаря удобству их комплексирования с современными специализированными и универсальными цифровыми вычислительными устройствами. Практически мгновенное перемещение луча в пространстве и широкие возможности управления формой диаграммы направленности делают эти антенные системы незаменимыми при работе по малозаметным высокоскоростным целям, к которым относится современное высокоточное оружие. Однако широкое использование АФАР сдерживается их стоимостью, которая резко увеличивается с уменьшением длины волны. Поэтому создание больших антенн в коротковолновой части сантиметрового диапазона оказывается очень дорогим удовольствием, а в миллиметровом просто разорительно. Фактор снижения стоимости становится одним из главных при проектировании современной АФАР. Он находится в противоречии с требованиями обеспечить высокие характеристики приемопередающего модуля (ППМ), в частности, выходную мощность, усиление и плотность упаковки. Необходимо учесть, что большое влияние на стоимость оказывают ритмичность и объем выпуска однотипных модулей, а также использование унифицированных базовых технологий производства их элементов и, в первую очередь, монолитных СВЧ-микросхем. Степень унификации и связанный с ней объем выпуска являются главными определителями цены ППМ. При этом нужно учитывать, что зависимость стоимости от объема выпуска не является линейной — она скачкообразна. Причем периодичность и высота скачков зависит как от унификации ППМ, так и от структуры технологического процесса и степени автоматизации тестирования годной продукции.

Термин «унификация» применительно к элементам (СВЧ ППМ) и составным частям (группировки ППМ в антенной решетке) АФАР приобретает принципиально новое значение. Здесь нужно говорить не о привычной для нас конструктивной унификации, а о параметрической и технологической унификации. Без нее невозможно одновременное выполнение требований высокого потенциала, низкой стоимости и эксплуатационной надежности.

Параметрическая и технологическая унификация ограничивает сверху и снизу существующее конструктивное разнообразие элементов и составных частей АФАР и приводит к некоторым функциональным ограничениям в режимах ее работы. Тем не менее, между этими границами параметрической и технологической унификации остается достаточно пространства для конструктивных модификаций СВЧ ППМ и составных частей АФАР на их основе, которое позволяет результативно решать вопросы распределения СВЧ-сигналов, подводки первичного питания, цифрового управления и теплоотвода. Поэтому необходима тщательная проработка оптимальных путей построения АФАР в целом, ее элементов и составных частей.

Облик и параметры СВЧ-компонентов должны унифицироваться, исходя из структуры унифицированных СВЧ ППМ, их группировки в решетке и

используемых в создаваемой пилотной линии базовых технологий МИС СВЧ и исходных материалов. Унификация рядов функциональных элементов ППМ без принятия решения об унифицированных облике и параметрах СВЧ ППМ и группировки в целом не решает проблемы. Возникающие ограничения в выборе конструктивного оформления должны быть приняты разработчиками АФАР как предельные рамки их свободы в выборе построения и характеристик АФАР в целом.

Особо следует отметить необходимость развития новых перспективных направлений отечественной твердотельной СВЧ-техники и, в первую очередь, мощных транзисторов и МИС СВЧ на основе широкозонных полупроводниковых материалов. В этих актуальнейших направлениях интенсифицируются работы по инициативе Министерства обороны США (программа WBGSTI под руководством DARPA) и по крупномасштабному многонациональному проекту KORRIGAN в Европе, в котором участвуют 7 стран — Франция, Италия, Голландия, Германия, Испания, Швеция, Великобритания. Руководителем проекта является французская фирма Thales Airborne Systems. Общая стоимость проекта — 40 млн. евро. Согласно целям проекта к 2009 году планируется создать Единый европейский канал поставок, который обеспечит военную промышленность надежными, отвечающими современному уровню развития GaN приборами.

Следует отметить, что приведенный материал далеко не исчерпывает все направления твердотельной СВЧ-техники. В нем отсутствует раздел дискретных СВЧ-приборов L- и S-диапазонов, в которых головная организация НПП «Пульсар» имеет значительные достижения, не уступающие мировому уровню, не приведен обзор состояния ферритовой СВЧ-техники, которые, возможно, будут показаны в других разделах книги.

Радиолокационная аппаратура в электронной отрасли

После создания научного задела и разработок multifunctional комплексированных изделий и твердотельных модулей СВЧ предприятия электронной промышленности, владеющие всем комплексом технических направлений СВЧ-техники и базовыми микроволновыми технологиями, вплотную подошли к проблемам СВЧ-системотехники и стали решать системные задачи в области создания радиотехнической аппаратуры.

В начале 1980-х годов к БРЛС истребительной авиации предъявили новые требования по обнаружению наземных целей и картографированию поверхности Земли с разрешением 5–7 м на дальностях свыше 20 км. Одновременно с этим с 1976 года в США фирма «Хьюз» начала разрабатывать активную головку самонаведения для компактной ракеты класса «воздух-воздух» с миниатюрным автономным бортовым радиолокатором. Для решения этих задач и ликвидации назревающего отставания в техническом и технологическом уровне отечественной авиационной радиоэлектроники требовалось не только создание новой элементной базы, повышение технологического уровня ее разработок и производства, но и поиск новых технических решений. Поэтому в июне 1980 года Комиссией Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам был решен вопрос о начале научно-экс-



Рис. 2.1.1.14. Радиолокационная головка самонаведения 500 (без обтекателя и корпуса)

периментальной работы «Союз-Синтез» по созданию экспериментальных образцов БРЛС и активной головки самонаведения, не уступающих лучшим образцам авиационной техники США. Головной организацией-исполнителем научно-экспериментальной работы «Союз-Синтез» был назначен НПП «Исток».

В ходе этой работы впервые в СССР были получены следующие результаты:

- разработана БРЛС с программируемой цифровой обработкой сигнала полностью на отечественной элементной базе;
- в ходе летных испытаний на летающей лаборатории подтверждена расчетная дальность обнаружения цели с ЭПР 5 м^2 , превышающая 200 км;
- проведено картографирование поверхности Земли в реальном масштабе времени на дальностях 10–20 км с разрешением 7 м.

Для БРЛС были созданы многолучевые «прозрачные» лампы бегущей волны и малошумящие малогабаритные электростатические усилители, не имеющие зарубежных аналогов. Отдельные технические решения и элементная база БРЛС использовались радиопромышленностью в последующих разработках РЛПК.

Успешно была закончена работа по активным радиолокационным головкам самонаведения (АРГС) (рис. 2.1.1.14) и продолжена в виде ОКР «Синтез 20» в составе ракеты «воздух-воздух» среднего радиуса действия. После проведения полного комплекса испытаний ракета с АРГС 50 была принята на вооружение в начале 1990-х годов.

С этого времени направление по разработке и выпуску АРГС стало одной из основных частей аппаратного направления НПП «Исток», в котором достижения предприятия по миниатюризации и многофункциональности стали базой для получения успешного результата.

В период с 1998 по 2005 год выпущено и реализовано в виде экспортных поставок в составе ракеты РВВ-АЕ более 1500 изделий 50Э.

АРГС типа 50Э обеспечивает:

- Поиск, захват и сопровождение движущихся воздушных целей по целеуказаниям РЛС самолета-носителя на начальном этапе полета ракеты в инерциально-корректируемом режиме и активное самонаведение ракеты на цель на конечном этапе в любых метеоусловиях, при электронном противодействии противника, на фоне земной и водной поверхности (по принципу «пустил-забыл»).
- Прием и дешифрацию сигналов по линии радиокоррекции от РЛС самолета-носителя.
- Самостоятельное измерение угловых координат и скорости цели, а также скорости сближения ракеты с целью.
- Формирование и передачу по цифровой линии связи сигналов для систем управления полетом ракеты.
- Активное самонаведение ракеты на цель с точностью, находящейся в пределах расчетного радиуса поражения цели боевой частью ракеты.

Тактико-технические данные АРГС ТИПА 50Э

- Дальность пуска (в составе ракеты РВВ-АЕ) до 100 км.
- Дальность захвата АРГС цели с ЭОП более 5 м² не менее 16 км.
- Дальность действия ЛРК (с СУВ самолета типа МИГ-29) до 50 км.

Анализ состояния и дальнейшего развития СВЧ-техники

Микроволновые технологии и СВЧ-техника, основанная на их использовании, были, есть и остаются критическими базовыми технологиями. Производство этих технологий обеспечивает качественные характеристики оборонной техники страны, ее информационных систем. В связи с этим СВЧ-техника, безусловно, относится к наиболее приоритетным направлениям научно-технического и технологического развития отечественной элементной базы. Корректный анализ развития военной СВЧ-техники с поэтапной оценкой конкретных параметров становится возможным только при наличии прогнозируемых данных создаваемой на этих этапах перспективной аппаратуры в соответствии с действующей программой вооружения. В связи с отсутствием этих исходных данных можно провести лишь общий качественный анализ, ограничиваясь известными закономерностями научно-технического и технологического развития.

В основу анализа положена приведенная на рис. 2.1.1.15 диаграмма областей применения современной СВЧ-техники в координатах «мощность—частота» в различных видах военной и гражданской радиоэлектронной аппаратуры. На диаграмме приведены кривые предельно возможных потенциальных характеристик СВЧ-техники, полученные по результатам анализа закономерностей изменения во времени потенциальных коэффициентов R^2 (МВт $\times$ ГГц²) для всех известных классов СВЧ-техники (рис. 2.1.1.16). Потенциальный коэффициент физически представляет собой с точностью до постоянной удельную плотность мощности на основных узлах прибора. В процессе совершенствования данного класса приборов увеличение R^2 происходит по S-образной кривой с резким ростом в начале и пологой ча-

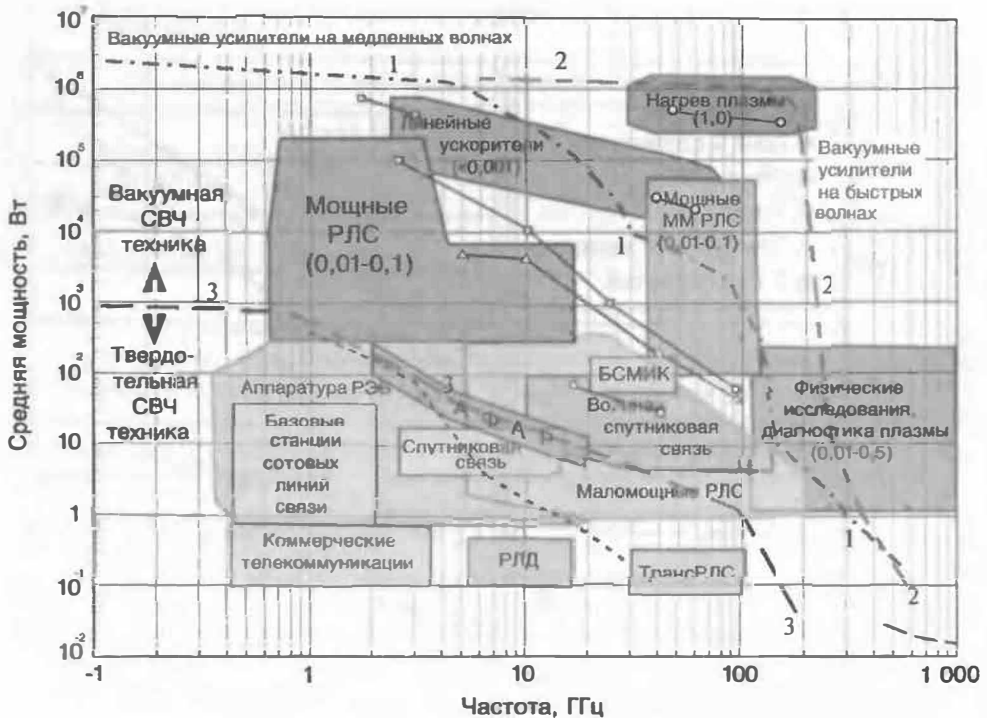


Рис. 2.1.1.15. Аппаратура и области применения современной СВЧ-техники

стью, практически параллельной оси абсцисс, в конце этого процесса, указывающей на принципиальные ограничения дальнейшего повышения мощностей, вызываемые разрушением изделия в момент включения или в начальный период его работы.

Из рис. 2.1.1.16 следует, что в направлении мощных вакуумных усилителей на медленных волнах типа клистронов и ЛБВ уже в начале 1970-х годов достигнуты предельные потенциальные характеристики соответственно $70 \text{ [МВт} \times \text{ГГц}^2]$ для клистронов и $20 \text{ [МВт} \times \text{ГГц}^2]$ для ЛБВ. Эти предельные характеристики отражены на рис. 2.1.1.15 в верхней половине диаграммы в виде штрих-пунктирной линии 1 — «вакуумные усилители на медленных волнах». Очерченная этой линией область останется неизменной в ближайшее десятилетие.

Пунктирная линия 2 — «вакуумные усилители на быстрых волнах» — ограничивает область потенциальных характеристик вакуумных усилителей на быстрых волнах, основными представителями которых являются гироприборы и лазеры на свободных электронах. В 2000 году величины Rf^2 достигли значений 20000 для гироприборов и 10^7 для лазеров и далеки от перехода в насыщение, что объясняется в первую очередь ростом рабочих частот и переходом их в световой диапазон за частотные пределы нашего анализа.

Наконец, пунктирная линия 3 в нижней половине диаграммы ограничивает область потенциальных характеристик мощных транзисторов и МИС СВЧ на основе кремния и арсенида галлия.

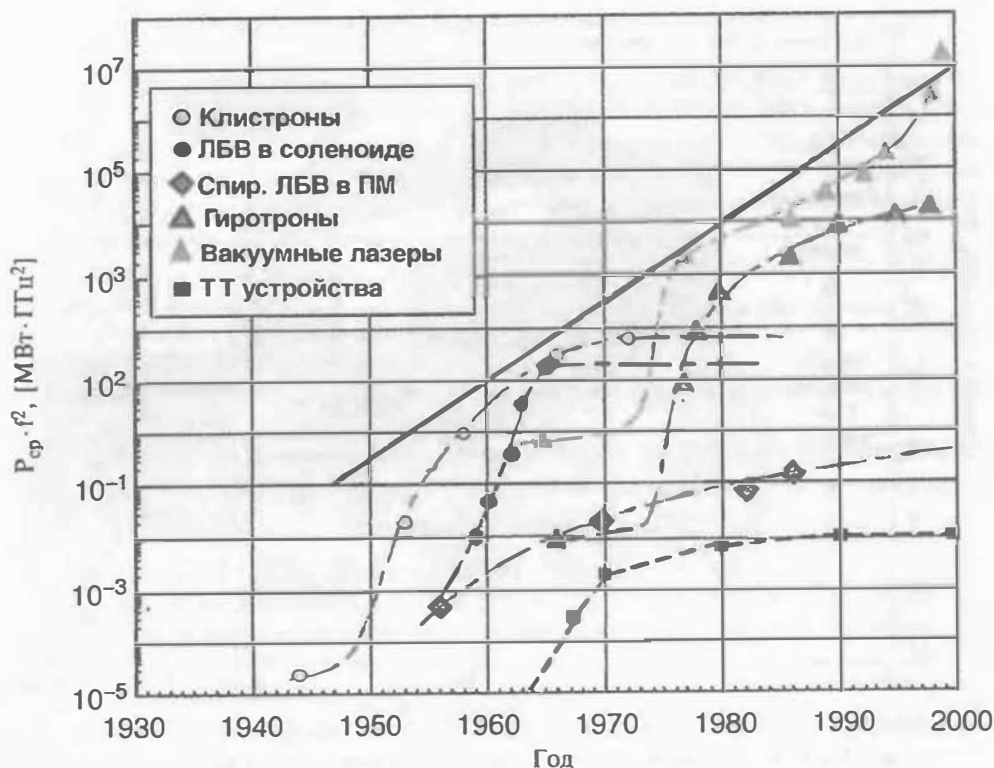


Рис. 2.1.1.16. Динамика изменений во времени потенциальных коэффициентов основных классов СВЧ-техники

Реально существующие типы разработанных и выпускаемых промышленностью отечественных и зарубежных приборов имеют потенциальные характеристики, как правило, заметно уступающие предельным. Особенно это характерно для изделий, предназначенных для использования в аппаратуре военного назначения и долговременной работы в космосе, в связи с необходимостью создания технически обоснованных конструктивных запасов, гарантирующих обеспечение высоких требований эксплуатационной надежности. Поэтому реальные эксплуатационные значения потенциальных характеристик более чем на порядок ниже предельных физических ограничений и приведены в виде серии кривых, отражающих потенциальные характеристики отечественной СВЧ-техники. Остановимся подробнее на анализе основных областей применения современной СВЧ-техники в XXI веке и приведенных потенциальных характеристик.

Мощная радиолокационная аппаратура в диапазонах 0,5—18 и 30—100 ГГц

Потенциальные характеристики радиолокационной аппаратуры и мощных вакуумных СВЧ-усилителей показаны в таблице 2.1.1.1 и на фрагменте диаграммы на рис. 2.1.1.17. Верхними сплошными линиями 1 и 2 показаны предельные значения потенциальных характеристик для приборов на медленных (кривая 2) и быстрых (кривая 1) волнах.

Таблица 2.1.1.1.

	Прогнозируемые потенциальные характеристики мощных клистронов и ЛБВ*											
	0,5–18 ГГц						30–100 ГГц					
	$P_{пред}$		P_{2003}		P_{2020}		$P_{пред}$		P_{2003}		P_{2020}	
$F, ГГц$	0,5	18,0	0,5	18,0	0,5	18,0	30	100	30	100	30	100
$P_{ср}, кВт$	2000	100	100	6	500	10	10/20	1/5	2	0,1	5/10	0,5/2

Выделенные области соответствуют зарубежной аппаратуре. Сплошной линией 3 и величинами P_{2003} в таблице 2.1.1.1 показаны значения средних мощностей современных отечественных усилительных клистронов, а пунктирной линией 4 — соответствующие характеристики мощных ЛБВ.

Средние мощности обеспечиваются одним мощным прибором с рабочими полосами частот до 5–8% для клистронов и 10–15% для ЛБВ при скважностях 10–20. Приборы обеспечивают многорежимную работу передатчиков, включая пачечные режимы с коротким импульсом при «бестоковом» управлении по сетке. В качестве фокусирующих систем используются, как правило, соленоиды или постоянные магниты. Основная часть номенклатуры мощной вакуумной СВЧ-техники в диапазоне 0,5–18 ГГц разработана предприятиями ФГУП «НПП «Исток» и ФГУП «НПП «Торий».

Предприятиями ВНИИРТ, МРТИ и ННИИРТ созданы РЛС, работающие в диапазонах 1,5–3 ГГц, соответствующие и превышающие по своим характеристикам потенциал зарубежных станций. Они укомплектованы современной СВЧ-техникой и есть все возможности дальнейшего увеличения их потенциальных характеристик, особенно при использовании активных решеток как на вакуумной СВЧ-технике (ОКБ «Тантал», НПП «Исток» и «Торий»), так и на твердотельной (ГУП «Пульсар»).

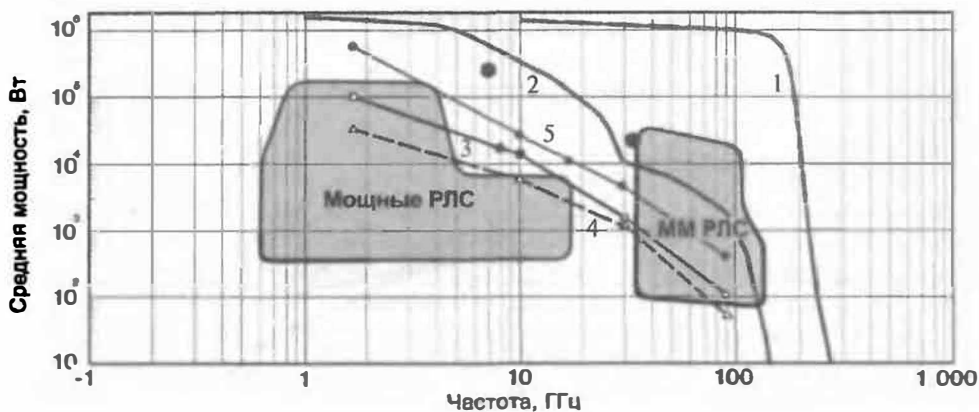


Рис. 2.1.1.17. Мощная радиолокационная аппаратура в диапазонах 0,5–18 и 30–100 ГГц

В диапазоне 8–10 ГГц наивысшие потенциальные характеристики получены в известных системах С300В, С300П, созданных в НИЭМИ и МКБ «Алмаз». В этих системах использовались разработанные в НПП «Исток» мощные уникальные многолучевые клистроны и входные циклотронные усилители. Потенциальные возможности радиолокационной аппаратуры в этом диапазоне частот могут быть значительно увеличены при использовании пассивных ФАР с групповым питанием передающих каналов. В 1970-х годах на этом принципе была создана РЛС, использующая в субрешетке 24 многолучевых клистрона, с суммарной излучаемой средней мощностью свыше 200 кВт. Работа этой уникальной аппаратуры в течение десятиков лет показала высокие эксплуатационные характеристики (отдельная крупная точка в С-диапазоне).

Сплошной линией 5 (см. рис. 2.1.1.17) и величинами P_{2020} (табл. 2.1.1.1) показаны прогнозируемые потенциальные характеристики мощных клистронов в 2015–2020 годах. В диапазоне 30–100 ГГц они могут быть еще увеличены в 4–5 раз за счет применения сверхпроводящих магнитных систем с высокотемпературной сверхпроводимостью.

Потенциальные возможности аппаратуры миллиметрового диапазона могут быть также существенно повышены при использовании мощных усилителей на быстрых волнах. В 1980 годы в НИИ «Радиофизика» на основе пассивной ФАР был разработан уникальный радиоэлектронный комплекс со средней мощностью 20 кВт в диапазоне 30 ГГц (правая отдельная крупная точка на диаграмме) с использованием гироклистрона, созданного в НПП «Торий».

Малогобаритная локационная аппаратура в диапазоне 10–100 ГГц

Малогобаритные РЛС (рис. 2.1.1.18, таблица 2.1.1.2) охватывают обширную область применения бортовой радиолокационной аппаратуры, и в первую очередь высокоточного оружия, в частности, активных головок самонаведения различного класса ракет «воздух-воздух» и «воздух-поверхность».

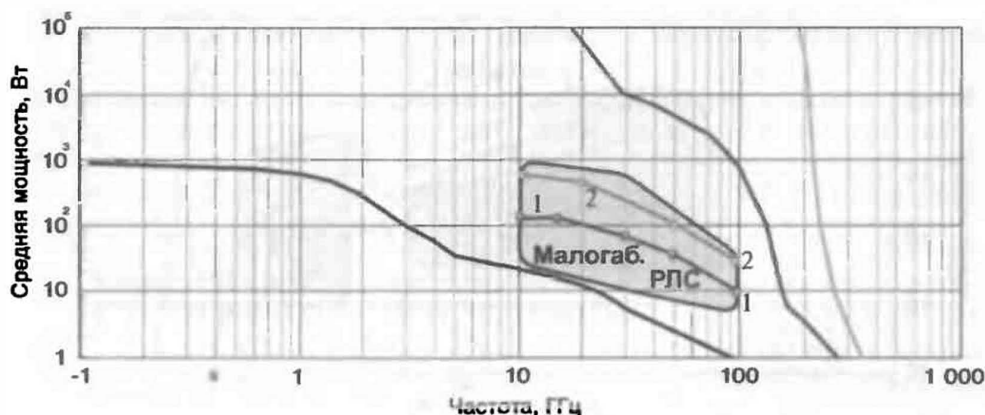


Рис. 2.1.1.18. Малогабаритная радиолокационная аппаратура в диапазоне 10–100 ГГц

Таблица 2.1.1.2.

	Потенциальные характеристики аппаратуры (2000–2004 гг.)		Прогнозируемые потенциальные характеристики малогабаритных клистронов и ЛБВ					
			Р ₂₀₀₃			Р ₂₀₂₀		
F, ГГц	10	100	10	30	100	10	30	100
P _{ср} , Вт	300	20	150	80	10	750	200	50

Малогабаритные клистроны и ЛБВ для этой аппаратуры должны иметь максимально низкие питающие напряжения (не выше 2 кВ), массу (не более 1 кг) и размеры (менее 500 см³). Одним из главных условий миниатюризации является возможность размещения таких приборов в составе приемопередающего СВЧ-моноблока на подвижной части антенной системы, как это реализовано в АРГС РВВ АЕ. Отказ от соединений и гибких кабелей в выходном каскаде передатчика и СВЧ-приемнике позволяет на 3 дБ уменьшить вносимые потери, избежать фазовых сдвигов на всех углах прокачки и снизить помехи в диапазоне доплеровских частот при линейных перегрузках более 30г.

В НПП «Исток» в течение последних 15 лет с успехом ведутся работы по миниатюризации СВЧ-техники и ее источников питания для активных головок самонаведения «воздух-воздух». В диапазоне 10–15 ГГц разработаны и выпускаются миниатюризированные клистроны и ЛБВ со средней мощностью 100–150 Вт при коэффициенте заполнения 0,3 с массогабаритными характеристиками, позволяющими располагать прибор на подвижной части антенны при перегрузках в пределах 30г.

Типичные характеристики этих приборов показаны на рис. 2.1.1.18 линией 1 и величинами Р₂₀₀₃ в таблице 2.1.1.2, а на 2020 год — линией 2 и величинами Р₂₀₂₀.

При входном напряжении 20–30 В масса источника питания составляет 1,9 кг при объеме менее 1,5 дм³.

Прорывным направлением в технике электронных компонентов для малогабаритной аппаратуры локации, связи и радиоэлектронной борьбы являются мощные микроволновые модули (МРМ).

Аппаратура радиоэлектронной борьбы в диапазонах 0,5–30 ГГц

Потенциальные характеристики зарубежных средств РЭБ представлены на рис. 2.1.1.19 и в таблице 2.1.1.3. Отрезками прямых линий и величинами Р₂₀₀₃ в таблице 2.1.1.3 показаны рабочие полосы и непрерывная мощность основных отечественных сверхширокополосных ЛБВ, разрабатываемых и выпускаемых ФГУП «НПП «Алмаз» (г. Саратов). Линия 1 на рис. 2.1.1.19 и величины Р₂₀₂₀ соответствуют прогнозируемым величинам мощности в тех же частотных пределах в 2015 году.

Потенциальные характеристики отечественных выпускаемых и прогнозируемых ЛБВ перекрывают всю верхнюю часть рабочей области зарубежных средств РЭБ, за исключением диапазона 20–40 ГГц.

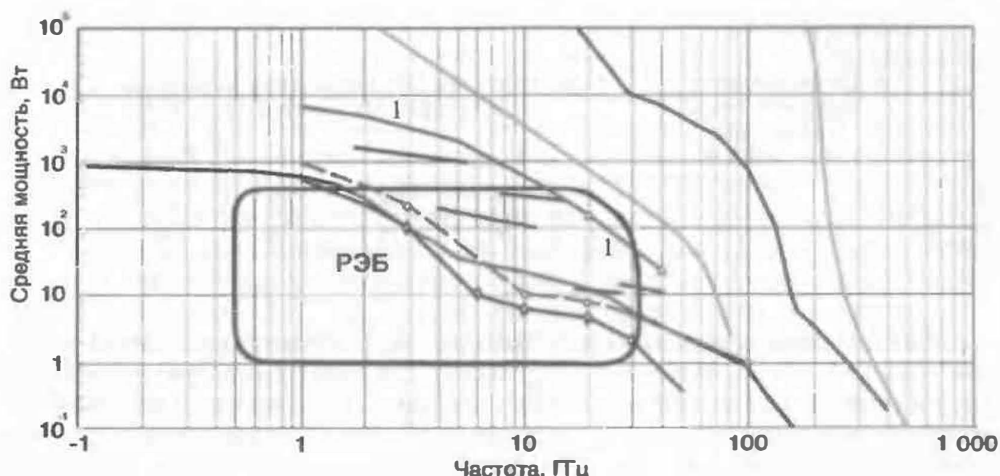


Рис. 2.1.1.19. Аппаратура радиоэлектронной борьбы в диапазонах 0,5–30 ГГц

Таблица 2.1.1.3.

	Прогнозируемые потенциальные характеристики аппаратуры (2000–2010 гг.)			Прогнозируемые потенциальные характеристики широкополосных ЛБВ								
				Р _{пред}			Р ₂₀₀₃			Р ₂₀₂₀		
F, ГГц	3	10	30	3	10	30	3	10	30	3	10	30
P _{ср} , кВт	5	1	0,1	30	3	0,3	1,1	0,25	0,01	3	0,75	0,05
P, Вт				100	20	5	100	5	2	200	10	5

Трудности в этой области обусловлены приближением к физическим ограничениям спиральных ЛБВ. Поэтому разработка ЛБВ с полосой частот в одну и более октав при непрерывной мощности 100 Вт сопряжена с принципиальными трудностями в связи с возможным снижением показателей эксплуатационной надежности из-за малых конструктивных запасов. Необходимы поиски новых технологических путей решения проблемы, одним из которых, безусловно, является использование фокусирующих систем на основе высокотемпературной сверхпроводимости.

Военная и коммерческая аппаратура спутниковой связи в диапазонах 3–100 ГГц

На рисунке 2.1.1.20 и в таблице 2.1.1.4 показаны потенциальные характеристики зарубежной военной спутниковой связи (область ВСС), коммерческой спутниковой связи (область КСС) и область прямого спутникового вещания (ПС). Ломаной линией 1 с кружками на рис. 2.1.1.20 и величинами Р₂₀₀₃ в таблице 2.1.1.4 показаны характеристики 12 типов отечественных спутниковых ЛБВ (ФГУП «Алмаз», г. Саратов), перекрывающие диапазон

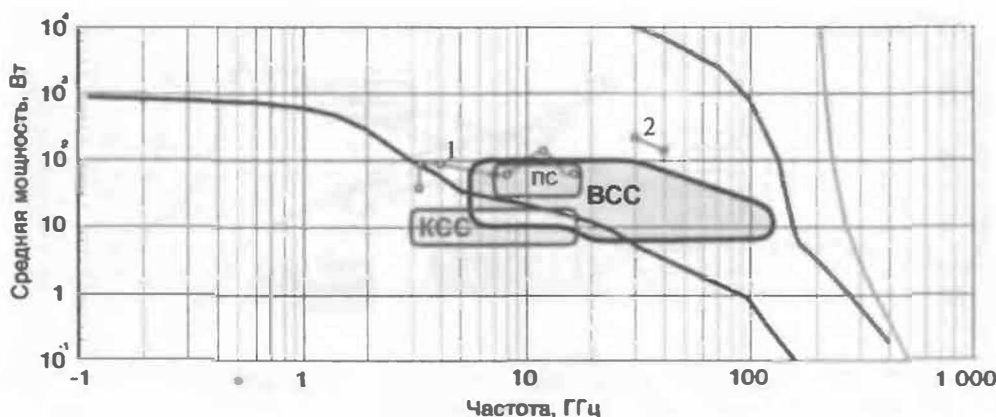


Рис. 2.1.1.20. Военная и коммерческая аппаратура спутниковой связи

Таблица 2.1.1.4.

	Прогнозируемые потенциальные характеристики аппаратуры (2000–2010 гг.)				Прогнозируемые потенциальные характеристики спутниковых ЛБВ							
					Р ₂₀₀₃				Р ₂₀₂₀			
F, ГГц	3	10	30	100	3	10	30	100	3	10	30	100
P, Вт	100	150	200	10	80	150	-	-	150	150	100	10

3–18 ГГц с уровнем мощности 40–150 Вт. Приборы по своим параметрам соответствуют зарубежному уровню (долговечность 50–100 тыс. ч, КПД 50–60%).

Зарубежные спутниковые ЛБВ фирм США, Франции, Японии помимо указанного диапазона охватывают полосу частот 20–40 ГГц. На рис. 2.1.1.20 отрезком 2 в диапазоне 30–40 ГГц показаны параметры рекордных ЛБВ отделения EDD фирмы «Боинг» США с непрерывной мощностью 150–250 Вт. Отсутствие отечественных разработок в этой области частот объясняется отсутствием заказов, а также предельным износом высокочастотного станочного парка.

Аппаратура наземной коммерческой связи

Потенциальные характеристики аппаратуры наземной коммерческой связи, радиолокационных датчиков различных назначений, автомобильных радиолокаторов показаны на рис. 2.1.1.21: линия 1 без точек и величины Р₂₀₀₀ в таблице 2.1.1.5 — мировой уровень однокристалльных МИС СВЧ в 2000 году; линия 2 с точками и величины Р₂₀₀₃ в таблице 2.1.1.5 — современный отечественный уровень и линия 3 с точками и величины Р₂₀₁₀ — отечественный уровень 2007 года.

Заметно большие величины мощностей требуются для передатчиков базовых станций сотовых интерактивных телекоммуникаций миллиметрового

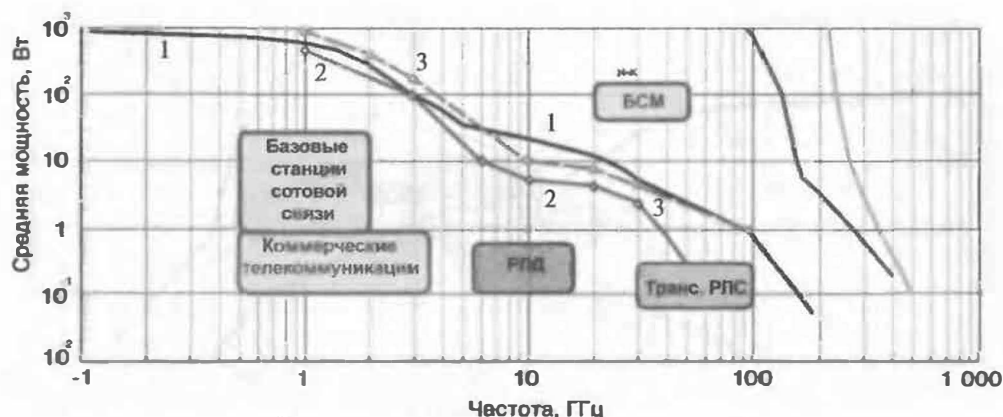


Рис. 2.1.1.21. Аппаратура наземной коммерческой связи

Таблица 2.1.1.5.

Прогнозируемые потенциальные характеристики												
Аппаратуры				Транзисторов и ЛБВ для БСМ								
				P ₂₀₀₀			P ₂₀₀₃			P ₂₀₁₀		
F, ГГц	0,5–2	20–50	30–100	1–2	10	30–100	1–2	10	30	1–2	10	30–100
P, Вт	200	150	0,1–0,5	750–300	20	5–1	400–200	5	2	800–400	10	5–1

диапазона, интенсивно развиваемых за рубежом (прямоугольник БСМ). Точками над ним показана отечественная ЛБВ НПП «Исток», проектируемая для этой цели.

Приемопередающие модули для АФАР

Потенциальные характеристики твердотельных приемопередающих модулей для АФАР определяют облик военных радиоэлектронных систем 5-го поколения. На рисунке 2.1.1.22 и в таблице 2.1.1.6 приведены прогнозируемые на 2010 год основные параметры мощных отечественных СВЧ-микросхем в L-, S-, C- и X-диапазонах. В L- и S-диапазонах технический уровень отечественных полупроводниковых приборов почти не уступает зарубежному. В коротковолновой части сантиметрового диапазона параметры отечественных МИС СВЧ на основе арсенида галлия в 2007 году в лучшем случае достигнут зарубежного уровня 1998–2000 годов.

Следует отметить, что приведенные зарубежные и отечественные характеристики относятся к СВЧ-технике на основе кремния, арсенида галлия и гетероструктур на этих материалах. Прогноз СВЧ-техники на основе широкозонных полупроводников столь сложен, что выходит за рамки настоящей работы.

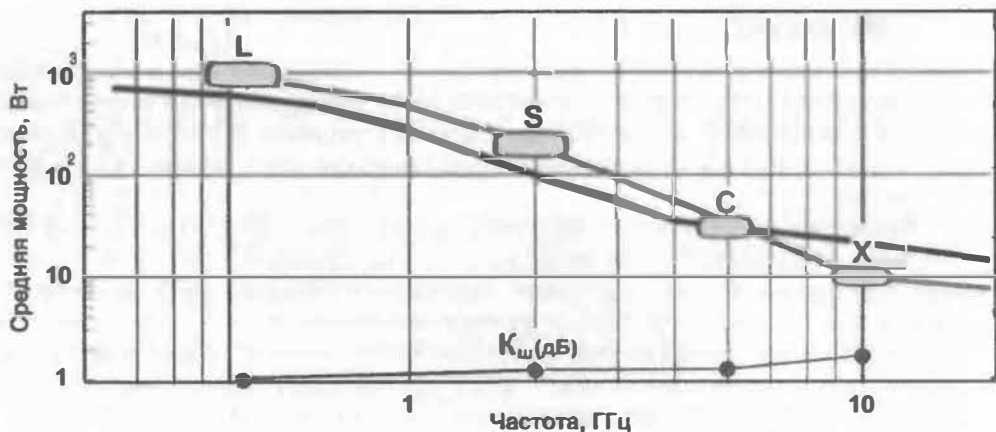


Рис. 2.1.1.22. Приемопередающие модули для АФАР

Таблица 2.1.1.6.

Прогнозируемые потенциальные характеристики СВЧ МИС для ППМ АФАР на 2007 год											
F = 1,17–1,43 ГГц			F = 2,7–3,3 ГГц			F = 5,6–6,4 ГГц			F = 9,0–10,0 ГГц		
P, Вт	$K_{ш}$, дБ	КПД, %	P, Вт	$K_{ш}$, дБ	КПД, %	P, Вт	$K_{ш}$, дБ	КПД, %	P, Вт	$K_{ш}$, дБ	КПД, %
300	1,0	40	250	1,2	40	15	1,2	40	10	1,5	35

Резюме

- Потенциальные характеристики отечественной СВЧ-техники применительно к основным военным и гражданским системам радиоэлектронной аппаратуры по техническому уровню превышают потенциальные характеристики зарубежной аппаратуры, имея при этом существенно более низкие напряжения питания, улучшающие ее массогабаритные характеристики.
- Прогнозируемые параметры основных классов приборов на период с 2010 по 2020 год позволяют разработать новое поколение СВЧ-техники, обеспечивающее дальнейший рост потенциальных характеристик отечественных систем и комплексов ВВТ, что должно найти отражение в проектируемой Государственной программе вооружения.
- Исключение составляет техника мощных твердотельных СВЧ-микросхем, где прогнозируемые на 2010 год параметры в сантиметровом диапазоне частот в лучшем случае будут соответствовать зарубежному уровню 2000 года.

От автора

Автор приносит извинения своим коллегам — специалистам и сотрудникам предприятий СВЧ-техники — в связи с отсутствием описания полного вклада их коллективов в отечественную СВЧ-электронику. В относительно кратком разделе это просто невозможно сделать из-за отведенного в книге объема текста.

Автору не представилось возможным показать роль в участии и вклад в создание приведенных основных классов электронной СВЧ-техники Главных и Генеральных конструкторов систем и комплексов ВВТ, а также возглавляемых ими коллективов — разработчиков аппаратуры. Их вклад огромен и роль их в развитии отечественной СВЧ-техники нельзя переоценить. То же самое можно высказать в адрес наших Генеральных заказчиков, их представителей на наших предприятиях и военных институтов. Оценивая наши успехи, мы испытываем чувство глубокой благодарности за их труд и непосредственное участие в наших разработках, приемных испытаниях и организации производства.

Заслуживают особого рассмотрения и вопросы развития отечественной технологии изготовления СВЧ-приборов и оборудования, используемых в технологических процессах. Базовый технологический процесс современного СВЧ электровакуумного прибора содержит 5–8 тысяч технологических операций.

За период с 1950-х годов до конца 1980-х технология изготовления СВЧ вакуумных приборов изменилась коренным образом. Технология производства превратилась в высокотехнологичную отрасль со своей промышленной базой по производству технологического и специального измерительного оборудования. Созданные высокоточное оборудование, новые материалы и технологические процессы позволили, за указанный выше период времени, увеличить срок службы приборов, повысить безотказность работы и поднять процент выхода годных на несколько порядков. Стало возможным разрабатывать и выпускать в серийном производстве приборы СВЧ во всем диапазоне СВЧ-колебаний с высокими техническими параметрами и эксплуатационными характеристиками.

Литература

- Электронике России 10 лет: взгляды, суждения, мнения. — Электроника НТБ, 2005, № 6.
- 40 лет отечественной электроники. — Электронная промышленность, 2001, № 1.
- 60 лет ФГУП НПП «ИСТОК», юбилейный выпуск, 1993.
- Закурдаев А.Д., Мощные малогабаритные и миниатюрные усилительные клистроны для бортовых РЛС. Электронная техника. Сер. СВЧ-техника, 2003, вып. 2 (482).
- Вакуумная электроника для XXI столетия. — IEEE Microwave Magazine, 2001, № 3.
- Сазонов Б.В., Победоносцев А.С. Многолучевые, многорежимные «прозрачные» ЛБВ и усилительные цепочки на их основе. — Электронная техника. Сер. СВЧ-техника, 2003, вып. 2 (482).
- Korolev A.N., Lopin M.I. and et al. Traditional and Novel Vacuum Electron Devices. — IEEE Trans. Electron Devices, 2001, vol. 48, p. 2929–2937.
- Бушуев Н.А., Кудряшов В.П. Широкополосные ЛБВ — Электронная промышленность, 2003, № 1.
- Ребров С.И. НПП «Исток» развивает технологии твердотельной СВЧ-электроники. — Электроника НТБ, 2005, № 4, с. 8–11.

- Королев А.Н., Ребров С.И. «Исток» — стражам воздушных границ. — АВИА панорама, 2006, №2.
- Koslov Y., Rebrov S. Military Electronics in Russia. — Military Technology, 1993, № 5.
- Ребров С.И. Конструктивный аспект надежности технологических процессов производства приборов СВЧ. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1973, вып. 8.
- Ребров С.И. Прогноз развития СВЧ-техники на период до 2020 года. — Петербургский журнал электроники, 2004, № 3–4.
- Толкачев А.А., Левитан Б.А. и др. РЛС ММДВ для обслуживания низкоорбитальных ИСЗ. Материалы конференции «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления», сентябрь 2003 г., Саратов.
- Королев А.Н. Миниатюрные СВЧ-модули и бортовые когерентные передатчики на их основе. — Электронная промышленность, 2003, № 1.
- Бушуев Н.А. Конкурентоспособность ЭВП СВЧ и радиоэлектронных устройств на их основе. — Петербургский журнал электроники, 2004, № 3–4.
- Гельвич Э.А. Мощные комплексированные изделия. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1982, вып.12, с. 18–25.
- Гельвич Э.А. Многолучевые клистроны и лампы бегущей волны — исключают или дополняют друг друга? — Радиотехника, 2002, № 8, с.21–29.
- Гельвич Э.А., Котов А.С. Комплексированные СВЧ-изделия: основные особенности и тенденции развития. — Радиотехника, 2004, № 2, с.4–16.
- Гельвич Э.А., Котов А.С. Сравнительные характеристики и области применения мощных СВЧ-модулей и комплексированных СВЧ-изделий (КИ СВЧ). — Радиотехника, 2006, № 3, с.25–30.

2.1.2. Динамика магнетронов

Э.Д. Шлифер, доктор технических наук

Наряду с работами по созданию магнетронов в НИИ «Исток» активно велись разработки и выпуск магнетронов на ряде ОКБ и заводов страны. Завод «Плутон» с ОКБ, созданный в 1946 году, разрабатывал и поставлял значительную номенклатуру магнетронов, в том числе для мобильных средств радиоэлектронного вооружения.

Из всей номенклатуры ЭВП СВЧ и других приборов, создаваемых и производимых в ОАО «Плутон», автор выделяет только магнетроны и приводит динамику их развития. На рис. 2.1.2.1–2.1.2.3 показаны ранние модификации отечественных магнетронов.

Основной тенденцией развития магнетронов уже с начала 1950-х годов являлось создание приборов с повышенными частотно-энергетическими характеристиками и освоение все новых задаваемых потребителем участков рабочих частот. Так, в соответствии с потребностями и уровнем создаваемых РЛС с начала 1950-х годов в ОКБ «Плутон» создавались и затем выпускались заводом импульсные магнетроны 10-сантиметрового диапазона с уровнем мощности от 1 до 1000 кВт. Сначала это были приборы непакетированной металlostеклянной конструкции, подобные зарубежным прототипам с коаксиальными выходными устройствами, с резонаторной системой типа «щель-отверстие» и кольцевыми двухсторонними связками (одинарными и двойными). До 1950 года эти приборы имели фиксированную рабочую

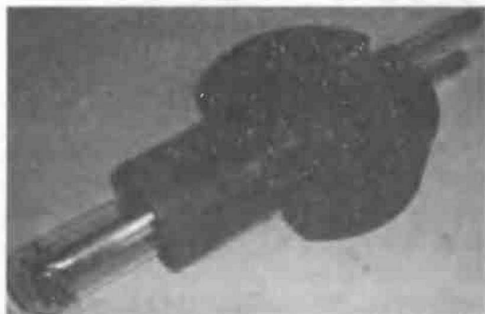


Рис. 2.1.2.1. Одна из ранних модификаций отечественных 10-см мегаваттного магнетрона — представителя семейства непакетированных металlostеклянных магнетронов с фиксированной частотой



Рис. 2.1.2.2. Представитель семейства отечественных 3-см 100-кВт перестраиваемых магнетронов пакетированной конструкции

частоту. В обеспечение повышенной помехозащищенности РЛС (в том числе для ухода от «прицельных» помех противника и отстройки от помех, создаваемых в рабочем диапазоне частот своими соседними РЛС) с 1951 года в ОАО «Плутон» разрабатывались, в основном, перестраиваемые по частоте магнетроны. В первых образцах для изменения частоты использовались механически перемещаемые азимутально-симметричные проводящие элемен-

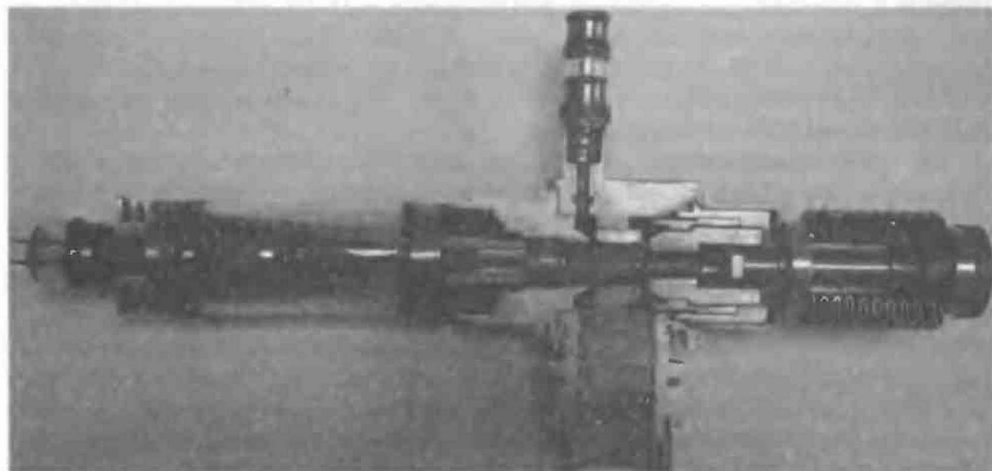


Рис. 2.1.2.3. Один из ранних представителей отечественных 2-см 100-кВт пакетированных перестраиваемых магнетронов (без магнитов) металlostеклянной конструкции с разнорезонаторной колебательной системой

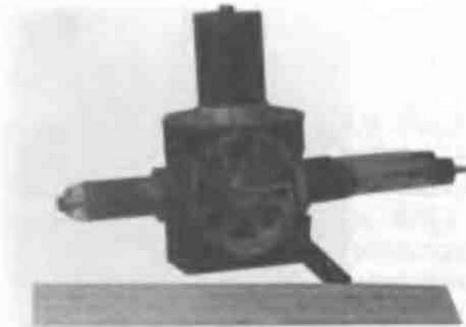


Рис. 2.1.2.4. Первый в советской и мировой практике (1954 г.) 17-см 300-кВт магнетрон с асимметричной подстройкой частоты в непакетированном металлоглазном исполнении

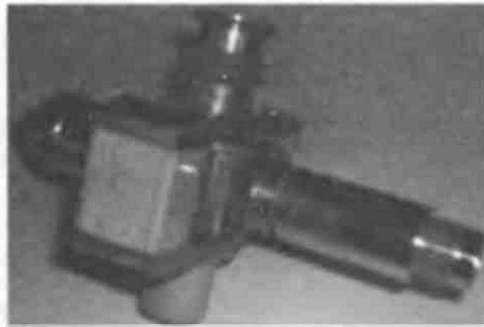


Рис. 2.1.2.5. Представитель металлокерамических пакетированных классических магнетронов 10- и 17-см диапазонов с асимметричной перестройкой и термокомпенсацией уходов частоты (начало 80-х годов)

ты, воздействующие на магнитную составляющую СВЧ-электромагнитного поля колебательной системы (так называемая «индуктивная перестройка»). Этот метод перестройки применялся многие годы и не исчерпал себя до сих пор в так называемых классических магнетронах различных частотных диапазонов и уровней мощности. Он обеспечивает диапазон перестройки до $\pm 4\%$ и применяется как для разнорезонаторных систем, так и для систем со связками. Для придания магнетрону таких качеств, как вибро- и удароустойчивость, термостабильность, воспроизводимость закона перестройки на всем периоде жизни прибора, циклопрочность в скоростном режиме, потребовалась большая работа по исследованию и применению материалов для внутривакуумного и вневакуумного использования (в том числе в трущихся парах, термокомпенсационных сочетаниях), сильфонов и по выбору общих конструктивных и технологических решений для конкретных создаваемых магнетронов.

Следует заметить, что азимутальная симметричность элементов индуктивной перестройки долгое время считалась одним из важных достоинств метода, обеспечивающим стабильность и эффективность взаимодействия электронов с СВЧ-полями в магнетроне. В ОАО «Плутон» в 1956 года был создан магнетрон 17-сантиметрового диапазона, а в след за ним и другие (в том числе выпускаемые и в настоящее время) с асимметричным элементом («индуктивным штырем»), вводимом в один резонатор «связочной» колебательной системы (рис. 2.1.2.4) и одновременно выполняющим функции термокомпенсатора (рис. 2.1.2.5).

Наряду с вышеупомянутыми неперестраиваемыми и перестраиваемыми магнетронами непакетированной металлоглазной конструкции в ОКБ «Плутон» были начаты и развивались в 1950-1960-х годах, да и в более позднее время, магнетроны 2- и 3-сантиметрового диапазона и первые 8-миллиметровые магнетроны как фиксированной частоты, так и перестраиваемые. Коротковолновые магнетроны (2- и 3-сантиметровых диапазонов) малой и средней мощности (от единиц до нескольких десятков киловатт) ориентиру-



Рис. 2.1.2.6. Автогенераторный и синхронизированный «двухполосный» ОКМ 2-см диапазона с длительностью импульса 0,5–100 мкс и импульсной мощностью до 1 МВт

вались на так называемое бортовое применение и в целом соответствовали мировому уровню, а в ряде случаев его превышали (рис. 2.1.2.6).

Применительно к системам со связками в ОАО «Плутон» были созданы образцы магнетронов с так называемой емкостной перестройкой. В этих образцах азимутально-симметричный аксиально-перемещаемый металлический или керамический элемент воздействовал на электрическую составляющую СВЧ-поля связок. В относительно маломощных магнетронах (с невысокими анодными блоками) диапазон перестройки достигал $\pm 5\%$. В 1959 году был создан и защищен авторским свидетельством образец 10-сантиметрового мегаваттного магнетрона с комбинированной емкостно-индуктивной симметричной перестройкой, в котором емкостной и индуктивный элементы перестройки располагались с одного торца анодного блока, но перемещались одновременно в противоположных направлениях. Диапазон перестройки достигал $\pm 7\%$. ОКР на базе этого результата не ставилась.

Большинство созданных в 1950–1960 годы магнетронов сантиметрового диапазона (10, 9, 7,5, 6, 4, 3 и 2), в том числе пакетированных, имели металlostеклянные конструкции.

В магнетронах миллиметрового диапазона в ОКБ «Плутон» в начале 1950-х годов использовались разнорезонаторные системы с рабочим π -видом колебаний. Многие внутренние проблемы, нарастающие по мере продвижения в диапазон длин волн короче 8 мм, требовали решения и одновременно стимулировали совершенствование методов формообразования миниатюрных колебательных систем, что вызвало к жизни создание и использование электроэрозионного оборудования. Необходимость достижения высоких точностных характеристик и сохранения их на всем технологическом маршруте изготовления магнетрона требовала тщательного выбора материалов и режимов механо- и термообработки, тщательного взаимного позиционирования сопрягаемых узлов. Отсюда, в частности, родились конструкции с так называемой горячей центровкой катода в динамическом режиме в обеспечение компромисса между максимизацией КПД и сохранением стабильности работы. Проблемы наращивания мощности и продвижения в

диапазон все более коротких волн миллиметрового диапазона были основными и решались в ряде зарубежных и отечественных институтов и КБ наряду с другими.

В частности, в ИРЭ АН УССР в период с 1950 по 1964 год были проведены исследовательские работы, в результате которых созданы образцы магнетронов миллиметрового диапазона (длина волны 1,25–6,8 мм на уровне мощности от 1 до 150 кВт, КПД 0,8–20%). Множество трудностей, связанных с нахождением компромиссных технологических, тепловых, частотных, электродинамических и эмиссионных решений, было, если не преодолено, то отодвинуто за счет реализации идеологии, ориентирующейся на использование режимов взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной на колебаниях, отличных от традиционных колебаний π -вида.

Следует отметить основные тенденции развития магнетронов в период с 1950 по 1970 год. Во-первых, совершенствование конструкций магнетронов как электровакуумных приборов и, во-вторых, расширение их функциональных возможностей. Поэтому основными направлениями работ были:

- улучшение внутренних качеств магнетрона (повышение стабильности работы, сдаточных характеристик, выхода «годных», увеличение долговечности, снижение разбросов параметров и уменьшение числа случайных отказов и разнообразия их характера);
- обеспечение повышенных требований к выходным характеристикам и критериям оптимального функционирования РЛС.

Так, независимо от требований потребителя при создании магнетрона одной из узловых проблем (особенно в перестраиваемых магнетронах) являлось исключение (подавление) возбуждения паразитных (мешающих) резонансов, в частности, видов колебаний электронно-контурного «происхождения», т.е. колебательных состояний, поддерживаемых электронным потоком. В импульсных магнетронах такие колебательные состояния, как правило, возникают на фронте модулирующего импульса и реже на спаде и, следовательно, могут проявляться в разной степени в зависимости от формы модулирующего импульса. Не менее существенно и подавление «контурных» резонансов, не поддерживаемых потоком, и собственных резонансов потока, искажающих его форму и вызывающих снижение КПД, устойчивости работы магнетрона и его долговечности.

Подавление всех указанных резонансов дает очевидный эффект улучшения качества собственно магнетрона (снижение внутренних неустойчивостей, в том числе возможных флуктуаций режима, искрений и темпов деградации прибора) и при этом обеспечивает весьма высокие характеристики сигнала.

Результатом подавления паразитных резонансов любых происхождений является существенное уменьшение «холостых» токов, локальных перегревов, парогазоотделений, числа пропусков СВЧ-импульсов и перескоков частоты, флуктуационных уходов частоты от импульса к импульсу, флуктуаций напряжения возбуждения рабочего вида колебаний (и соответственно — длительности импульса). Все это означает расширение функциональных возможностей РЛС, повышение достоверности получаемой информации о цели (облучаемом объекте).

Необходимость повышения информационной достоверности радиолокационного изображения (в том числе и цифрового его представления) выдвигает

гает ряд требований к зондирующему сигналу РЛС и, соответственно, к магнетрону. К примеру, навигационные РЛС, обеспечивающие безопасное маневрирование корабля в порту, должны обладать высокой разрешающей способностью по дальности. Этой задаче соответствует использование коротких импульсов с крутыми и нефлуктуирующими фронтами. Поэтому, если в магнетроне принять меры по устранению всякого рода фронтовых неустойчивостей, то и качество самого магнетрона (в том числе повышенная долговечность) и требуемое качество РЛС обеспечиваются одновременно.

В ОАО «Плутон» в 1970-х годах созданы серийные пакетированные приборы металлокерамической конструкции, в которых максимально реализована совокупность передовых на тот период электродинамических, электрических и конструктивных технических решений. В этих приборах, в частности, реализована «мгновенная готовность» магнетрона, как это требуется для «бортовых» магнетронов разового действия (в частности, ракетных). Именно для таких применений в ОАО «Плутон» в 1970-1990-х годах создано семейство миниатюрных магнетронов с «мгновенным запуском». Это — пионерские достижения, в основе которых лежит использование комбинированных эмиттеров с лезвийными автоэмиссионными элементами и вторично-эмиссионными элементами.

В приборах реализована совокупность технических решений, одновременно обеспечивающих и «мгновенную готовность», включая достижение и поддержание стабильной частоты генерации, стабильного уровня мощности, практически нефлуктуирующего сигнала без пропусков, «дрожаний» ВЧ-импульса, и отсутствие превышения допустимых уровней паразитных сигналов в спектре излучения. И все это — в условиях воздействия различных тепловых, механических и других внешних факторов.

Большинство этих магнетронов, создаваемых в разное время, было построено на базе разнорезонаторных колебательных систем (позднее были созданы и коаксиальные магнетроны с автоэмиссионным «запуском») и квазицилиндрических магнитов с продольной намагниченностью. Более поздние конструкции (легкие, малогабаритные) использовали и более эффективные самарий-кобальтовые магниты с радиальной текстурой. В подобных приборах (в основном разового применения) достижение высокой долговечности отнюдь не являлось центральной задачей, однако надежность на всем жизненном цикле прибора должна была быть весьма высокой, что требовало применения передовых технологических и конструкторских подходов. Применительно к магнетронам такого назначения «повышенная информационная достоверность» преломляется как гарантированное идеологически заложенное срабатывание локатора и системы (например, ракеты) в целом в требуемом месте и в требуемое время.

Другим примером появления специфических требований к источнику зондирующего сигнала магнетрона может служить возникновение проблемы четкого выделения относительно малоразмерной цели на фоне с относительно большой (да еще и флуктуирующей) эффективной площадью рассеивания. Это, в частности, соответствует задаче обнаружения выдвинутого перископа подводной лодки, всплывшей мины, акивалангиста и т.п. на фоне волнующейся водной поверхности (при наблюдении корабельной РЛС). Подобная задача — распознавание низколетящей цели на фоне поверхности земли, покры-

той, скажем, лесом с флуктуирующей листвой. Было установлено, что относительно узкополосная сверхбыстрая (от импульса к импульсу) перестройка частоты по заранее выбранному закону дает ожидаемый эффект. Для этого за рубежом были созданы образцы магнетронов с так называемой вращательной перестройкой, а также с электромагнитной вибрационной перестройкой. В ОАО «Плутон» так же были созданы магнетроны с электромагнитной перестройкой, реализованной, в частности, в коаксиальном магнетроне.

С созданием мощных усилителей СВЧ-диапазона потребовались разработки приборов СВЧ для задающих и промежуточных каскадов меньшей мощности, которые управлялись бы от внешнего источника колебаний. Были созданы образцы синхронизированных, фазированных и подвозбуждаемых магнетронов.

В конце 1970–начале 1980-х годов был разработан и поставлялся заказчику для РЛС космического базирования фазированный 300-киловаттный 10-сантиметровый классический магнетрон (в металлокерамическом исполнении с термокомпенсационным асимметричным механизмом подстройки), обеспечивающий фазовую стабильность (от импульса к импульсу) зондирующего короткоимпульсного сигнала в пределах не хуже 3–6 градусов (относительно опорного непрерывного сигнала) при уровне входного сигнала 33 дБ. Обеспечивалось получение уникально четкого и детального изображения «карты местности».

Введение в колебательную систему магнетрона стороннего СВЧ-сигнала для быстрого и «гибкого» управления частотой колебаний апробировалось и/или реализовывалось применительно как к классическим магнетронам, так и к коаксиальным (КМ) и обращенно-коаксиальным (ОКМ). Естественно, что для классических магнетронов, не содержащих высокочастотных стабилизирующих резонаторов, полоса синхронизации и, соответственно, диапазон «перестройки» частоты выходного сигнала данного уровня мощности может превышать полосу синхронизации КМ и ОКМ.

В образце 2-сантиметрового 50-киловаттного КМ введение через циркулятор и выходное устройство опережающего или непрерывного внешнего СВЧ-сигнала (–50–55 дБ) в стабилизирующий резонатор позволило существенно повысить скорость возбуждения колебаний рабочего вида и, соответственно, работоспособность магнетрона при весьма крутых фронтах модулирующего импульса (что обычно трудно достигается в КМ) и одновременно уменьшить или устранить флуктуации длительности импульса («дрожание фронта»).

Физически такое «подвозбуждение» КМ означает навязывание СВЧ-поля и пространственному заряду благоприятной (соответствующей рабочему π -виду колебаний) топографии, причем на частоте, близкой к рабочей. Важно, что положительный эффект достигается даже при заметных отстройках частоты подвозбуждающего сигнала от резонансной частоты рабочего TE_{011} вида колебаний стабилизирующего резонатора. Главное, чтобы частота входного СВЧ-сигнала была достаточно далека от резонансной для соседних мешающих видов колебаний стабилизирующего резонатора: TE_{121} , TE_{411} .

Другая возможность была продемонстрирована при введении внешнего СВЧ-сигнала (–22 дБ) в мощный (~1 МВт) ОКМ 2-сантиметрового диапазона. Речь идет о построении СВЧ-энергетической решетки, предназначенной для квазикогерентного сложения мощностей множества одинаковых ОКМ

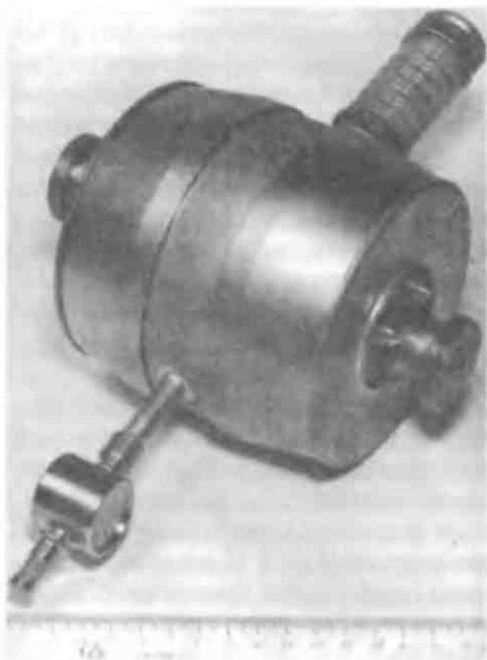


Рис. 2.1.2.7. Синхронизированный «четырёхполюсный» ОКМ 2-см диапазона с импульсной мощностью до 1 МВт

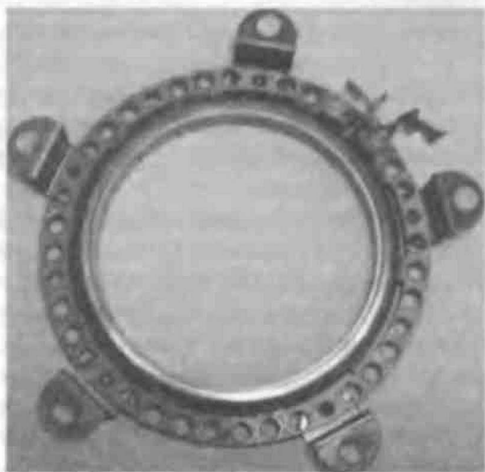


Рис. 2.1.2.8. Катод со встречно-штыревой замедляющей системой для одной из модификаций синхронизированного «четырёхполюсного» ОКМ 2-см диапазона

непосредственно на облучаемом объекте, что существенно отличается от построения традиционных фазированных антенных решеток с управляемой диаграммой направленности. Задачей энергетической решетки является одновременное квазикогерентное генерирование всех элементов в пределах каждого импульса.

При этом имелось ввиду использование одного задающего ОКМ на всю группу фазированных синхронизированных ОКМ. Даже при одинаковости конструкций всех ОКМ (в том числе и задающего) и изначальной подстройке всего множества ОКМ на одну и ту же частоту некоторые индивидуальные отличия режимов (в том числе КПД) и условий охлаждения могут приводить к «разбеганию» частот и фаз в пределах длительности импульса (например, при $\tau = 100$ мкс). Поэтому в таких синхронизированных ОКМ допустимая полоса синхронизации может быть даже уже, чем суммарная возможная девиация частоты, ибо одинаковость конструкций задающего и синхронизированных ОКМ гарантирует практически одинаковые по величине и знаку дрейфы центральной частоты полосы синхронизации.

В ОАО «Плутон» были созданы образцы и задающего генератора и синхронизированных ОКМ в двухполюсной (рис. 2.1.2.6) и четырехполюсной модификациях (рис. 2.1.2.7), а также образец ОКМ с введением синхронизирующего сигнала не в стабилизирующий резонатор, а в катодную замедляющую систему (рис. 2.1.2.8).

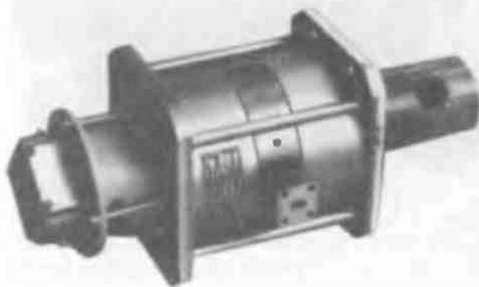


Рис. 2.1.2.9. Представитель семейства бортовых КМ 8-мм диапазона с перестройкой частоты от импульса к импульсу



Рис. 2.1.2.10. Представитель семейства бортовых КМ 2-3-см диапазона

Появление коаксиальных магнетронов и их развитие привело к известному вытеснению классических магнетронов. В коаксиальных, а тем более в обращено-коаксиальных магнетронах, наряду с высокой стабильностью генерируемых колебаний, проблемы разгрузки катода и анодной системы теряют свою актуальность, а появляющиеся возможности увеличения стабильности и долговечности становятся важным стимулом дальнейшего развития. Появление первых патентов по КМ связано с именами Азема (1950 г., США) и затем Фейнштейна (1955 г.), а патент по ОКМ — с именем Филиппова (1951 г., СССР). С 1961 по 1962 год эти работы (и в теоретическом и в экспериментальном плане) начали активно развиваться в ОАО «Плутон» и к 1963 году были созданы первые в СССР действующие макеты с вневакуумным стабилизирующим резонатором (в диапазоне 4–5 см на уровень мощности ~ 25 кВт).

В 1964 году в рамках плановой НИР были созданы пакетированные пере-страиваемые образцы КМ в 2-сантиметровом диапазоне на мощность 100 кВт и образцы КМ в 4-, 5-сантиметровом диапазоне на мощность 25 и 140 кВт. Уже на этом этапе были сформулированы основные положения построения сложной колебательной системы по выбору относительной расстановки частот видов колебаний, методам распознавания и подавления мешающих видов колебаний и по расчету основных электродинамических характеристик КМ. Все это легло в основу всех последующих разработок КМ в СССР и, в частности, в ОАО «Плутон».

В 1964 году были начаты работы, результатом которых стало создание первого образца ОКМ 2-сантиметрового диапазона с импульсной мощностью более 400 кВт. В последующие годы, вплоть до середины 1980-х годов, в ОАО «Плутон» была создана гамма КМ (рис. 2.1.2.9, 2.1.2.10), в том числе малогабаритных бортовых, включая и приборы с автоэмиссионным запуском.



Рис. 2.1.2.11. Первый в отечественной и зарубежной практике ОКМ 2-см диапазона в пакетированном металлостеклянном исполнении



Рис. 2.1.2.12. Двухэтажный ОКМ 2-см диапазона с длительностью импульса 200 мкс при импульсной мощности до 1МВт и до 100мкс при импульсной мощности до 1,6МВт

Создание и исследование ОКМ, имеющих множество общих электродинамических черт с КМ, в ОАО «Плутон» осуществлялось параллельно с разработкой не только КМ, но и классических (в том числе фазиремых) магнетронов, что позволяло, с одной стороны, реализовывать во всех приборах совокупность передовых (на каждом временном отрезке) конструкторских, технологических, методических и идеологических решений, а, с другой, — проводить сопоставительный анализ, вырабатывать общие и частные рекомендации и подходы и, наконец, создавать обобщающие справочные, руководящие, учебно-методические материалы, включая пособия по расчету и проектированию магнетронов.

При создании ОКМ были решены многие задачи конструктивного и технологического характера, среди которых доминирующие:

- обеспечение соосности катода и анода на всех этапах технологического маршрута и при всех режимах работы;
- обеспечение термоциклической формоустойчивости ламелей анодной замедляющей системы, особенно при работе на длинных импульсах;
- обеспечение малых (компромиссно допустимых) тепловых изменений диаметра катода и анода в режимах работы на различных скважностях;
- обеспечение эрозионной стойкости ламелей анода, особенно в условиях работы на длинных импульсах;
- минимизация газо- и паровыделения из нагретых или подвергающихся электронной бомбардировке поверхностей.

На рис. 2.1.2.11, 2.1.2.12, 2.1.2.13 показаны ОКМ различных модификаций, а на рис. 2.1.2.14, 2.1.2.15, 2.1.2.16 — отдельные элементы и узлы ОКМ.

Подводя хотя бы некоторые итоги полувекового (условно) пути развития магнетрона (и решения сопутствующих задач) в ОАО «Плутон», можно считать наиболее значительными следующие:



Рис. 2.1.2.13. Общий вид ОКМ 8-мм диапазона с импульсной мощностью 130 кВт (с центровкой катода в динамическом режиме)

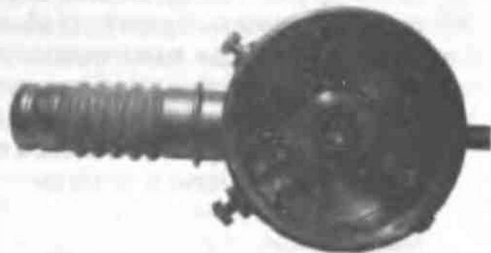


Рис. 2.1.2.14. Устройство ОКМ 8-мм диапазона. Видны средства обеспечения соосности катода при установке в динамическом режиме



Рис. 2.1.2.15. Устройство ОКМ 2-см диапазона. Катод закреплен на упругих держателях сохраняющих соосность катода и анода на всех этапах сборки, термообработки и испытаний

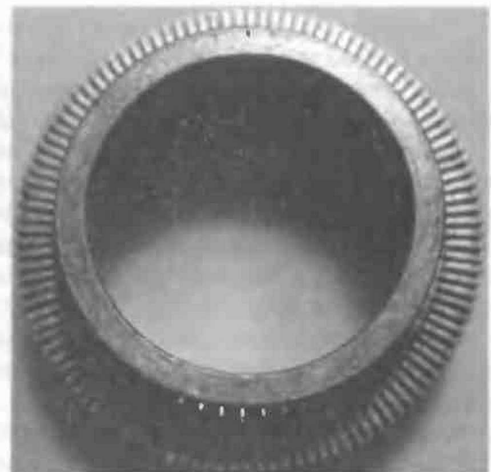


Рис. 2.1.2.16. Анодный блок ОКМ 8-мм диапазона. Ламели снабжены вольфрамовым осажденным слоем на торцевых и боковой поверхностях

- Создано несколько поколений магнетронов в диапазоне длин волн от 2 мм до 17 см и в диапазоне мощностей от единиц ватт до 1 МВт.
- Обеспечена применимость множества типов магнетронов в РЛС и других подобных устройствах наземного, морского, воздушного, космического базирования.
- Проведены пионерские работы и создана гамма безнакальных магнетронов классической и коаксиальной конструкции.
- Разработаны принципы проектирования и методики расчета коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов. Изданы соответствующие руководящие материалы. Создана гамма КМ миллиметрового и сантиметрового диапазонов и рекордных образцов ОКМ 2-сантиметрового и 8-миллиметрового диапазонов длин волн.
- Созданы образцы магнетронов со сверхбыстрой перестройкой частоты.
- Изучены механизмы возникновения побочных колебаний в магнетронах, предложены пути и средства снижения числа и уровней этих колебаний. Созданы отраслевые справочные материалы.
- Проведены работы и созданы модификации оксидных катодов, обеспечивающие повышенные (до 10–25 тыс. ч) показатели долговечности магнетронов. Созданы и внедрены методы ускоренных испытаний магнетронов на безотказность, долговечность и ресурс. Создан отраслевой стандарт.
- Создан ряд фазиремых, синхронизированных и регенеративно-усилительных магнетронов.
- Создана и внедрена серия вакуумно-технологического оборудования и оборудования для изготовления узлов магнетронов.

Следует отметить, что магнетроны не единственное направление разработок и производства в ОАО «Плутон». За рамками статьи оставлены всегда существовавшие НИОКР по созданию спиральных ЛБВ, микроволновых печей, а также полупроводниковых приборов.

Представляется правильным вывод о том, что магнетрон как таковой, несмотря на великовозрастность, не утратил конкурентоспособности и находится отнюдь не в тупиковой ситуации, хотя существуют определенные трудности по мере продвижения в коротковолновую часть миллиметрового диапазона с одновременным сохранением приемлемых значений КПД. Но так было всегда.

Значительно меньший оптимизм вызывает не будущее самого магнетрона (да и иных ЭВП СВЧ) и даже не судьба имеющегося идеологического и конструкторско-технологического задела, а общее состояние (на 2005–2006 годы) разрабатывающих предприятий (институтов, КБ, производств). Глубокий и затяжной провал на рубеже XX–XXI веков, затронувший все звенья: в постановке и финансировании новых НИОКР, в сохранении (не говоря уже о пополнении) кадров, специалистов-разработчиков, ассистирующего персонала и квалифицированных рабочих, сохранении уникального оборудования и ряда производственных (технологических) участков и площадей. Зависимость же от заказчиков, также испытывавших все эффекты и последствия упомянутого провала, выразилась в том, что новые ОКР в обеспечение конкретных радиотехнических систем либо не ставились, либо нестабильно и в недостаточном



объеме финансировались. Новые же «задельные» НИР, которые до «провала» выдвигались и финансировались в рамках Государственных комплексных целевых программ, практически не проводились (в том числе из-за отсутствия у предприятий-изготовителей ЭВП СВЧ собственных средств и видения технико-экономических перспектив).

Традиционный заказчик ЭВП СВЧ (в частности, магнетронов) как комплекующих изделий, главным образом для сохраняющихся «в строю» РЛС и комплексов, продолжал «поддерживать» серийное производство (преимущественно старых ЭВП СВЧ), что позволило ОАО «Плутон» выжить, а ныне даже несколько наращивать объем и номенклатуру выпускаемых приборов (в том числе возвращаться, конечно, с большим трудом, к выпуску приборов, не заказывавшихся десятилетия). К сожалению, даже при возникновении потребности заказчика в новом магнетроне (или ранее не освоенном в серийном производстве) возможности «разработческой базы» оказываются утраченными и в «людской» и в технологической части. Все это не обещает быстрого возрождения былой цепочки «исследование — разработка — производство».

Из истории создания магнетронов

Магнетрон — один из наиболее великовозрастных представителей электровакуумных приборов (ЭВП) сверхвысоких частот (СВЧ). В сегодняшнем понимании магнетрон — это генераторный ЭВП СВЧ, в котором формирование электронного потока и его взаимодействие с электромагнитным полем СВЧ происходит в пространстве, где действуют взаимно перпендикулярные статические (постоянные) электрическое и магнитное поля. Отсюда магнетрон и его последующие разновидности получили общее название: СВЧ-приборы со скрещенными полями.

Более чем 85-летняя история магнетрона в изложении различных зарубежных и отечественных авторов (как правило, прямых или косвенных участников разработок и/или преподавателей в вузах) содержит множество искажений как непреднамеренных, так и «заказных», призванных доказать приоритеты своих стран или научных школ, а то и являющихся результатом честной, но завышенной оценки собственного вклада и недооценки вклада других авторов — предшественников и коллег. Определенную роль в оценке исторических вех играло и то, что ряд результатов исследований и разработок, приходившихся на ближний предвоенный и военный период, открыто не публиковался и не становился предметом обмена информацией.

Эффект генерирования магнетроном СВЧ-колебаний открыл в 1924 году А. Жачек (Чехословакия). Это — циклотронные колебания (в эксперименте Жачека — на длине волны более 30 см). Практически в то же время американский физик Хаббан обнаружил колебания «типа отрицательного сопротивления» в магнитном диоде с разрезным 12-сегментным анодом.

В последующий период с 1926 по 1936 год магнетрон развивался уже как генератор электромагнитных колебаний. Так, в 1927 году А.А. Слуцкий и Д.С. Штерибург в СССР впервые создали магнетроны, работающие в диапазонах 60–30 и 7,5 см. Основная тенденция этого периода — увеличение мощности и продвижение в диапазон более коротких волн. Однако вплоть

до 1936–1940 годов все попытки реализовывались в рамках использования магнитного диода с разрезным анодом и внешнего подключенного к аноду LC-колебательного контура. Так, в 1929 году А. Окабе (Япония) добился в 4-сегментном магнитном диоде генерирования колебаний в диапазоне 3–5 см, а в 1932 году Е. Мегу (Англия) получил колебания в диапазоне 40–60 см в диоде с 12-сегментным анодом. Параллельно с экспериментальными исследованиями предпринимались усилия в области теории магнетронов. Важной вехой стало введение концепции синхронизма при взаимодействии вращающегося электронного потока с полями бегущей волны (1934 г., К. Постумус, Голландия), а в сфере практического решения задач увеличения мощности и частоты генерируемых колебаний надо считать появление в 1936–1940 годах магнетронов с цельным медным анодом, в теле которого выполнены несколько полых СВЧ-резонаторов, что дало возможность исключить внешние LC-контуры.

В СССР первый образец такого многорезонаторного магнетрона был разработан инженерами Н.Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым в цикле работ, проводимых в 1936–1940 годах под руководством М.А. Бонч-Бруевича. В 1940 году был получен рекордный по тому времени уровень мощности (до 300 Вт в непрерывном режиме) на длине волны ~ 9 см, что стало хорошим подтверждением продуктивности идеи построения таких магнетронов.

Тем не менее, в СССР 1940–1945 годы не стали этапом активного продвижения и успехов в создании многорезонаторных магнетронов и тем более в их производстве. Тогда как в Великобритании, в США и Франции были достигнуты значительные практические успехи. Великобритания в условиях нарастающих воздушных атак Германии была вынуждена форсировать создание радиолокаторов и, соответственно, СВЧ-генераторов для них, причем не отдельных образцов, а промышленно тиражируемых приборов. В обстановке секретности, но в сотрудничестве с США и Францией разработчикам (Дж. Рэндолл, Г. Бут и Дж. Сэйерс) удалось решить ряд электродинамических, конструкторских, измерительных и технологических проблем, добиться устойчивой генерации многорезонаторными магнетронами значительных импульсных мощностей в 10- и 3-сантиметровых диапазонах длин волн. Были созданы основные типы резонаторных систем (сначала равнорезонаторных (рис. 2.1.2.17), затем равнорезонаторных с эшелонированными (рис. 2.1.2.18) и кольцевыми связками (рис. 2.1.2.19), а также и разнорезонаторных (рис. 2.1.2.20). Все эти меры обеспечили достаточно надежную работу многовидовой колебательной системы на π -виде колебаний. Эти технические решения оказались долгоживущими и базовыми на последующие десятилетия и используются по сей день.

В ходе Второй мировой войны, в частности в 1942–1943 годах, по ленд-лизу нашей страной от союзников было получено более 150 радиолокаторов разных типов. В их числе станции, использующие магнетроны 10-сантиметрового диапазона. В руки отечественных инженеров передавались образцы магнетронов, в том числе сохранившие работоспособность (рис. 2.1.2.21).

Вопрос о воспроизведении и в дальнейшем о создании и развитии собственных ЭВП СВЧ решался в комплексной (организационной, научно-технической и производственной) связи с развитием в стране радиолокации, причем в условиях слаборазвитых электронной и радиопромышленности,



Рис. 2.1.2.17. Равнорезонаторный анодный блок с системой «щель-отверстие» без связей

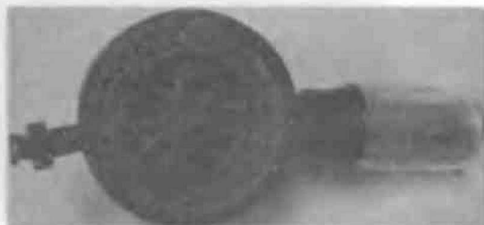


Рис. 2.1.2.18. Равнорезонаторный анодный блок с «лопаточной» системой с эшелонированными связками

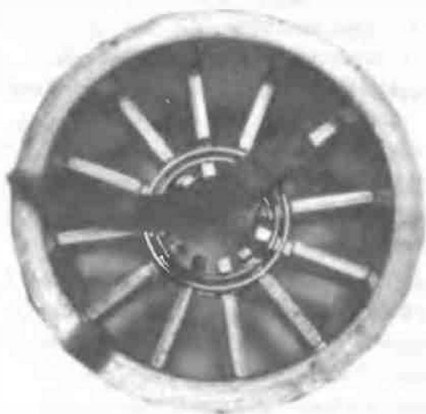


Рис. 2.1.2.19. Равнорезонаторный анодный блок с «лопаточной» системой с двойными кольцевыми связками

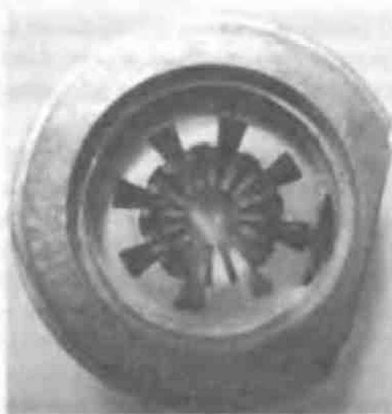


Рис. 2.1.2.20. Разнорезонаторный анодный блок с системой типа «восходящее солнце»

слабой разработческой базы и недостаточной координационно-управленческой системы. Поэтому нужно считать важной вехой для отечественной радиолокации Постановление ГКО от 04.07.1943 г. о создании Совета по радиолокации (председатель Г.М. Маленков). В результате деятельности этого комитета и, конечно, не только его в государстве закладывался фундамент для ликвидации существовавшего отставания отечественной радиоэлектроники и для последующего успешного и быстрого выхода всей отрасли на современный уровень.

Ряд предприятий СССР был нацелен на решение этих задач. Это, прежде всего, Фрязинский многопрофильный институт (ныне «Исток»), Ленинградский завод «Светлана», Московский завод (ныне «Плутон») и другие. Так, в 1946 году на заводе «Плутон» было создано ОКБ, организовано элек-

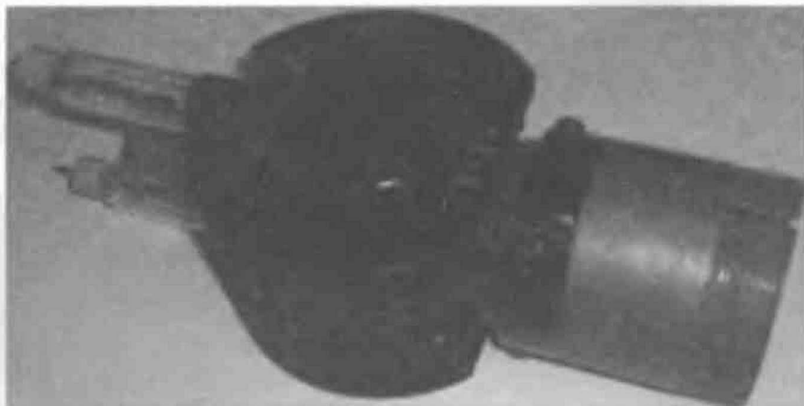


Рис. 2.1.2.21. Магнетрон-прототип — один из первых объектов копирования в ОАО «Плутон»

тровакуумное производство. Первые шаги — воспроизведение (копирование) импульсных магнетронов зарубежного происхождения 10- и 3-сантиметрового диапазонов. Были начаты разработки собственных приборов, технологий и оборудования для вакуумного производства, средств измерений и испытаний.

Следует отметить, что общая задача обеспечения требуемого уровня радиоэлектронного вооружения в стране решалась системно и комплексно, включая развитие, а то и создание от нулевого уровня не только многих видов производств и технологий, но и развитие кадрового потенциала.

Достаточно сказать, что в ряде вузов и университетов страны были организованы или сориентированы на СВЧ-тематику факультеты, специализированные профильные кафедры, был увеличен (особенно начиная с первого послевоенного 1945 года) набор студентов. Позже — организован ряд факультетов усовершенствования дипломированных инженеров. Подготовка специалистов проводилась и на базе собственно предприятий.

В результате уже к 1950 году определился (и имел далее нарастающих характер) приток молодых специалистов в области радиоэлектроники, электродинамики, электровакуумной техники, машиностроения, химических, металлургических и других технологий.

Нарастающий характер носило появление фундаментальной и специализированной литературы, относящейся к различным областям электровакуумной и СВЧ-техники, и, в частности, к магнетронам. Так, одна из первых монографий по магнетронам, появившаяся в 1946 году в США (Дж. Фиск, К. Хагструм, Гатман), уже в 1948 году вышла в русском языке, и следом за этим (1950—1951 годы) появился русский перевод двухтомника Коллинза (ред. Зусмановский С.А.), ставший настольной книгой для всех разработчиков магнетронов в последующие годы. Лавинообразно возрастало число публикаций зарубежных и отечественных авторов.

Следует заметить, что этот лавинный процесс к началу 1950-х годов давал возможность разработчикам ЭВП СВЧ развиваться и наращивать знания синхронно с появлением фундаментальной, патентной, периодической и

специальной информации. Одновременно с этим нарастающий характер имели число и сложность новых разработок, и соответственно — число и глубина требующих преодоления проблем, конкретных расчетно-теоретических задач, конструкторских, технологических и методических трудностей, а также организационно-технических неувязок. Все это в условиях всегда сжатых и строго контролируемых сроков способствовало быстрому росту профессиональной квалификации и ответственности, а с учетом упомянутого притока новых кадров обеспечивало преемственность поколений, развитие научных школ и их влияние на уровень преподавания (в том числе с привлечением специалистов из действующих предприятий), открытию учебных курсов в вузах. Это, наряду с гарантией новизны, важности и интересности работ делало поступление выпускников вузов на предприятия соответствующего профиля привлекательным и престижным. Эта ситуация была типичной для множества вновь появившихся предприятий, география размещения которых на территории СССР быстро расширялась.

В конце 1940 — начале 1950-х годов для форсирования разработок ЭВП СВЧ были:

1. Созданы и получили развитие научно-производственные мощности по разработке отечественных радиолокационных систем и комплексов, что означало наличие прогрессирующего потребителя для предприятий-разработчиков и производителей ЭВП СВЧ (магнетронов, ЛБВ, клистронов, рядников и др.).

2. Начаты собственные разработки и выпуск магнетронов, в том числе с использованием опыта воспроизведения зарубежных магнетронов. При этом из технических «базовых» решений к началу 1950-х годов следует считать практически освоенными:

- основные разновидности резонаторных систем, предназначенных для работы на π -виде колебаний;
- основные конструкции выходных устройств — коаксиальные, волноводные, коаксиально-волноводные;
- основные виды и методы механической перестройки частоты;
- оксидные подогревные катоды и др.
- фрагменты методик расчета и проектирования магнетронов. Это в условиях дальнейшего развития означало возможность отхода от методов «масштабного» копирования и блуждающего эмпирического подбора и в создании новых образцов.

3. Укомплектовано минимально необходимое технологическое оборудование для монтажа, отжига, запайки, заварки и откачки магнетронов металlostеклянной конструкции. Частично укомплектовано (главным образом в 10- и 3-сантиметровом диапазоне) СВЧ измерительное оборудование в начале на примитивном уровне, а по мере развития происходило пополнение все более совершенными средствами. При этом и разработка технологического оборудования, и разработка новых средств измерительной техники производились как силами собственных подразделений на предприятиях-разработчиках и производителях ЭВП СВЧ, так и силами специализированных предприятий, созданных (или спрофилированных) применительно к обеспечению соответствующей техникой, методиками и технологиями предприятий радио- и электронной промышленности.

При всем этом разработки СВЧ-приборов в ОАО «Плутон» осуществлялись в достаточно высоком темпе и с нарастающим техническим уровнем, в целом соответствующем зарубежному, а порой и опережающем по ряду параметров и характеристик.

Значительный вклад в разработку магнетронов на предприятии «Плутон» внесли Атласман А.В., Бабич Г.И., Веселовский В.К., Гаврилин И.М., Гурко А.А., Дебелов Д.Т., Зыбин М.Н., Копылов М.Ф., Королев Б.А., Кукушкина З.В., Ледовский Н.П., Малышев Ю.А., Марголис Л.М., Марин В.П., Меркушов В.И., Налимов М.А., Огиевская А.П., Пролейко В.М., Савин В.Б., Седов П.И., Севрюгин В.К., Соловьев В.И., Цейтлин И.А., Шлифер Э.Д., которые были главными конструкторами ОКР и научными руководителями НИР.

2.2. Микроэлектроника

С.В. Якубовский,
кандидат технических наук

Гибридные микросхемы

Первые интегральные микросхемы, разработанные в Советском Союзе, были созданы НИИТТ в Зеленограде в 1965 году. Это была серия цифровых микросхем 201, разработанных по теме «Тропа-1». Цифровые микросхемы представляют собой электронные устройства, позволяющие строить практически все узлы и блоки электронных вычислительных машин (ЭВМ). Основные электрические параметры цифровых интегральных микросхем — быстродействие и потребляемая мощность. Схемы серии 201 были изготовлены по гибридной технологии с толсто пленочными резистивными элементами. В качестве активных элементов использовались бескорпусные транзисторы «Плоскость», разработка которых была проведена в НИИ «Пульсар», а серийное изготовление освоено коллективом НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ). Быстродействие микросхем серии 201 лежало в пределах 400–500 нс.

Эти первые микросхемы, несмотря на малую степень интеграции, были применены в бортовой вычислительной машине «Аргон-1», на которой в то время строились автоматизированные системы управления войсками, системы управления мобильными ракетными комплексами, системы топопри-вязки.

Номенклатура гибридных толсто пленочных микросхем получила свое развитие. Были разработаны серии 202 и 215 с ДТЛ-логикой. Причем быстродействие микросхем 202 серии было доведено до 200 нс, а серии 215 — до 80 нс. На базе серий 201, 202 и 215 была создана вычислительная машина «Аргон-10м» с быстродействием до 1000 операций в секунду. Эта ЭВМ была основой системы управления воздушным движением в зоне аэродрома. Разработанная система позволила отказаться от покупки аналогичной шведской, стоимость которой в несколько раз превосходила стоимость отечественного оборудования.

БЦВМ «Аргон-11с», в которой также были использованы интегральные микросхемы серии 201, была широко задействована в лунной программе и исследовании дальнего космоса (управление движением луноходов, полет

ракеты на Венеру). Следующие БЦВМ «Аргон-12а» и «Аргон-12с» были разработаны для орбитальной пилотируемой станции. БЦВМ «Аргон-12а» на борту станции выполняла управленческие функции, к которым относятся управление телеметрическим и специальным фотографическим оборудованием, управление радиоизмерительной системой и гироскопами, проведение расчета траектории полета станции и т.п. В функции БЦВМ «Аргон-12с» входило управление возвращаемого аппарата. Основой этих БЦВМ были также микросхемы 201 серии. Разработка микросхем этих серий проводилась в конце 1960-х годов.

Примерно в эти же годы в Зеленограде начались работы по созданию технологии (НИИТТ), материалов (НИИМВ) и оборудования (НИИТМ) для производства тонкопленочных гибридных интегральных схем. Результатом этих работ была организация разработки и серийного производства тонкопленочных интегральных микросхем.

Первой серией цифровых гибридных тонкопленочных микросхем была 217 серия, разработанная по теме «Посол» в 1969 году.

Схемы имели среднюю частоту выходного сигнала, равную 1,5 МГц, и максимальную потребляемую мощность 60 мВт. В отличие от толстопленочных изделий в качестве активных элементов в тонкопленочных микросхемах использовались транзисторы с жесткими выводами (так называемые «шарики»). Жесткие выводы на транзисторах позволяли автоматизировать монтаж этих компонентов на подложку микросхемы.

Серия 217 и явилась элементной базой высокопроизводительных ЭВМ для средств противоракетной обороны СССР в 1960-х годах. Радиолокатор обнаружения и сопровождения летящих баллистических ракет мог быть создан только с использованием цифровой вычислительной техники. На этапе разработки локатора и было предусмотрено создание высокопроизводительной ЭВМ, элементной базой для нее послужил набор высокочастотных транзисторов типа П416, 2Т301, П609 и диодов. ЭВМ получила наименование М-4, а после модернизации — М4-2М.

Серия 217 стала элементной базой для ЭВМ нового поколения — М-10. На базе трех машин М-10 был сформирован вычислительный комплекс для командного пункта системы предупреждения о ракетном нападении (5К31). ЭВМ имела производительность более чем в 20 раз большую, чем у комплекса на М-4. Машина содержала 386000 микросхем. На базе ЭВМ М-10 был разработан вычислительный комплекс для радиолокационной станции дальнего обнаружения комплексов противоракетной обороны.

Со временем гибридная технология в производстве цифровых интегральных схем практически была исключена из технологического процесса, но продолжала широко применяться при создании, в основном, аналоговых интегральных схем и микросборок. Так, например, гибридная технология применялась на начальных стадиях развертывания работ по микроэлектронике в Киевском НИИ микроприборов, в Вильнюсском конструкторском бюро, в Рижском НИИ микроприборов.

Для увеличения степени интеграции изделий электронной техники с целью уменьшения весовых и габаритных характеристик аппаратуры подводных лодок в Вильнюсе была поставлена работа по разработке конструкторско-технологической базы для создания больших гибридных интегральных

микросхем. Созданная технология производства включала разработку специализированного металлостеклянного корпуса. Активными элементами в схемах служили бескорпусные интегральные микросхемы серии 156 с гибкими выводами. Гибридные микросхемы получили маркировку серия 240. Это технологическое направление в Вильнюсском КБ было продолжено: по заказу НИЦЭВТ в 1974 году были выпущены большие гибридные схемы серии 216, которые стали элементной базой для БЦВМ «Аргон-30» и «Аргон-30а».

Полупроводниковые микросхемы

В начале 1960 года в НИИ «Пульсар» начались работы по созданию планарной технологии кремниевых приборов. Коллектив разработчиков впоследствии был переведен в НИИМЭ. Первой работой сотрудников была организация производства бескорпусного кремниевого транзистора по теме «Плоскость», получившего наименование 2Т317. Этот транзистор нашел самое широкое применение в гибридных интегральных микросхемах.

Так как планарная технология на кремнии являлась основой изготовления интегральных микросхем, производство НИИМЭ было оснащено необходимым оборудованием. В новую отечественную линию «Корунд» входили участки механической обработки полупроводниковых пластин, изготовления фотшаблонов, фотолитографии, эпитаксии, а также термическое, измерительное оборудование.

Первая интегральная полупроводниковая микросхема была разработана в НИИМЭ по теме «Иртыш» и представляла собой два транзистора на одном кристалле с объединенными коллекторами и одинаковыми характеристиками (серия 101). Эта схема выполняла функцию механического реле с быстроедействием большим, чем у механического аналога. Микросхема получила широкое распространение в разработке радиоэлектронной аппаратуры благодаря идентичности характеристик обоих транзисторов.

Следующий этап — разработка полупроводниковых цифровых интегральных микросхем серии 113 и технологии производства ИС с мощностью рассеивания 0,7–1,5 мВт на вентиль.

Работа проводилась для высокоорбитальной космической системы и была закончена в мае 1969 года. Особенности этих микросхем — использование в конструкции тонкопленочных напыленных резисторов. Впоследствии из-за отказов резисторов схемы были модернизированы: в них стали применяться диффузионные резисторы вместо напыленных.

Микромощные интегральные микросхемы серии 113 нашли применение в бортовых ЭВМ для авиации, создание которых на имеющихся электронных элементах с заданными характеристиками было невозможным.

Серия цифровых схем на основе диодно-транзисторной логики разрабатывалась по темам «Логика» (серии 109 и 121) (рис. 2.2.1) и «Логика-1» (серия 156).

Микросхемы имели время задержки выключения 100–150 нс и среднюю потребляемую мощность 20–30 мВт. Серия 121 предназначалась для использования в радиолокаторах среднего радиуса действия, в станках с числовым программным управлением и в системах связи, серия 156 — в аппаратуре подводных лодок.

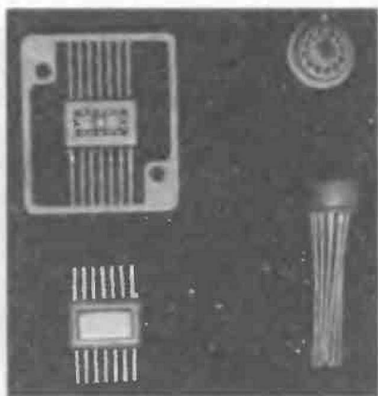


Рис. 2.2.1. Микросхема серии 109

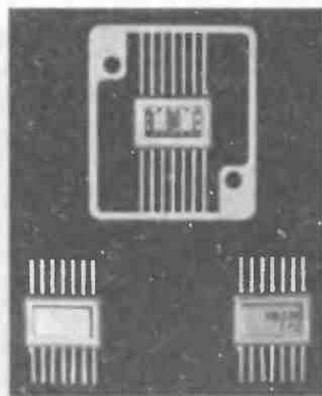


Рис. 2.2.2. Полупроводниковая цифровая микросхема серии 133

Цифровые логические интегральные схемы, о которых говорилось выше, разрабатывались в виде набора универсальных, функциональных узлов. Это были вентили, расширители, сумматоры, триггерные схемы и т.д. Набор узлов позволял строить процессоры любых ЭВМ. Зарубежных аналогов этих схем не существовало.

В 1967 году НИИМЭ начал разработку серий цифровых микросхем (серия 133) на основе транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), параметрический ряд которых охватывал широкий диапазон по быстродействию и потребляемой мощности (ОКР «Логика-2»). Параметры интегральных схем — рабочая частота 5-10 МГц, мощность рассеяния не более 22 мВт на 1 вентиль (рис. 2.2.2). Разработка была закончена в сентябре 1969 года.

В 1971 году была начата работа по созданию вычислительной машины детального анализа отраженного сигнала для комплекса ракетно-космической обороны. Необходимо было создать вычислительный комплекс, который имел бы производительность в 30 раз большую, чем существующий, построенный на полупроводниковых диодах и транзисторах. Проект новой машины получил название «Эльбрус-1». Комплекс «Эльбрус-1» из 10 процессоров был разработан на микросхемах 133 серии, он нашел применение в оптоэлектронных комплексах «Окно» и «Окно-С» для контроля космического пространства и обнаружения высокоорбитальных космических объектов.

В конце 1970-х годов в связи с появлением в США новых баллистических ракет «Трайидент-1» значительно возросли требования к характеристикам станций предупреждения о ракетном нападении. Пропускную способность радиолокационных станций необходимо было увеличивать на порядок. Точность измерения дальности до цели должна была быть повышена в разы, помехозащищенность — примерно на порядок. И, наконец, максимальная дальность действия должна была быть увеличена до дальности обнаружения искусственных спутников Земли на стационарных орбитах. Радиолокационная станция, отвечающая этим требованиям, была создана и получила наименование «Дарьял-У». Для обработки информации потребовался высокопроизводительный вычислительный комплекс, элементной базой для

которого стали интегральные микросхемы с ТТЛ-логикой (серии 133, 130, 530 и другие) и микросхемы для запоминающих устройств. ЭВМ получила наименование М-13. Производительность центральной процессорной части ЭВМ достигала 48 млн. операций в секунду.

Расширение областей применения вычислительной техники потребовало создания новых ИС. В 1967 году НИИМЭ приступает к разработке еще трех серий интегральных микросхем. Серия 130 — схемы высокого быстродействия, с задержкой распространения сигнала 6 нс на вентиль при мощности потребления 22 мВт на вентиль. Серия 136 — схемы маломощные, мощность потребления 2 мВт на вентиль. И расширение уже известной серии 133. Все вместе 130, 133 и 136 серии представляют собой комплекс, совместимый по функциональному составу, цоколевке, напряжению питания, логическим уровням, условиям эксплуатации и конструкции. К разработке и изготовлению интегральных микросхем указанных серий привлекался ряд предприятия электронной промышленности. Большой вклад в дело пополнения номенклатуры серии 133 внесли Минское ПО «Интеграл», ПО «Электронприбор» в г. Фрязино.

Параллельно с разработкой и изготовлением микросхем в плоском корпусе для военной техники уже упомянутых серий производилась разработка микросхем в пластмассовом корпусе ДИП. Эти схемы получили номера серий 131, 155 и 158. По функциональному составу набор схем этих серий был подобен набору схем серий 130, 133 и 136 соответственно.

Всего к концу 1975 года электронной промышленностью были разработаны и изготавливались микросхемы 130 серии — 10 типов, 131 серии — 10 типов, 133 серии — 24 типа, 136 серии — 8 типов, 155 серии — 41 тип, 158 серии — 10 типов. Топологии микросхем приведены на рис. 2.2.3 и 2.2.4.

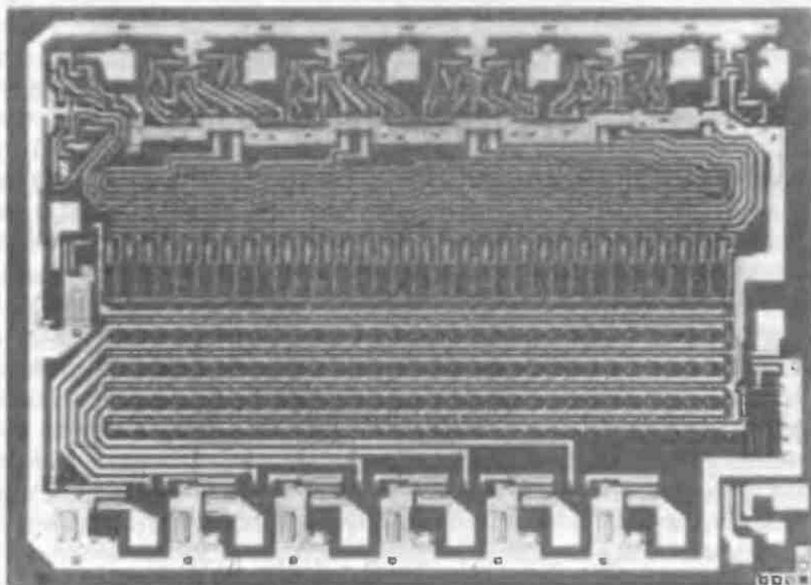


Рис. 2.2.3. Топология преобразователя двоично-десятичного кода в двоичный и двоичного в двоично-десятичный 133ПР, 133ПР7

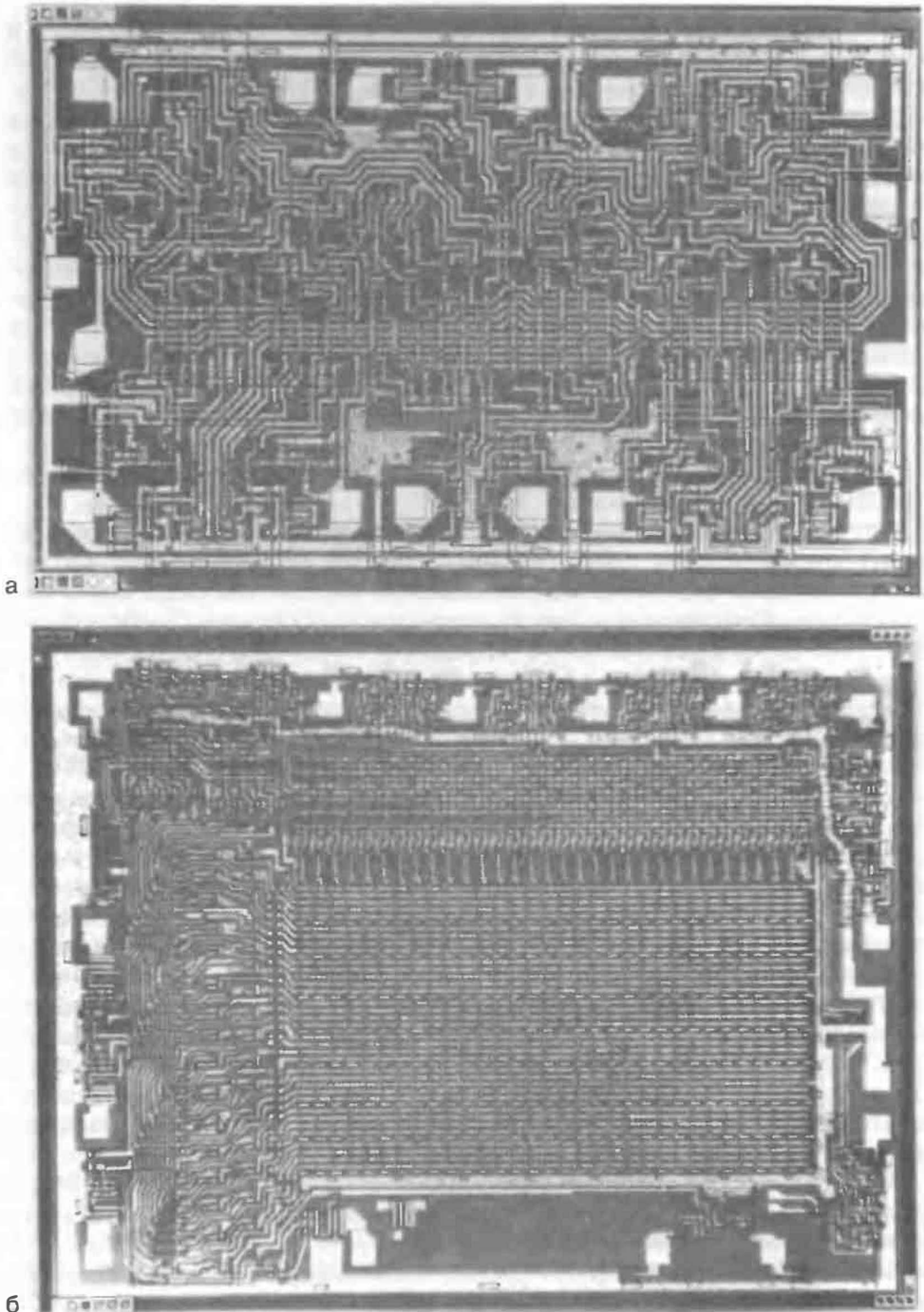


Рис. 2.2.4. Топология микросхем: а — преобразователь двоичного кода в код знаков русского алфавита К155РЕ21, б — 4-разрядный двоичный реверсивный счетчик 133ИЕ7

В конце 1967 года принимается решение о необходимости разработки и организации массового производства универсальных ЭВМ для всех отраслей народного хозяйства с производительностью до 500 тыс. операций в секунду. В качестве элементной базы в машинах ЕС-1020 и ЕС-1030 используется серия 155. В 1975–1977 годах были проведены работы по модернизации этих моделей — в ЕС-1050 стали применяться схемы с ЭСЛ-логикой серии 137 и 138. Использование схем тех же серий, но с более высокой степенью интеграции позволило сократить общее число применяемых в машинах микросхем и уменьшить количество типовых модулей — основных конструктивно-функциональных элементов ЭВМ. Применение схем с ТТЛ логикой намечалось и в разработках ряда управляющих и клавишных машин системы АСВТ. Предприятия связи приступили к разработке телефонных станций с импульсно-кодовой модуляцией для городской, сельской и междугородней связи («Кварц», «Квант», «Квадрат»). Основной элементной базой в этих станциях были схемы серии К155.

Перечень аппаратуры, в которой были использованы эти серии в 1974 году, включал 142 наименования.

С течением времени возрастали требования разработчиков радиоэлектронной аппаратуры к техническим характеристикам интегральных микросхем. Необходимо было снижать рассеиваемую мощность и увеличивать быстродействие. Стандартные значения мощности рассеивания 22 мВт и быстродействие 10 МГц уже никого не устраивали. Необходимо было также повышать удельную плотность элементов на единицу площади кристалла, т.е. располагать на кристалле той же площади большее количество элементов. Для решения этих задач в 1972 году в НИИ молекулярной электроники были разработаны логические схемы с транзисторно-транзисторной логикой с диодами Шоттки. Эти серии были двух видов — высокого быстродействия (серии 530 и К531) с рассеиваемой мощностью на логический элемент 19 мВт и рабочей частотой 50 МГц и маломощные (серии 533 и К555) с рассеиваемой мощностью 2 мВт и частотой 15 МГц. В разработке и изготовлении этих схем участвовали предприятия Баку, Тбилиси, Кишинева, Вильнюса. Отдельные схемы были разработаны на Ленинградском объединении «Светлана». Микросхемы этих серий нашли самое широкое применение у разработчиков радиоэлектронной аппаратуры. В качестве примера можно привести БЦВМ «Аргон-17» и «Аргон-17а», в которых были использованы серии 530 и 533 наряду с сериями 106 и 134. Эти БЦВМ предназначались для систем управления противоракетных комплексов ПРО. В БЦВМ наряду с перечисленными сериями был применен и микропроцессорный комплект серии 583.

Примерно такая же элементная база была использована при разработке в начале 1980-х годов БЦВМ «Ц-100», предназначенной для систем управления вооружением истребителей МиГ-29 и Су-27.

Наряду с биполярными логическими схемами широкое распространение получили микросхемы на полевых структурах. В цифровых микросхемах практическое применение получили полевые транзисторы с оксидной изоляцией, образующие структуру металл-окисел-полупроводник (МОП). По типу проводимости полевые транзисторы делятся на транзисторы с каналами р- и n-типов.

Первая серия микросхем на МОП-структурах (серия К172) разрабатывалась в Киевском НИИ микроприборов с использованием рМОП-транзисторов. Состав серии был ограничен четырьмя логическими схемами (до 30 элементов на кристалле) и триггерной схемой с входной логикой. Эти схемы имели малое быстродействие ($t=1$ мкс), большую мощность потребления (40 мВт/логический элемент) и большие (по абсолютной величине) уровни выходного напряжения, несовместимые с уровнями микросхем ТТЛ. На базе этой серии были разработаны настольные вычислительные машины (типа «Искра» и др.), которые длительное время выпускались для народного хозяйства.

В 1972 году в НИИ молекулярной электроники была начата разработка серии интегральных микросхем на комплементарных МОП-транзисторах (серия 164), которая должна была служить элементной базой для аппаратуры, размещаемой на подвижных объектах. Выполнение требования минимальной потребляемой мощности обеспечивалось микросхемами на КМОП-структурах. Микросхемы выпускались в плоском металlostеклянном корпусе. Параллельно с разработкой серии 164 шла разработка ее аналога, который выпускался в пластмассовом корпусе ДИП с вертикальным расположением выводов. Предполагалось использовать эти микросхемы в станков с числовым программным управлением. В июне 1974 года началось серийное изготовление серии К176. Хотя впоследствии эта серия нашла самое широкое применение в электронной аппаратуре, ее технические характеристики не могли удовлетворить разработчиков РЭА: питающее напряжение было фиксированным, быстродействие схем — сотни наносекунд, нагрузочная способность низкая — порядка 0,05 мА.

Следующим поколением цифровых интегральных микросхем на КМОП-структурах была серия 564 (рис. 2.2.5).

В марте 1973 года в ОКБ Новосибирского завода полупроводниковых приборов начались исследования по разработке конструкции и технологии изготовления интегральных микросхем на КМОП-транзисторах, способных сохранять работоспособность при изменении питающего напряжения в диапазоне от 3 до 15 В. Значения токов нагрузки должны быть повышены до 0,25 мА. Работы были начаты в сентябре 1975 года. Так как в таких микросхемах были заинтересованы многие предприятия оборонного комплекса, было принято решение о подключении к разработкам НИИТТ (г. Зеленоград) и ОКБ завода «Экситон» (г. Павловский Посад). В апреле 1976 года началось изготовление первых микросхем серии 564, которые нашли самое широкое применение в аппаратуре, где основным требованием было малое потребление энергии. В 1979 году началось изготовление микросхем серии К561 — аналога серии 564, но в пластмассовом ДИП-корпусе.

Применение интегральных микросхем в бортовой аппаратуре привело к необходимости повышения их устойчивости к специальным воздействующим факторам. Были разработаны микросхемы серии 1526 с повышенной спецстойкостью, которая была достигнута благодаря определенным технологическим решениям.

В 1982 году новые требования к радиоэлектронной аппаратуре послужили основанием к разработке третьего поколения цифровых КМОП-микросхем, в котором, по сравнению с серией 564, в 5–7 раз, должно было быть

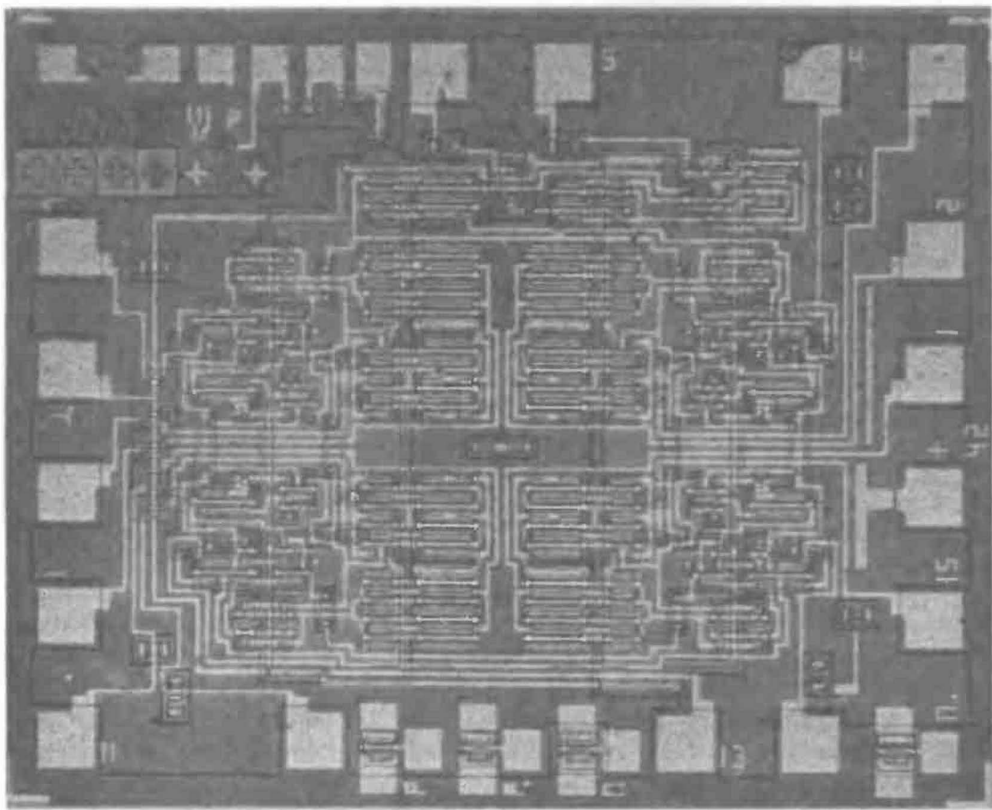


Рис. 2.2.5. Счетверенный Д-триггер 564ТМЗ

повышено быстродействие (30–50 нс) и в 16–20 раз — нагрузочная способность. Микросхемы (серия 1564) начали разрабатываться в апреле 1984 года. К работе были привлечены завод «Протон» (г. Орел) и НПО «Интеграл» (г. Минск). Новые схемы заменили в аппаратуре схемы серии 533 (ТТЛ ИС с диодами Шоттки), это позволило снизить энергопотребление в 10 раз, габариты в 2 раза, массу в 3 раза. Первые микросхемы серии 1564 были созданы ноябре 1985 года.

Развитие номенклатуры экономичных микросхем с высоким быстродействием ускорило процесс создания бортовой аппаратуры ракет. Если в конце 1960-х годов бортовая ЦВМ, созданная на основе гибридных интегральных микросхем серии 201 («Тропа»), из-за малой степени интеграции и недостаточной надежности не могла быть поставлена на боевые ракеты, то с появлением полупроводниковых интегральных микросхем серии 106 («Таран»), разработанных на Воронежском заводе полупроводниковых приборов, эта проблема была решена.

Интегральные микросхемы серии 106 стали основной элементной базой и для БЦВМ типа «Аргон».

«Аргон-16», разработанная в 1973 году на этой же элементной базе, была установлена на космических кораблях типа «Союз» и «Прогресс», а также на



орбитальных станциях «Салют», «Мир» и «Алмаз». За время своей эксплуатации эти БЦВМ не имели ни одного функционального отказа.

Преимущества применения интегральных микросхем по сравнению с дискретными приборами и схемами малой степени интеграции особенно наглядно можно продемонстрировать при сравнении аппаратуры управления ракетных комплексов морского подводного базирования. Так, бортовая вычислительная машина системы управления, изготовленная на базе дискретных полупроводниковых приборов, имела вес 17 кг, потребляла 90 Вт и имела быстродействие 20000 операций в секунду.

Бортовая вычислительная машина, изготовленная на микросхемах серий 106, 134 и других, имела вес 7 кг, потребляла 75 Вт при быстродействии 90000 операций в секунду.

Следующему поколению аппаратуры требовались решения, резко снижающие габариты и массу приборов и бортового цифрового вычислительного комплекса в первую очередь. Выход был найден в создании микросборок частного применения, изготавливаемых непосредственно на аппаратурном предприятии. Они представляли собой керамические платы (подложки) с вакуумным напылением токопроводящих линий и резисторов. Активными элементами в микросборках служили бескорпусные интегральные микросхемы тех же серий с гибкими золотыми выводами, соединение которых с подложкой производилось пайкой. Такое конструктивное исполнение было принято в бортовой аппаратуре (1983 год). Бортовая вычислительная машина весила 11 кг, но потребляемая мощность уже составляла 43 Вт при быстродействии 180000 операций в секунду. В ЭВМ было применено 13820 микросхем.

В бортовой аппаратуре (1986 год) в микросборки начали устанавливать бескорпусные микросхемы с гибкими выводами на полиамиде, которые присоединялись к подложке сваркой. Последнее обстоятельство резко увеличило надежность аппаратуры.

В аппаратуре 1996 года в микросборках использовался микропроцессорный комплект серий 1825 и 1620, также в бескорпусном исполнении на полиамиде. Всего в бортовой системе управления было использовано 12538 микросхем. Бортовая вычислительная машина имела вес 1 кг при потребляемой мощности 15 Вт. Производительность вычислительного комплекса составляла 740000 операций в секунду. Его функциональные возможности по сравнению с аппаратурой, созданной на дискретных компонентах, увеличились в миллион раз, а вероятность отказов уменьшилась на порядок.

Микросхемы для ЭВМ «ЭЛЬБРУС» и системы «РЯД»

Особое место в разработках микросхем для ЭВМ занимают работы по созданию ИС для высокопроизводительных вычислительных комплексов.

В 1973 году принимается решение по развитию вычислительной техники, в рамках которого предусматривается создание новых моделей ЕС ЭВМ «Ряд» с производительностью до 4–5 млн. операций в секунду и мощной системы «Эльбрус-2».

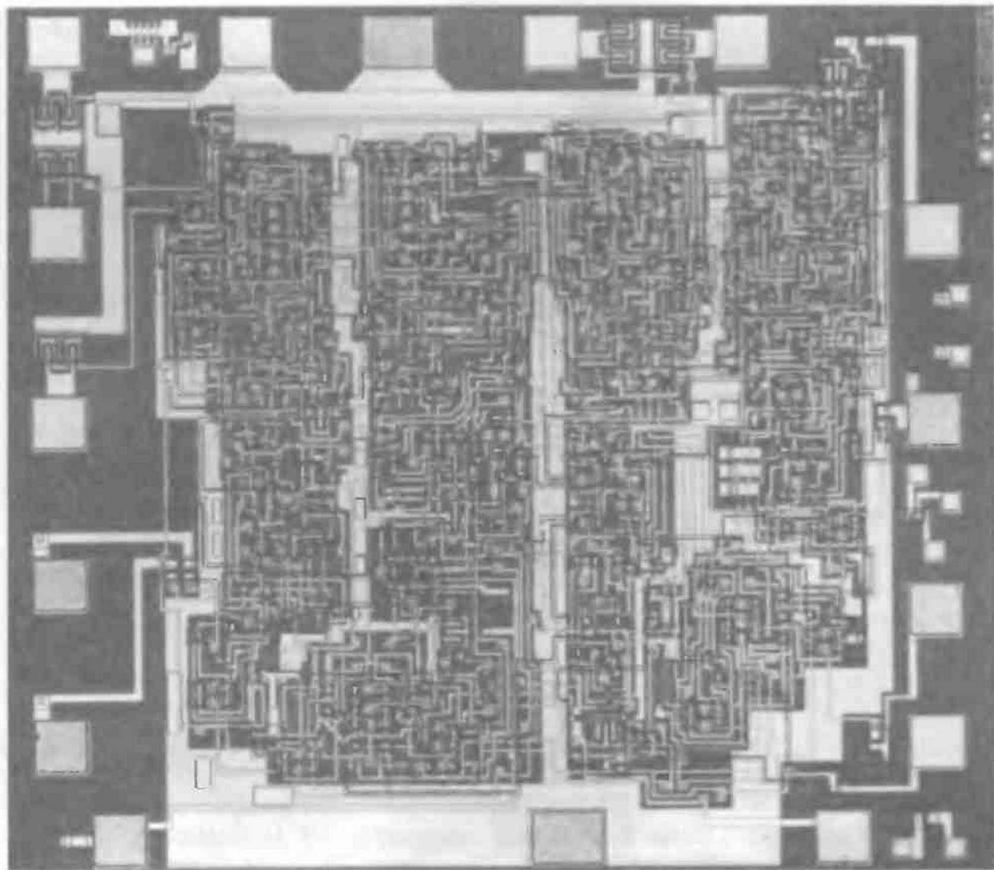


Рис. 2.2.6. Топология микросхемы 100ИЕ137 — счетчик десятичный универсальный

В 1972 году в НИИМЭ были начаты разработки цифровых микросхем с эмиттерно-связанной логикой (ЭСЛ) серии 100 с быстродействием 2 нс на 1 вентиль. Топология приведена на рис. 2.2.6.

Микросхемы представляли собой транзисторные схемы с объединенными эмиттерами. По сравнению с другими типами цифровых схем они обладали большими быстродействием и потребляемой мощностью. Одновременно с НИИМЭ разработка схем для системы «Эльбрус-2» была поручена еще трем предприятиям — НПО «Светлана» (г. Ленинград), НПО «Интеграл» (г. Минск) и НИИ «Вента» (г. Вильнюс). Наличие нескольких разработчиков одной серии микросхем влекло за собой ряд сложностей (изделия должны были работать в едином комплексе, иметь одинаковые электрические параметры, разброс которых по величине не должен превышать максимальные или минимальные значения). Работы по созданию микросхем велись до апреля 1974 года.

Параллельно с разработкой интегральных микросхем серии 100 шла разработка серии 700. По функциональному составу серия была подобна се-

рии 100. Однако по конструктивному исполнению она выпускалась без корпуса на полиамидном носителе.

Разработка конструкции и технологии бескорпусных микросхем серии 700 была впервые выполнена в НИИМЭ и впоследствии широко применялась другими предприятиями электронной промышленности.

Бескорпусное исполнение интегральных схем было необходимо предприятиям-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры при создании микросборок частного применения. Технические условия на серию 700 с военной приемкой появились в марте 1975 года.

Наряду с микросхемами серии 100 при создании ЭВМ «Эльбрус-2» использовались также многокристальные гибридные микросхемы, активными элементами которых были бескорпусные микросхемы серии 700. Разработка ЭВМ была завершена в 1984 году. Машина имела производительность, равную 125 миллионам операций в секунду, и оперативную память в 16 мегабайт. «Эльбрус-2» прошел испытания и поступил на вооружение. По два 10-процессорных комплекса были установлены на объектах противоракетной обороны.

В 1986 году началась разработка ЭВМ «Эльбрус-3». Машина предназначалась для замены устаревающих вычислительных комплексов систем противоракетной обороны, предупреждения о ракетном нападении и контроля космического пространства. Быстрое развитие микроэлектроники предопределило использование в «Эльбрусе-3» новой элементной базы. В 1985 году рядом предприятий были закончены разработки интегральных микросхем серии 1500. Это были схемы с ЭСЛ-логикой. Отличались схемы быстродействием: серия 100 — 2 нс, серия 1500 — 0,75 нс. Кроме схем серии 1500 в «Эльбрусе-3» находят применение большие матричные интегральные микросхемы на основе базового матричного кристалла (БМК), разработка которых была проведена в НИИ молекулярной электроники. БМК представлял собой часть полупроводниковой пластины, на которой создавались интегральные микросхемы с различными функциями. Последнее достигалось избирательным соединением нескоммутированных элементов, которые в базовом матричном кристалле были расположены регулярно. В 1986 году по темам «Ирбис-300с» и «Ирбис-300б» были созданы базовые матричные кристаллы емкостью 1000 и 1300 вентилях (серии 1520 и 1521).

На основе базовых матричных кристаллов был создан набор больших матричных интегральных микросхем (рис. 2.2.7), которые наряду с серией 1500 явились основой элементной базы «Эльбруса-3». Из-за известных событий конца XX века разработанная ЭВМ была выпущена только в четырех экземплярах и на вооружение не была принята.

Параллельно с разработкой серии 100 в НИИМЭ, НПО «Светлана», НПО «Интеграл» и НИИ «Вента» шла работа над серией 500. Функциональный набор схем в сериях 100 и 500 (рис. 2.2.8) был одинаковый. Разница между ними заключалась в корпусе: ИС серии 100 выпускались в плоском корпусе с выводами, расположенными горизонтально, ИС серии 500 — в пластмассовом корпусе типа ДИП с выводами, расположенными вертикально.

Микросхемы серии 500 послужили основой элементной базы для ЭВМ, принадлежащих к серии «Ряд-3», разработка которых проходила в середине 1980-х годов. Структура этих ЭВМ продолжала развитие машин серии

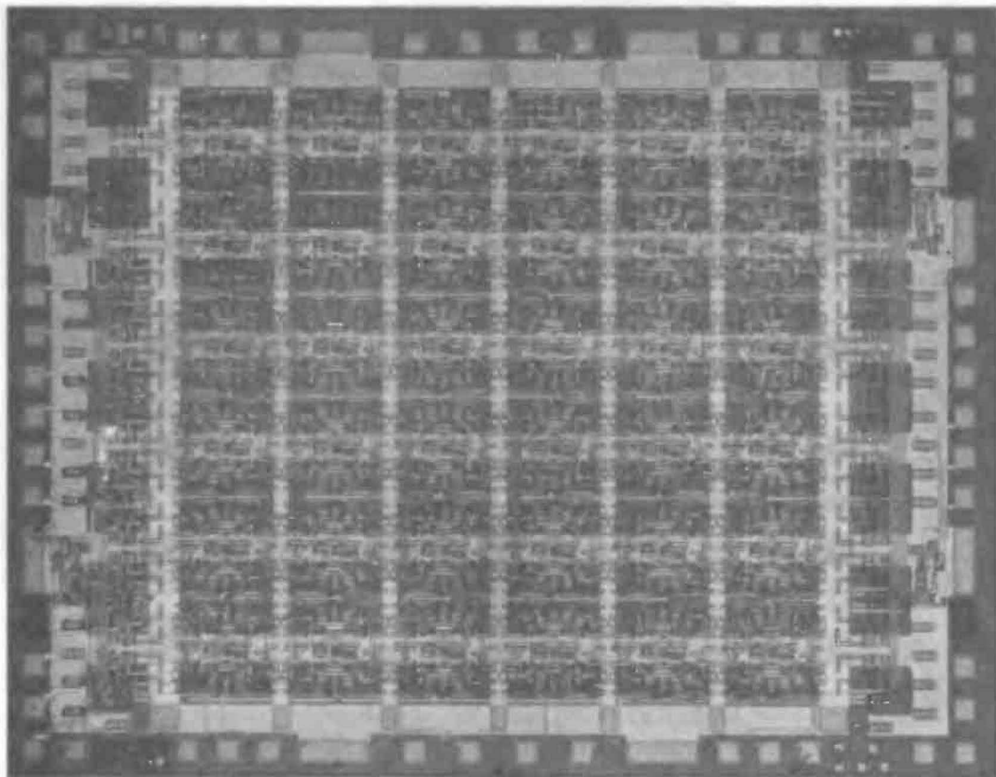


Рис. 2.2.7. Матричная БИС «Ирбис И-200»

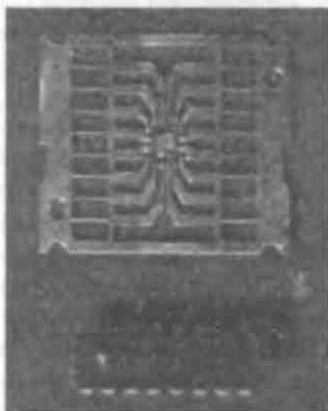


Рис. 2.2.8. Микросхема серии 500

«Ряд-2», но с использованием в них интегральных микросхем серии 500 с более высокой степенью интеграции, а также полупроводниковых запоминающих устройств емкостью 4, 16 и 64 Кбит вместо ферритовой памяти. Элементной базой ЭВМ «Ряд-4» в 1994 году была, как и для «Эльбруса-3», базовые матричные кристаллы «И-300» и интегральные микросхемы серии 1500. Производительность ЭВМ этого ряда составляла 10 и 50 млн. операций в секунду.

Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи¹

Широкое распространение цифровых вычислительных машин в устройствах обработки текущих сигналов (например, входных сигналов в радиолокационных станциях) требовало применения устройств как для прямого преобразования исходной аналоговой величины в соответствующий ей цифровой эквивалент, так и обратного преобразования входных цифровых данных в пропорциональные аналоговые уровни. До появления специализированных интегральных микросхем разработчики радиоэлектронной аппаратуры проектировали ЦАП и АЦП с использованием отдельных цифровых и аналоговых микросхем, в число которых входили операционные усилители, компараторы, буферные ключевые схемы, источники опорного напряжения, резистивные матрицы и логические устройства. По этому принципу строились и ЦАП и АЦП на печатных платах размерами в десятки квадратных сантиметров.

Основные характеристики ЦАП — разрешающая способность, время установления выходного сигнала и максимальная частота преобразования, основные характеристики АЦП — разрешающая способность, точность и быстродействие.

Исследования по созданию полупроводниковых интегральных микросхем ЦАП начались в Министерстве электронной промышленности в 1977 году параллельно в Риге и Вильнюсе. В 1978 году после окончания в Риге опытно-конструкторской работы были утверждены технические условия на поставку 10-разрядного ЦАП К572ПА1. Военный аналог этой схемы (572ПА1), разработанный по теме «Разна-2», появился уже в 1979 году. Время установления выходного значения сигнала в этой схеме было равно 5 мкс, технология — КМОП. В это же время в Вильнюсе разрабатывается 12-разрядный ЦАП 594ПА1 с временем установления 3,5 мкс, технология — биполярная с изоляцией p-n-переходом.

В 1980-х годах в Риге была начата разработка серии 1108, в которую были включены быстродействующие и прецизионные ЦАП: 1982 год — 1108ПА1 на 12 двоичных разрядов и временем установления 400 нс, 1986 год — 1108ПА2, ЦАП на 8 разрядов, сопрягаемый с микропроцессором и временем установления 1 мкс, и, наконец, 1988 год — 1108ПА3, ЦАП на 6 разрядов, но с временем установления 100 нс. В серии микросхем 1113 был разработан функционально законченный 12-разрядный ЦАП (1113ПА1), время установления которого 2,5 мкс.

В 1980-х годах в Вильнюсе по заказам отдельных аппаратостроительных предприятий также проводились работы по созданию ЦАП и АЦП с определенными параметрами и характеристиками. В 1985 году был создан сверхбыстродействующий 8-разрядный ЦАП 1118ПА1 с временем установления 30 нс, в 1986 году — 10-разрядный ЦАП 1118ПА2 с временем установления 80 нс, в 1987 — 8-разрядный ЦАП 1118ПА3 с временем установления 10 нс, в 1989 — 10-разрядный ЦАП с временем установления 10 нс.

В 1983 году в эту же серию была включена интегральная микросхема 1108ПВ — АЦП на 10 двоичных разрядов с максимальной частотой преобразования 1,5 МГц.

¹Частично использован материал, полученный от В.А. Тельца.

В 1986 году в Вильнюсе создано 6-разрядное АЦП (1107ПВ1) с частотой квантования 20 МГц и временем преобразования 100 нс и 8-разрядное АЦП (1107ПВ2) с той же частотой квантования, но с временем преобразования 95 нс. В 1986 году был разработан 6-разрядный АЦП с ЭСЛ-выходом с частотой преобразования аналогового сигнала 100 МГц и временем установления 20 нс (1107ПВ3), в 1992 году — 10-разрядный преобразователь 1107ПВ6 (частота преобразования 20 МГц) и функционально законченный АЦП на 10 двоичных разрядов с временем установления 30 мкс.

Микропроцессоры

Непрерывное повышение степени интеграции элементов на кристалле и их быстродействия позволили создать новый класс интегральных микросхем — микропроцессоры.

Микропроцессор — это универсальное микроэлектронное цифровое устройство с программируемыми функциями, предназначенное для обработки информации. В его основу заложен структурный принцип построения цифровых ЭВМ. Задачи, выполняемые микропроцессором, и его функционирование определяются программой, записанной в запоминающем устройстве. Лучшие образцы микропроцессоров конструктивно выполняются в виде одной интегральной микросхемы, это так называемый однокристалльный микропроцессор. Микропроцессор может состоять и из нескольких схем. Структура однокристалльного микропроцессора включает в себя следующие функциональные части: устройство управления с датчиком управляющих импульсов и дешифратором команд, собственно процессор как арифметико-логическое устройство, устройство ввода-вывода (мультиплексор), регистр состояний, регистры общего назначения, адресный регистр и регистр результата. Устройство управления принимает коды команды из постоянного запоминающего устройства, куда и заводится программа функционирования микропроцессора. Эти команды дешифруются и формируют последовательность кодов, управляющих работой собственно микропроцессора. Мультиплексор ввода-вывода коммутирует информацию, поступающую в процессор. Регистры предназначены для временного хранения операций и выдаваемых результатов.

Выше уже отмечалось, что микропроцессоры могут состоять из нескольких функциональных частей, представленных отдельными интегральными микросхемами. Этот набор получил название микропроцессорного комплекта. Микропроцессорные комплекты могут включать в себя до 10 микросхем и позволяют конструировать различные цифровые устройства: контроллеры, управляющие блоки автоматических устройств и, наконец, микроЭВМ.

Технология изготовления микропроцессорных комплектов развивалась по двум направлениям: МОП-технология и биполярная, каждая из которых, так же как в цифровых схемах, имеет несколько разновидностей. Первые зарубежные и отечественные микропроцессоры были изготовлены по рМОП-технологии. Однако существенным недостатком этой технологии является принципиальное ограничение по быстродействию. Поэтому, несмотря на простоту и низкую стоимость, рМОП-технология использовалась

только в микросхемах, предназначенных для создания бытовой техники малого быстродействия.

Следующим шагом развития МОП-структур явилась пМОП-технология. Она позволила на порядок по сравнению с рМОП-технологией увеличить быстродействие микропроцессоров. Возможность большой плотности упаковки функциональных элементов в пМОП-структурах, их относительная простота и невысокая стоимость сделали пМОП-технологию основной для изготовления микропроцессорных комплектов среднего быстродействия.

Микропроцессорные комплекты, выполненные по КМОП-технологии, имеют малое потребление, высокую помехоустойчивость и надежно работают в широких диапазонах напряжений питания и температур окружающей среды.

Что касается биполярной технологии изготовления микропроцессоров, то основной является ТТЛШ (с диодами Шоттки)-технология. Она обеспечивает по сравнению с ТТЛ-технологией более низкий уровень потребляемой мощности и позволяет создавать высокоскоростные контроллеры периферийных устройств.

На микропроцессорных комплектах, изготовленных по ЭСЛ-технологии, можно воспроизвести структуру сверхскоростных «больших» универсальных ЭВМ. В зависимости от требований, которые предъявляются к микропроцессорным комплектам, в него могут входить микросхемы, выполненные по различным технологиям, например: пМОП и ТТЛШ, ЭСЛ и ТТЛШ.

Первые работы по созданию микропроцессорного комплекта в СССР были начаты в Киевском НИИ микроприборов в августе 1976 года. Разрабатывался микропроцессорный набор на основе п-канальной технологии. В сентябре 1978 года соответствующие технические условия на комплект серии Кр580 были подписаны.

Микропроцессорный комплект серии Кр580 предназначался для построения широкого класса цифровых устройств, контроллеров, микроЭВМ и микропроцессорных систем различного назначения.

Большая функциональная насыщенность, достаточно высокое быстродействие и средняя потребляемая мощность обеспечили этому комплекту широкое применение. Особенности серии Кр580 — фиксированные разрядность (8 разрядов) и система команд — однозначно определяли структуру устройств, построенных на ее основе.

Пример применения микропроцессорного комплекта серии Кр580 — создание микроЭВМ СМ1800, которая предназначалась для систем автоматизированного управления технологическими процессами и систем сбора и обработки информации в машиностроении, энергетике, приборостроении и на транспорте. Машину предполагалось непосредственно встраивать в приборы, агрегаты и установки, а также использовать в качестве персональной ЭВМ. В конце 1979 года машина СМ-1800 успешно выдержала государственные испытания.

В 1977 году в НИИ молекулярной электроники началась разработка шести типов БИС микропроцессорного комплекта ТТЛШ. Разработка была окончена в июне 1978 года и получила наименование — серия 589. Вариант этой серии с военной приемкой в плоском корпусе появился в 1979 году

(серия 585). Схемы были разработаны по заказу КБ-1 и в дальнейшем нашли широкое применение в разработках ОАО «Алмаз», в частности в системах «С-300» и «Триумфатор».

В 1979 году в Вильнюсском КБ была начата разработка микропроцессорного комплекта K1800, предназначенного для построения быстродействующих ЭВМ, контроллеров различного назначения, быстродействующих систем обработки данных. Секционная структура с возможностью наращивания, микропрограмное управление, достаточно полный функциональный состав и совместимость с ЭСЛ-схемами средней степени интеграции и ЗУ позволяли широко использовать серию K1800 при построении быстродействующих систем для обработки информации в реальном масштабе времени.

На основе комплекта из 11 интегральных микросхем, составлявших серию K1800, в 1989 году разработана ЭВМ ЕС-1130, входившая в четвертую очередь Единой системы ЭВМ «Ряд-4». Производительность ЭВМ составляла 2 млн. операций в секунду. По сравнению с аналогичной машиной в Единой системе ЭВМ «Ряд-3» — ЭВМ ЕС-1036 — вновь созданная ЭВМ имела пятикратный рост производительности и занимала вдвое меньшую площадь. Машины выпускались до 1989 года. Всего было изготовлено 230 ЭВМ этого вида.

В 1978 году в НИИ точной технологии проводилась работа по разработке микропроцессорного комплекта среднего быстродействия и средней потребляемой мощности серии Kp1801, выполненного по nМОП-технологии. Его основу составлял 16-разрядный микропроцессор, имеющий фиксированную систему команд фирмы DEC. В состав комплекта входил базовый матричный кристалл Kp1801ВП1, который позволял при минимальных производственных затратах получать микросхемы с самыми разнообразными функциональными возможностями. Последнее обстоятельство определило достаточно широкое использование этого кристалла от контроллеров многофункциональных устройств до контроллеров бытовых телеприемников.

На базе серии Kp1801 в середине 1980-х годов разработана гамма устройств вычислительной техники: ряд диалоговых вычислительных комплексов ДВК1, ряд бытовых компьютеров типа БК-0010 и БК-0011, калькулятор типа «МК-85» и школьная машина УКНЦ. Поставки этих устройств составляли сотни тысяч штук.

Были разработаны для станкостроительной промышленности устройства ЧПУ — «ЭлектроникаНЦ-31», «ЭлектроникаНЦ80-31» и «ЭлектроникаНЦ82-31».

После проведения в 1977–1979 годах научно-исследовательских работ в НИИ молекулярной электроники началась разработка 8-разрядного микропроцессорного комплекта. В 1981 году эта работа была окончена. Микропроцессорный комплект серии Kp1802 и 1802 (двойное применение) был выполнен на основе биполярной технологии ТТЛШ и предназначен для построения быстродействующих контроллеров различного назначения, встроенных автономных мини- и микроЭВМ, устройств автоматики, систем обработки данных, аппаратных умножителей, устройств быстрого преобразования Фурье и т.д.

Разнообразная номенклатура комплекта, возможность параллельного наращивания разрядности, микропрограммный способ управления, совместимость с цифровыми интегральными микросхемами ТТЛ- и ТТЛШ-серий обеспечивали ему широкие возможности применения в различных областях хозяйства и военной техники. В частности, серия 1802 нашла применение в зенитно-ракетных системах «С-300» и «Триумфатор».

В 1988 году закончилась разработка спецстойкого варианта микропроцессорного комплекта серии 1802. Он получил наименование — серия 1822.

Разработка микропроцессорного набора ТТЛ-схем с диодами Шоттки была начата в Воронеже в 1980 году. В состав комплекта входило около 20 интегральных схем, включая 4-разрядную микропроцессорную секцию, предназначенную для обработки данных с разрядностью, кратной четырем. Микропроцессорный набор был предназначен для создания центральных процессоров микроЭВМ с микропрограммным управлением и различными системами команд и других вычислительных устройств высокого быстродействия. Разработка первых шести схем была закончена в конце 1981 года. В этом же году началась разработка серии 1804, по своим функциональным возможностям подобной схемам серии Кр1804. Отличие одних схем от других заключалось в диапазоне рабочих температур и способе герметизации: серия Кр1804 имела температурный диапазон $-10...+70^{\circ}\text{C}$ и выпускалась в пластмассовом корпусе типа ДИП, серия 1804 — диапазон $-60...+125^{\circ}\text{C}$, плоский металlostеклянный корпус.

Схемы серии 1804 были использованы в аппаратуре систем ЗРК «С-300», «Триумфатор», системы «Бисер» для мобильного стратегического комплекса.

В 1983–1985 годах в НИИ точной технологии был разработан новый микропроцессорный комплект со сниженным энергопотреблением (серия 1806, аналог серии 1801) на КМОП-структурах, который нашел широкое применение в бортовых машинах, например на станции «Мир» в системе управления станционным телескопом для наблюдения земной поверхности. Одноплатная ЭВМ «Электроника 84Б», созданная на базе серии 1806, использовалась для обработки полученной информации в аппаратуре космической навигации, в том числе и в первых спутниках космической навигационной и геодезической системы ГЛОНАСС.

В 1991 году был разработан спецстойкий вариант серии 1806, получивший наименование — серия 1836.

Расширение областей применения вычислительной техники в вооружении и в народном хозяйстве требовало разработок микропроцессорных комплектов самых различных функциональных возможностей и эксплуатационных свойств.

С целью совмещения и совместного использования отечественной вычислительной техники с зарубежной велись разработки функциональных аналогов микропроцессорных комплектов фирмы Intel. Была проведена разработка однокристалльного 16-разрядного микропроцессора на основе пМОП технологии (аналог 8086). К 1985 году разработка была окончена, в ней приняли участие, кроме Киевского НИИ микроприборов, завод «Электронприбор» (г. Фрязино) и завод «Родон» (г. Ивано-Франковск). Серия получила номер Кр1810, ее микропроцессорный комплект представлял собой дальнейшее развитие МПК серии Кр580. В отличие от Кр580 он был 16-разрядный. Его бы-

стродействие в 8–10 раз превосходило производительность Кр580 и имело ряд функциональных особенностей, которые позволяли строить на его основе мощные высокопроизводительные и мультипроцессорные системы и, в частности, мини-ЭВМ СМ1810.

Всего за 1986–1993 годы было изготовлено и поставлено потребителям более 18 тыс. мини-ЭВМ СМ1810.

В рамках работ Межправительственной комиссии по сотрудничеству социалистических стран в области вычислительной техники были проведены работы по созданию персональных ЭВМ единой серии. Все эти машины были совместимы с зарубежными ЭВМ фирмы IBM. В качестве микропроцессоров во всех разработанных машинах использовались интегральные микросхемы серии Кр1810.

В 1989 году в НИИ микроприборов (г. Киев) была начата работа по переводу разработанного микропроцессора серии Кр1810 на КМОП-технологию с целью создания быстродействующих и микромощных интегральных микросхем для микропроцессорных комплектов серии Кр1834. Работа была закончена в 1990 году.

Все возрастающие потребности в недорогих многофункциональных устройствах, предназначенных для управления бытовыми приборами, радиоэлектронной аппаратурой, для решения разнообразных задач на низших уровнях управления, могли быть удовлетворены благодаря применению однокристалльных микроЭВМ. Эти ЭВМ отличаются от однокристалльных микропроцессоров тем, что кроме арифметико-логического устройства и устройства управления содержат в одном кристалле оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) небольшого объема, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) команд, генератор, порты ввода/вывода, т.е. являются практически законченными системами управления.

Наиболее целесообразно и перспективно применение однокристалльных ЭВМ в системах, в которых требуемый объем программ не превышает объема внутреннего ПЗУ команд (8–16 Кбит), а для оперативной информации достаточно объема внутреннего ОЗУ (256–1024 бит). В этих случаях использование таких ЭВМ позволяет значительно уменьшить число микросхем в системах и, следовательно, повысить надежность устройства и уменьшить их стоимость.

В 1985 году были закончены следующие разработки ЭВМ:

- однокристалльные ЭВМ серии Кр1814, выполненные по рМОП-технологии (г. Воронеж). Интегральные схемы этой серии представляли собой однокристалльную 4-разрядную микроЭВМ. Быстродействие было невелико, поэтому основная сфера их применения — контроллеры печатающих устройств, кассовые аппараты, бытовая и развлекательная аппаратура;
- однокристалльные ЭВМ, функциональные аналоги интегральных схем фирмы Intel (г. Киев). Микросхемы серии Кр1816 были выполнены по пМОП-технологии и представляли собой серию однокристалльных 8-разрядных ЭВМ. Каждая из схем являлась практически законченной системой управления и содержала в кристалле центральное процессорное устройство, ОЗУ данных, многоканальный интерфейс ввода/вывода, тактовый генератор, схему прерывания и устройство син-

- хронизации. В течение 1985–1986 годов технология изготовления интегральных схем серии Кр1816 была переведена с пМОП на КМОП, в результате чего было снижено энергопотребление и увеличено быстродействие серии. Новая серия получила наименование Кр1830;
- серии однокристальных ЭВМ, выполненных по пМОП-технологии (г. Минск). Разработанные микросхемы имели входные и выходные уровни, совместимые с уровнями ТТЛ-ТТЛШ-схем. Система команд и развитый ввод/вывод схем серии Кр1820 обеспечивали управление широким набором периферийных устройств. К ним относились клавиатура, дисплей, внешние ЗУ, печатающие устройства, контроллеры электроприборов и т.п.

В 1989 году в НИИ точной технологии была закончена разработка гражданского варианта 32-разрядного микропроцессорного комплекта серии 1839 (рис. 2.2.9). В состав комплекта входили кроме собственно микропро-

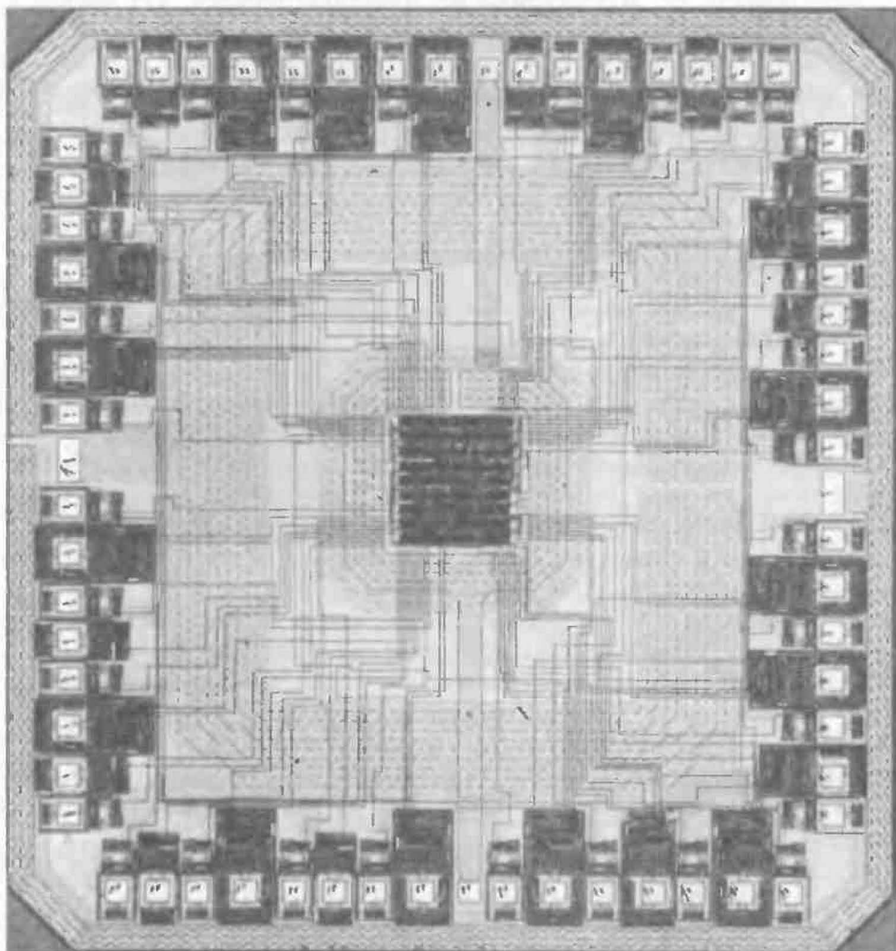


Рис. 2.2.9. Микропроцессорная серия 1839

цессора схемы поддержки — сопроцессор, устройства ввода-вывода, ПЗУ и мажоритарный элемент. Система команд в схемах была совместима с VAX-11. МПК был применен в автоматизированном наземном комплексе обработки информации со спутников.

В 1990-х годах были выполнены разработки 16-разрядного микропроцессора серии 1867 с фиксированной запятой и производительностью до 10 млн. операций в секунду и 32-разрядного процессора той же серии с плавающей запятой и производительностью 30 млн. операций в секунду. Разработанная серия широко применяется практически во всех образцах современной военной техники, включая ЗРК и ракетные системы. В области однокристальных микроЭВМ была разработана серия 1874. Машина имеет 16 разрядов, внутреннее ПЗУ 8Kx8 бит, ОЗУ 232x8 бит и тактовую частоту 12–20 МГц.

Одной из последних работ в области микропроцессорных комплектов является разработка в НИИ системных исследований РАН серии 1890. В комплект входят 32- и 64-разрядные микропроцессоры для выполнения операций с фиксированной и плавающей запятой, а также 32-разрядный двухпортовый микропроцессор и ряд многофункциональных контроллеров, которые позволяют создавать многопроцессорные системы различного применения.

Заключение

Улучшение параметров микросхем и расширение их функциональных возможностей становились возможными благодаря совершенствованию технологии их проектирования и производства.

Первой полупроводниковой интегральной схемой, как об этом было сказано выше, был «Иртыш», на кристалле схемы было сформировано всего два транзистора. В настоящее время в интегральной микросхеме 64-разрядного микропроцессора, выпускаемого в НИИ системных исследований, на кристалле более 3,4 млн. элементов. Таковы возможности высоких технологий, к которым, безусловно, относится и микроэлектроника.

Если говорить в общем, то одной из критических составляющих, которая определяла возможное количество элементов на кристалле, была «ширина линии», или, если точнее, минимальный размер элемента и минимальное расстояние между элементами на кристалле. Чем меньше это значение, тем больше элементов можно разместить на кристалле. А «ширина линии» определялась возможностью фотолитографического оборудования. В конце 1960-х годов повсеместно применялась контактная печать, при которой минимальный размер элемента лежал в пределах 5 мк, что давало возможность проектировать и изготавливать интегральные микросхемы с ТТЛ-логикой с количеством элементов до 50.

В начале 1970-х годов в технологию производства интегральных микросхем началось внедрение проекционной фотолитографии, при которой ширина линии была доведена до 2–3 мк, что позволило довести количество элементов на кристалле до 400. Конец 1970-х годов ознаменовался запуском установки проекционной фотолитографии «584» с шириной линии 1,2–

1,5 мк. Начало следующего этапа пришлось на середину 1990-х годов, когда в технологическом процессе была применена установка фотолитографии «5084» с возможностью доведения минимального размера элемента до 0,8 мк. В 2003 году в НИИ системных исследований был разработан и изготовлен 32-разрядный микропроцессор с применением оборудования, позволяющего получить минимальный размер элемента 0,5 мкм. А в 2005 году минимальный размер был доведен до величины 0,3 мкм, что позволило создать 64-разрядный микропроцессор с количеством элементов на кристалле, о чем было сказано выше, 3,4 млн.

Отмечая значительные успехи в развитии отечественной электроники, следует отметить ряд моментов, которые повлияли на динамику ее развития. Так, в 1960–1970-х годах, когда принимались решения — разрабатывать оригинальные микросхемы для конкретной аппаратуры или воспроизводить функциональные аналоги зарубежных цифровых схем (а воспроизведение зарубежных микросхем впоследствии превратилось в систему), все было довольно просто и понятно. Любая цифровая микросхема выполняет логические функции, которые определяются алгеброй логики. А она во всем мире одинакова. В конце 1970-х годов начались разработки микропроцессоров, в которых происходит обработка информации. Принципы этой обработки определяются его архитектурой и системой команд. А архитектура микропроцессоров бывает не одна, как алгебра логики. В мире к середине 1970-х годов существовали две системы: система для универсальных ЭВМ (больших и персональных) фирмы Intel и система для научного приборостроения фирмы DEC.

В 1969 году на первой сессии Совета главных конструкторов больших машин единой серии была утверждена архитектура новой системы ЭВМ, в качестве которой принята «Система-360» фирмы IBM, которая представлялась целостной, всеохватывающей и перспективной, допускающей развитие как программных, так и аппаратных средств. Аналогичное решение было принято при создании персональных ЭВМ единой системы и семейства ВМ, а также при создании семейства мини-ЭВМ СМ1800.

Однако руководство Министерства электронной промышленности думало иначе. В конце 1970-х годов был взят курс на разработку и изготовление на своих предприятиях не только элементной базы, но и законченных изделий вычислительной техники, включая ЭВМ. Работы по созданию электронных компонентов для проектируемых на предприятиях МЭП изделий проводились в первую очередь. Причем, и это является главным и определяющим, архитектура и система команд была ориентирована на фирму DEC.

Разработкой и изготовлением микропроцессоров, подобных аналогам фирмы Intel, занималось всего одно предприятие (Киевское объединение «Квазар»), тогда как наиболее мощные разрабатывающие силы были сосредоточены в Зеленограде и в Воронеже. По заданиям Министерства полным ходом шли разработки микропроцессорных комплектов серий 588, 589, 1801, 1804, 1806, 1839. Естественно, что эти серии находили свое применение не только в разработках Министерства электронной промышленности. Об этом подробно было сказано выше. Но персональная вычислительная техника, выпуск которой за рубежом увеличивался в разы и которая по

своей архитектуре была привязана к Intel, оставалась у нас на «голодном пайке» с микропроцессорами 8080 и 8086. Министерство радиопромышленности, ответственное в стране за производство ЭВМ, было готово к выпуску ПЭВМ, имея конструкторскую документацию и производственные мощности. Однако из-за отсутствия необходимой элементной базы не смогло выполнить поставленную перед ним задачу. И как следствие, после известных событий 1990-х годов на российский рынок хлынул поток персональной техники и отечественные ПЭВМ уже были никому не нужны. Они не отвечали техническому уровню и были значительно дороже. Время было потеряно. Жизнь, вплоть до сегодняшнего дня, подтверждает значимость уровня развития электроники в стране. Может ли быть высокоточное оружие без микроэлектроники? Может ли существовать ракетно-космическая оборона без микроэлектроники? Могут ли существовать ракетные комплексы РВСН без микроэлектроники? На все эти вопросы есть один ответ — НЕТ!

И в завершение еще одна цитата из минувшего. В 1997 году завершена разработка ЭВМ «Эльбрус-90», предназначенной для замены устаревших машин этого семейства в системах ракетно-космической обороны страны, с использованием импортной элементной базы. Во время испытаний ЭВМ показала наработку на отказ более 9000 часов, что значительно превысило надежность всех предыдущих ЭВМ. Площадь, занимаемая комплексом, по отношению к машинам предыдущего поколения уменьшилась в 1800 раз, число обслуживающего персонала сократилось в 40 раз. Вот что такое возможности микроэлектроники. Но выгоду от нее получает не отечественная промышленность, которая обязана производить эту элементную базу, а друзья наших либералов за рубежом.

Литература

- Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы. Справочник. — М.: Радио и связь, 1989.
- НИИМЭ-«Микрон» 35 лет. События. Люди. — М.: АООТ «НИИМЭ и з-д «Микрон», 1999.
- Шокин А.А. Министр невероятной промышленности СССР. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1999.
- Филиппов Г.А. От восхода до заката. — Екатеринбург, 1998.
- Бердичевский Б.Е. Траектория жизни — М. Аграф, 2005.
- Альперович К.С. Как рождалось новое оружие — М. ОАО «ЦКБ «Алмаз», 1999.
- Зеленая ветвь Москвы. Зеленоград до 2003 года Сборник. — М.: 2003.
- Электронная промышленность, 2001, № 1.
- Первов М.А. Системы ракетно-космической обороны России создавались так. — М.: Авиарус-XXI, 2004.
- Первов М.А. Ракетные комплексы РВСН. — М.: Авиарус-XXI, 1999.
- Виртуальный компьютерный музей. История отечественной вычислительной техники.
- Высоцкий Б.Ф. Инженер-конструктор-технолог микроэлектронной и микропроцессорной техники. — М.: Радио и связь. 1988.

2.3. Полупроводниковая электроника

Ю.А. Кузнецов, кандидат технических наук, профессор;
А.Г. Васильев, доктор физико-математических наук, профессор

В 1940-х годах активно развивались такие области полупроводниковой электроники, как СВЧ-детекторы и выпрямители тока. После публикации в 1948 году статьи Дж. Бардина, У. Браттайна и У. Шокли о создании усиленного полупроводникового прибора («кристаллический триод») интерес к полупроводниковым приборам резко вырос. Описанный авторами прибор в дальнейшем стали называть транзистором. В то время трудно было предвидеть, что разработка и применение транзистора окажет такое большое влияние на радиотехнику, вычислительную технику и другие отрасли. Даже сами авторы высказывали сомнение относительно будущего своего изобретения.

Первые попытки создания отечественного транзистора были предприняты в ряде институтов АН СССР и в НИИ «Исток». Первые германиевые транзисторы С1 и С2 (рис. 2.3.1) стали основой первых отечественных транзисторных приемников и слуховых аппаратов.

В ноябре 1952 года вышел специальный номер авторитетного радиотехнического журнала США «Труды института радиоинженеров», полностью посвященный транзисторам. Перспективность нового направления стала очевидной не только для ученых, но и для руководителей страны. Инициаторами подготовки решений Правительства об ускоренном развитии полупроводниковой отрасли выступили академики А.И. Берг, занимающий тогда должность заместителя министра обороны, и А.Н. Щукин — руководитель Научно-технического совета военно-промышленной комиссии при Совете Министров СССР.

В связи с необходимостью быстрее освоения и внедрения технологии полупроводниковых приборов, разработки соответствующего оборудования и т.д. в 1953 году в Москве был создан НИИ полупроводниковой электроники с опытным заводом, впоследствии НИИ «Пульсар» и завод «Пульсар».

Работы по транзисторам, начатые в 1949 году в г. Фрязино, были закончены сдачей Госкомиссии в конце 1953 года, которая уже работала в НИИ «Пульсар».

В первые годы основное направление работ в области полупроводниковой электроники — это создание германиевых диодов и транзисторов. В 1953–1954 годах были созданы первые в СССР промышленные образцы точечных, а затем и плоскостных транзисторов. Были разработаны конструкция и производственная технология германиевых точечных транзисторов типа П1, П2, ПЗ.

Разработанные транзисторы предназначались для использования в качестве уси-

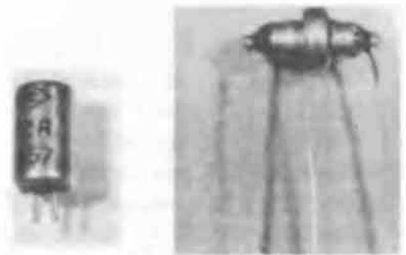


Рис. 2.3.1. Первые германиевые транзисторы С1 и С2

лительного элемента для вновь разрабатываемых средств связи, а также в медицинской технике.

Разработки велись на базе сплавной, сплавно-диффузионной и планарной технологий. За годы серийного выпуска германиевых приборов с 1954 по 1972 год предприятием было выпущено не менее 500 млн. приборов, которые нашли применение в военной технике, телевидении, вычислительной технике, связной аппаратуре.

Во все времена для разработчиков транзисторов главной задачей было — расширение частотного диапазона и увеличение отдаваемой мощности. На начальном этапе развития полупроводниковой электроники спорили о возможности создания транзисторов на 10 и 100 МГц и придумывали различные конструкции и технологии для создания приборов с малой шириной базы, с тянущим полем в базе, с малыми геометрическими размерами р-п-переходов.

В ходе разработок транзисторов создавалось необходимое технологическое оборудование, элементы конструкции, оборудование для сборки приборов, их измерений и испытаний. Важной составной частью комплекса мероприятий, направленных на развитие полупроводниковой электроники, являлась в то время разработка нормативной документации, определившей порядок разработки и освоения нового класса приборов.

В 1956 году был предложен и реализован метод получения высокочастотных германиевых транзисторов р-п-р-типа методом сплавления и последующей диффузии акцепторных и донорных примесей из рекристаллизованного слоя, а вскоре были созданы первые экспериментальные образцы приборов.

Сплавно-диффузионная технология позволила существенно расширить частотный диапазон германиевых транзисторов. Ряд технологических и конструктивных особенностей отечественных сплавно-диффузионных транзисторов позволил на какое-то время сгладить наше отставания в погоне за частотным пределом.

Первые сплавно-диффузионные транзисторы попали в космос. Передатчик первого в мире спутника Земли был изготовлен на сплавно-диффузионных транзисторах П-401.

Начали формироваться технологии, позволяющие оптимизировать параметры транзисторов для различных областей применения. В обиход вошла терминология, разделяющая транзисторы по областям применения — малошумящие, переключательные, мощные, импульсные и другие.

По сплавно-диффузионной технологии были созданы огромные серии приборов: 1956–1957 годы — П401, П402, П403 (на 30, 60 и 120 МГц); 1957 год — П418 (500 МГц); 1959 год — П410 и П411 (1000 МГц); 1960 год — П417 (повышенная надежность) (рис. 2.3.2); 1960 год — ГТ901 (мощный); 1962 год — ГТ308; 1964 год — ГТ905 (мощный); 1964 год — транзистор на 800 мВт, 800 МГц; 1969 год — ГТ338 (эпитаксиальный лавинный) для стробоскопических осциллографов; 1962 год — самый высокочастотный первый малшумящий транзистор ГТ313 с коэффициентом шума до 1,5 дБ на частоте 180 МГц (рис. 2.3.3).

Транзисторы сначала выпускались в металлостеклянных корпусах (с герметизацией контактной сваркой), а затем в холодно-сварных корпусах и в бескорпусном исполнении на керамических держателях.

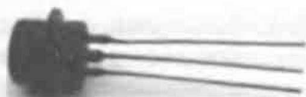


Рис. 2.3.2. Сплавно-диффузионные транзисторы: П417



Рис. 2.3.3. Первый высокочастотный малошумящий транзистор ГТ313

На сплавно-диффузионной технологии была создана отечественная школа полупроводниковых транзисторов и диодов.

Разработанные приборы выпускались на предприятиях отрасли сотнями миллионов штук в год и составили основу как оборонной техники, так и гражданской аппаратуры, включая космическую связь и атомную промышленность.

В первых радиоприемниках, изготовлявшихся на полупроводниковых приборах и принимающих сигналы на длинных, средних и коротких волнах, были использованы транзисторы П403.

За парадом успехов сплавно-диффузионной технологии ее разработчики понимали предельные возможности «механических» технологий с ручной загрузкой «шариков». Дальнейшее продвижение транзисторов вверх по диапазону частот и мощностей без решительного уменьшения размеров эмиттера было невозможно. Работы в направлении так называемой меза-технологии, начатые в 1962–1963 годах, были сравнительно быстро свернуты, поскольку проблема создания масок с отверстиями для напыления электродов эмиттера и базы, их фиксации и перемещения в вакууме оказались совсем непростыми.

Важным этапом в развитии технологии полупроводниковой электроники стали работы по фотолитографии. Начатые в НИИ «Пульсар» в начале 1960-х годов, они сразу же стали частью технологии промышленного производства. Разработка технологии нанесения диэлектрических слоев при низких температурах и прецизионной фотолитографии с комплексом соответствующего оборудования в сочетании с совершенствованием технологий напыления и диффузии примесей уже к 1964–1965 годам позволила утверждать, что в стране появилась планарная технология на германии, обеспечившая получение размеров электродов транзистора в единицы микрон. Рабочие частоты транзисторов шагнули в область СВЧ и были доведены до 1 ГГц.

За период до 1975 года германиевые планарные транзисторы *p-n-p*- и *p-n-p*-типов занимали главенствующее положение в комплектации отечественной радиоэлектронной аппаратуры метрового и дециметрового диапазонов частот.

Только транзисторами ГТ328 и ГТ346 комплектовались переключатели телевизионных каналов метрового диапазона и селекторы каналов дециметрового диапазона для всех телевизионных приемников, которые выпускали 50 телевизионных заводов СССР. Объем выпуска этих транзисторов превысил 300 млн. штук. Германиевые планарные биполярные транзисторы выпускались до 1995 года. Технология и конструкция приборов была запатентована в ведущих странах Западной и Восточной Европы (Велико-

британия, Франция, ФРГ, ГДР, Италия, Румыния, Чехословакия, Венгрия и др.). Европейские производители телевизоров стали активно использовать советские транзисторы. Интегрированные в транзисторы достижения планарно-эпитаксиальной технологии того времени позволили достичь параметров мирового уровня, открыли впервые для отечественных транзисторов зарубежный рынок. Следует отметить, что благодаря «телевизионным» транзисторам было реализовано важное свойство телевизионных приемников: наличие резкого уменьшения коэффициента усиления по мощности при увеличении тока. Это позволило создать усилители с так называемой «прямой» автоматической регулировкой усиления (АРУ) с глубиной регулировки до -40 дБ при сохранении высокого динамического диапазона (линейности).

При всех достижениях германиевых транзисторов у них было два существенных недостатка по сравнению с бурно развивающимися кремниевыми транзисторами — ограниченный температурный диапазон (порядка $+70$ °C) и отсутствие такого защитного слоя, как SiO_2 на кремнии.

С 1956 года начинается освоение и развитие кремниевой технологии изготовления транзисторов. На базе сплавной, диффузионной и затем планарной технологий были проведены разработки и организован серийный выпуск приборов на кремнии, при этом основными направлениями остались повышение рабочей частоты и отдаваемой мощности приборов, а также повышение рабочей температуры.

В 1956 году разработаны первые в СССР кремниевые сплавные p - p - n -транзисторы типов П101-П103 с последующим освоением их в производстве. Транзисторы предназначены для усиления и переключения сигналов низкой частоты.

В 1957–1958 годах были разработаны первые в СССР кремниевые усилительные сплавные p - n - p -транзисторы типов П104-П106 с последующим производством, в 1957–1959 годах — более высокочастотные кремниевые p - p - n -транзисторы типов П501-П503 с использованием диффузионного легирования базовых и эмиттерных областей кремниевых транзисторных структур (с последующим освоением в производстве). Транзисторы предназначались для применения в усилительных и генераторных схемах высокой частоты, а также в переключающих схемах радиоэлектронных устройств.

В 1961–1963 годах были созданы конструкция и производственная технология первого отечественного маломощного универсального высокочастотного кремниевого планарного p - p - n -транзистора типа КТ312, бескорпусные варианты которого (например КТ319) стали основными элементами множества гибридных интегральных схем того времени.

Разработка конструкций и технологических процессов изготовления этих транзисторов стала базовой основой организации в электронной промышленности производства нового поколения транзисторов и интегральных схем, обеспечивших развитие нового этапа микроэлектроники. При этом машиностроительные НИИ и КБ электронной отрасли в короткие сроки создали базовые типы технологического оборудования и оснастили ими предприятия электронной промышленности.

С 1956 года было разработано более 1000 типов кремниевых приборов, большинство из которых серийно выпускалось на предприятиях отрасли

многомиллионными, а некоторые типы приборов (например, КТ315) миллиардными тиражами (рис. 2.3.4).

Совершенствование технологии кремниевых транзисторов привело к разработке технологии групповой обработки пластин и заложило основу интегральной электроники. На примере одной из групп разработчиков видно, как менялась тематика их работ.

Были разработаны и внедрены в производство на серийных заводах отрасли:

- кремниевые эпитаксиально-планарные, высокочастотные транзисторы типов КТ-315, КТ-342;
- быстродействующие ТТЛ микросхемы с парафазным выходом серий 199, К599, созданные впервые в мире в нашей стране;
- быстродействующие многоканальные интегральные микросхемы управления и обработки сигналов серий 1119, Б1119-2, 1138, Б1138-2;
- быстродействующие многоканальные аналоговые микросхемы;
- БИС синхронизации и управления фотоприемными устройствами серии 1589;
- микросхемы для комплексированных изделий.

Была создана экспериментально-технологическая лаборатория (ЭТЛ). В ЭТЛ шла отладка технологии создания первых отечественных твердотельных интегральных микросхем, получивших название ИС-100. Они представляли собой резистивно-транзисторные логические схемы с изоляцией элементов так называемым методом коллекторной диффузии (процесс тройной диффузии).

Впоследствии микросхемы ИС-100, разработанные в НИИ «Пульсар», выпускались серийно в течение многих лет.

К середине 1960-х годов в стране назрела необходимость в создании элементной базы для ЭВМ, устройств цифровой автоматики и связи. Была разработана серия первых кремниевых транзисторов с диффузионным эмиттером и базой, что позволило повысить частотный диапазон кремниевых транзисторов на два порядка — до частот 200 МГц, а также серия первых маломощных переключающих n - p - n - и p - n - p -транзисторов с предельными частотами 1 ГГц.

Созданы первые отечественные СВЧ-транзисторы диапазона 400–500 МГц с мощностью до 50 Вт. Разрабатываются СВЧ мощные широкополосные генераторные транзисторы для РЛС L -диапазона с мощностями до сотен ватт, мощные СВЧ-транзисторы на диапазон частот 2–3 ГГц, высокочастотные кремниевые p - n - p -транзисторы для комплементарных схем, схем управления ПЗС, мощные короткоимпульсные транзисторы.

В 1974 году разработана серия широкополосных с внутренними цепями согласования СВЧ мощных транзисторов, нашедших применение в усилителях мощности для радиорелейных линий связи по программе «Электроника-Связь». В 1979 году создана базовая конструкция СВЧ мощного транзистора типа 2Т989 с внутренними цепями согласования и многослойной золотой металлизацией кремниевого кристалла, обеспечивающей повышенную надежность (рис. 2.3.5).

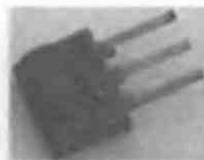


Рис. 2.3.4. Транзистор КТ315

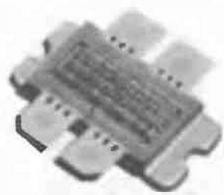


Рис. 2.3.5. Базовая конструкция СВЧ мощного транзистора с внутренними цепями согласования и многослойной золотой металлизацией кремниевого кристалла, обеспечивающей повышенную надежность

Транзистор нашел применение в усилителях мощности различных радиоэлектронных систем, в частности, для переносной правительственной связи и малогабаритных передающих модулей для фазированных антенных решеток и систем государственного опознавания. Спецификой указанных работ была оптимизация инженерных решений на стыке транзисторных разработок и интегральной схемотехники. Это позволило разработать специальную аппаратуру на базе вновь разработанных транзисторов, отличающуюся максимальной взаимной оптимизацией параметров транзисторов и схемотехнических и конструктивно-технологических аппаратурных решений (гибридно-интегральные модули для фазированных антенных решеток, мобильных и носимых средств связи, бортовых систем государственного опознавания).

Мощные кремниевые СВЧ биполярные транзисторы и сегодня представляют самый значительный и конкурентоспособный класс полупроводниковых приборов, вновь разрабатываемых и выпускаемых.

Мощные дециметровые приборы до сих пор удерживают относительный паритет с лучшими зарубежными образцами. В определенной степени это положение объясняется глубиной исследований, проведенных в направлении подавления поперечной неустойчивости в структуре мощного СВЧ-транзистора. Зарубежные работы по этой тематике не известны. Если за рубежом проблему решают «в лоб», то у нас используется ряд оригинальных решений, например, резистор в поперечной структуре.

Отдельно следует отметить достижения в области создания кремниевых транзисторов средней мощности типа 2Т9119, где были получены рекордные цифры по мощности — 4,5 Вт на частоте 7 ГГц и 50 мВт на частоте 18 ГГц.

В 1958 году, когда создалось впечатление, что транзисторы достигли своего частотного предела, в институте начались работы по созданию параметрических диодов. С помощью последних можно было бы конструировать маломощные усилители в сантиметровом и даже миллиметровом диапазонах длин волн. В итоге в 1959–1967 годах была разработана серия параметрических диодов (1А401–1А407) и внедрена в промышленность. Эти приборы позволили осуществить передачу телевизионной информации через спутники «Молния» и станции «Орбита» в отдаленные районы Сибири и Дальнего Востока. Позднее удалось осуществить сверхдальнюю связь со спутником в районе планеты Марс и, наконец, изучить реликтовое излучение, поступающее от границ Вселенной.

С 1959 года развивается новое направление, связанное с открытием возможности высокочастотной генерации при лавинном пробое, создание германиевых и кремниевых лавинно-пролетных диодов, а в последующие годы арсенид-галлиевых лавинно-пролетных диодов. Приборы позволили полу-

чить мощности от единиц до десятков ватт в диапазоне сантиметровых и миллиметровых длин волн и долгое время были вне конкуренции.

Работа по созданию лавинно-пролетных диодов (ЛПД) началась в ФГУП «НПП «Пульсар» в конце 1958 года, вскоре после опубликования статьи Рида, в которой автор теоретически обосновал возможность получения СВЧ-генерации в предложенной им новой конструкции диода. Эта работа была продолжена в рамках НИР «Исследование возможности создания германиевых усилительных и генераторных приборов на основе параметрического резонанса и лавинного умножения на частоты до 3000 МГц».

В 1964 году была завершена ОКР по разработке конструкции и технологии изготовления ЛПД, и на заводе «Пульсар» началось производство первого серийного ЛПД-1А701. Только в 1965 году появилась статья, в которой сообщалось о создании ЛПД в США.

С 1964 года и до настоящего времени ЛПД являются комплектующими элементами твердотельных источников СВЧ-мощности в коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн (рис. 2.3.6). Они служат основой для целого класса генераторных и усилительных устройств, используемых для радиолокационных систем и систем связи.

Основные достижения, которые позволили создать ЛПД, успешно работающие в диапазоне частот от 10 до 60 ГГц, следующие:

- разработка диффузионно-дрейфовой модели ЛПД (для сантиметрового диапазона длин волн), а затем более точной инерционной диффузионно-дрейфовой модели (пригодной и для миллиметрового диапазона длин волн). На основе предложенной модели разработана программа расчета СВЧ-параметров арсенид-галлиевых ЛПД (мощности, КПД, полного сопротивления) в зависимости от распределения легирующих примесей в исходном материале и статических параметров диода, позволившая проводить численное моделирование ЛПД;
- получение сложных многослойных эпитаксиальных структур арсенида галлия со ступенчатым легированием донорными и акцепторными примесями в субмикронных слоях (0,05–0,5 мкм) (например, типа $p^+ - p - n^- - p^+ - p - n^+ - p^{++}$). Это позволило увеличить КПД приборов с 10% (для плоского профиля легирования) до 30%;
- уменьшение теплового сопротивления прибора за счет создания двухслойного интегрального теплоотвода и многоэлементной структуры p - n -перехода на одном кристалле, что привело к увеличению выходной СВЧ-мощности, отдаваемой диодом в нагрузку;
- разработка оригинальных методов химического травления арсенида галлия: прецизионного травления пластин до толщины 3–5 мкм; травления меза-структур «с потенциалом» для придания рабочей области прибора определенной геометрической конфигурации, устраняющей поверхностный пробой p - n -перехода;

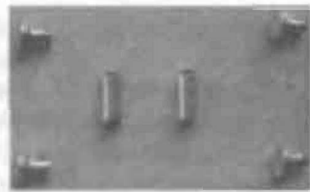


Рис. 2.3.6. Лавинно-пролетные диоды

- исследование протонного облучения арсенида галлия с целью получения полуизолирующих слоев. Применение протонного облучения в технологии ЛПД позволило создать квазипланарные структуры с равномерным пробоем по площади р-п-перехода, с малыми паразитными емкостями, низкими значениями сопротивления, потерь диода и минимальными тепловыми сопротивлениями. Протонное облучение существенно снизило разброс параметров ЛПД (в первую очередь, емкости), увеличило механическую прочность (по сравнению с меза-структурой), позволило устранить трудности монтажа (так как переход был защищен полуизолирующим слоем арсенида галлия);
- исследование барьера Шоттки металл-арсенид галлия. В результате созданы высоконадежные многослойные металлические системы типа Pt-Ti-TiN-Ti-Pt-Au, которые устраняют взаимную диффузию металлов (например, золота) и обеспечивают требуемую надежность при рабочей температуре перехода 225 °С.

В разработанных ЛПД широко применяется ионно-химическое и плазмохимическое травление металлов и арсенида галлия, а также покрытия из полиимидного и фоточувствительного полиимидного лака.

Большинство принципиальных и важнейших технологических операций, описанных выше, защищено авторскими свидетельствами.

На заводе «Пульсар» освоено около 40 типонаименований арсенид-галлиевых ЛПД, работающих в диапазоне от 8 до 37 ГГц. Разработанные ЛПД нашли широкое применение в отечественной радиолокационной и связной аппаратуре сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.

Период с 1963 по 1976 год можно назвать периодом разработки и широкого промышленного внедрения в отрасли планарной технологии на кремнии. В НИИ «Пульсар» проводились базовые разработки как транзисторов, так и основных технологических процессов.

В 1970 годы был проведен принципиально важный комплекс работ с целью разработки первых в стране СВЧ интегральных функциональных модулей сантиметрового диапазона для создания антенных фазированных решеток бортовых и наземных радарных и связанных систем, а также с целью введения оптимального перспективного планирования приборных разработок на базе параметрических рядов и внедрения в практику проведения и сдачи ОКР совместно с коллективом опытного завода.

К середине 1960-х годов совершенствование радиосредств было связано с широким использованием биполярных транзисторов вместо электронных ламп. Однако для полного исключения последних из состава радиоаппаратуры недоставало полупроводникового усилительного элемента, сочетающего такие специфические свойства электронных ламп, как высокое входное сопротивление и большой диапазон входных сигналов.

Потенциально такими элементами могли стать полевой транзистор с управляющим р-п-переходом (ПТУП) и полевой транзистор с изолированным затвором со структурой: металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзистор). К моменту, когда возникла существенная потребность в таких приборах, ни ПТУП, ни МДП-транзистор не имели друг перед другом сложившихся преимуществ.



Уровень технических характеристик и тех и других приборов был низок. Но в отличие от биполярных транзисторов, где германий и кремний два десятилетия оспаривали друг у друга приоритет, полевые транзисторы имели перспективную основу развития — кремниевую планарную технологию.

Поскольку интерес к полевым транзисторам был инициирован главным образом потребностями радиосвязи, то и теоретические и экспериментальные работы первоначально были ориентированы на создание высокочастотных конструкций. Однако создание в 1969 году первых ПТУП 2П302 и 2П303 с характеристиками, позволяющими рассматривать их как полноценные радиотехнические элементы, показало, что это принципиально новый класс электронных приборов, отличительная особенность которых — низкий уровень шумов в широком диапазоне частот от инфразвуковых до радиочастот. Дальнейшие работы были ориентированы на создание приборов, сочетающих малые и низкочастотные и высокочастотные шумы на основе оптимального сочетания технологических и конструктивных решений. В результате этих работ были созданы и освоены в производстве на заводах отрасли в Москве, Виннице, Ташкенте 10 типов ПТУП различного назначения, удовлетворивших потребность страны в этих приборах. В 1986 году на заводе «Пульсар» в Москве начато производство разработанного в НИИ «Пульсар» ПТУП 2П341, у которого рекордно низкий уровень низкочастотных шумов сочетается с низким высокочастотным шумом, что в целом образует сочетание, не превзойденное до сих пор.

Помимо указанного выше генерального направления в развитии ПТУП, немалое внимание было уделено поискам конструктивных решений, позволяющих ввести ПТУП в классы СВЧ и мощных полупроводниковых приборов. В НИИ «Пульсар» были разработаны экспериментальные образцы низкочастотных и высокочастотных (на частоту 400 МГц) транзисторов с углубленным и поверхностным затворами. Отсутствие каких-либо серьезных преимуществ кремниевых СВЧ полевых транзисторов перед биполярными или МДП-транзисторами, а также их невысокая технологичность не позволяли до настоящего времени определить области их применения. Тем не менее, разработки таких приборов продолжаются, и нельзя полностью исключить возможность создания конкурентоспособного прибора на основе новых полупроводниковых материалов, где удастся преодолеть главное ограничение ПТУП со встроенным в объем полупроводника (в канал) затвором — большую постоянную времени затвора из-за высокого сопротивления заглубленного неметаллического затвора и большой емкости затвора.

Успехи в создании новых материалов с высокой подвижностью носителей заряда дают основание полагать, что полевые транзисторы с управляемым переходом, для эффективной работы которых необходима высокая подвижность носителей заряда только одного знака, могут оказаться наиболее приемлемыми для реализации достоинств новых материалов.

Разработка и организация промышленного выпуска ПТУП с 1969 года обеспечили прогресс в тех областях техники, где основой развития является распознавание предельно малых электрических сигналов, требующее предельно низкого уровня шумов входных устройств: радиосвязь (включая средства радиоэлектронной борьбы), высококачественная звуковая техника, спектроскопия ядерных частиц, звуковая локация, интродивение и многие

другие. Однако из-за относительно высокой проходной емкости использования ПТУП в устройствах связи ограничено нижней областью радиодиапазона. Для решения задач в верхней области радиодиапазона требовались приборы с меньшей величиной емкости обратной связи. Такими приборами стали полевые транзисторы с изолированным затвором.

С начала 1960-х годов изыскание способов обеспечения надежности и стабильности МДП-транзисторов было одним из важнейших направлений исследований многих ученых. Были выделены два отчетливо проявляющихся механизма нестабильности.

В результате исследований и разработок, опередив на год зарубежные фирмы, в 1969 году был организован промышленный выпуск отечественных маломощных ВЧ МДП-транзисторов, удовлетворяющих по надежности, уровню электрических характеристик и номенклатуре требованиям военной техники и устройств промышленного назначения, позволивших реализовать в аппаратуре тактико-технические характеристики, недостижимые при использовании традиционных средств.

В последующие годы были разработаны и внедрены в производство маломощные МДП-транзисторы на более высокие рабочие частоты вплоть до 2,25 ГГц. Из них наибольшее распространение получили тетроды, которые из-за малой величины проходной емкости радикально решили проблему устойчивости высокочастотных усилительных каскадов с большим усилением в диапазоне до 1 ГГц.

Научный и технологический задел, созданный в процессе разработки и производства маломощных полевых транзисторов, был успешно использован для создания новых самостоятельных областей электронной техники:

- микромощных низкопороговых комплементарных МОП больших интегральных схем (КМОП БИС) и новой отрасли промышленности — производство электронных цифровых наручных часов;
- нового класса полупроводниковых приборов — мощных ВЧ и СВЧ МДП-транзисторов;
- мощных переключательных МДП-транзисторов.

Микромощные низкопороговые КМОП БИС

Этот класс микроэлектронных устройств (способных работать при напряжении питания 1–3 В), состоящий из низкопороговых р-п-канальных комплементарных МДП-транзисторов, потребляющих в закрытом состоянии мощность около 10 Вт на один транзистор, сегодня является основой всей вычислительной техники и большей части микроэлектроники в целом. Рождение его относится к началу 1970-х годов и первым его значительным достижением были наручные цифровые электронные часы. К началу 1970-х годов уже длительное время существовали полупроводниковые радиоприемники, телевизоры, настольные и настенные цифровые часы, компьютеры, калькуляторы и многие другие бытовые и промышленные изделия на основе транзисторов и интегральных схем, но наручных цифровых часов не было. Для их создания были необходимы КМОП ИС с низким пороговым напряжением.

Требовалось обеспечить работоспособность КМОП ИС при напряжении ниже 2–2,5 В, в то время как стандартные для того времени КМОП ИС (КМОП БИС еще не было) работали при напряжении 10–15 В, вместо необходимых для часов пороговых напряжений 0,7–1 В как у р- и п-канальных транзисторов. КМОП ИС и КМОП БИС, работающие при напряжениях ниже 5 В, в дальнейшем стали называть низкопороговыми. В 1972–1973 годах были разработаны первые низкопороговые КМОП БИС для электронных часов с жидкокристаллическим индикатором (дисплеем), а в 1973–1974 годах — для электронных часов с индикатором на светоизлучающих диодах. Часы были внедрены в производство на заводах в Москве и Минске и явились основой новой отрасли часовой промышленности — электронных цифровых наручных часов (рис. 2.3.7).

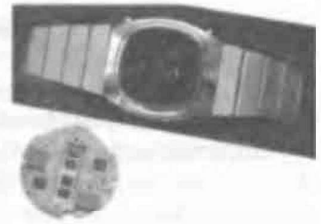


Рис. 2.3.7. Электронные цифровые наручные часы

В процессе разработки и внедрения в производство первых часов с ЖКИ-дисплеем в Минском объединении «Интеграл» был подготовлен коллектив специалистов, способный в дальнейшем самостоятельно разрабатывать и КМОП БИС и часы в целом.

При разработке часов со светодиодным индикатором (главный конструктор Ю.П. Докучаев) в них были аккумулированы многие лучшие достижения отечественной электронной промышленности: низкопороговые КМОП БИС со сверхмалым потреблением энергии и с внешней цифровой подстройкой точности хода часов, позволяющей достигнуть точности 1–2 с в год; светоизлучающие диоды высокой яркости при токах в два раза меньших, чем у лучших мировых аналогов; высокостабильные высокоточные кварцевые резонаторы; сложная многослойная керамическая плата с многоуровневой системой межсоединений как конструкционная основа механизма часов; система управления часами на микрогирконах с подвижными самарий-кобальтовыми магнитами в кнопках управления, действующими на гиркон через герметичную перегородку корпуса; узкополосный красный светофильтр с полосой пропускания света, совпадающей со спектром излучения светодиодов и др.

Конструктивные и технологические решения, реализованные в КМОП БИС для электронных часов, явились основой, на которой в последующие годы были созданы многие низкопороговые КМОП БИС промышленного и военного назначения, в том числе первое в стране КМОП ОЗУ с произвольной выборкой 537 РУ1 емкостью 1024 бит, решившее задачу длительного хранения (в режиме ПЗУ с маломощной резервной батареей) и быстрого сброса больших массивов информации в первых, безотказно проработавших на орбите более семи лет отечественных спутниках непрерывного визуального наблюдения земной поверхности и передачи информации в практически реальном масштабе времени. Разработка и создание низкопороговых КМОП БИС на нашем предприятии явились стимулами для создания подобных производств на других предприятиях отрасли. К сожалению, в годы кризиса это производство, как и ряд других, серьезно пострадало и его приходится восстанавливать.

Мощные ВЧ и СВЧ МДП-транзисторы

Задел, созданный при разработке и производстве маломощных ВЧ и СВЧ МДП-транзисторов, позволил в дальнейшем успешно решить также проблему выпуска мощных МДП-транзисторов. Стимулами к созданию мощных МДП-транзисторов послужили, в первую очередь, потребности радиосвязи. В конце 1960 — начале 1970-х годов остро встала проблема обеспечения надежной связи в сложной помеховой обстановке, создаваемой возрастающими мощностями передатчиков, загруженностью основных частотных диапазонов и средствами радиопротиводействия. Динамический диапазон уровней помех на входе радиоприемных устройств достигает 140–160 дБ/мкВ, а в диапазоне КВ присвоено 700 тыс. частот (передатчиков), т.е. в среднем полоса 40 Гц на один передатчик.

Для построения радиосредств, стабильно работающих в таких условиях, было необходимо создать новый активный элемент, способный удовлетворить совокупности требований вновь разрабатываемых перспективных радиоприемных устройств. Транзисторы 2П902, созданные в НИИ «Пульсар», опередив на 4-5 лет появление подобных приборов за рубежом, стали основоположниками нового класса полупроводниковых приборов — мощных кремниевых ВЧ МДП-транзисторов. Приоритет нашей страны в создании мощных кремниевых ВЧ МДП-транзисторов получил мировое признание.

Демонстрация приборов 2П902, 2П901, 2П904 на международных выставках в начале 1970-х годов стимулировала развитие этого класса приборов во всех технически развитых зарубежных странах, и сегодня интенсивные работы в этой области ведут десятки фирм. Мощные ВЧ МДП-транзисторы 2П902 и другие были применены при создании более 30 типов радиостанций.

Разработанные на два десятилетия позже мощные МДП-транзисторы 2П923, 2П920 и другие, а также ПТУП 2П609 явились основой для создания наиболее современной системы связи, призванной обеспечить скрытое управление в реальном масштабе времени всеми участниками боевых действий в условиях жесткой радиоэлектронной борьбы.

В 1978 году впервые экспериментально было показано, что мощные МДП-транзисторы обладают также уникальными импульсными свойствами. В наших исследованиях было достигнуто переключение тока в несколько ампер за время менее 1 нс. В дальнейшем переключательные МДП-транзисторы стали самостоятельным классом полупроводниковых приборов. В их основе лежит тот же впервые нами сформулированный и реализованный принцип сочетания короткого канала и высоких пробивных напряжений, но конструктивно и параметрически переключательные МДП-транзисторы отличаются от ВЧ-и СВЧ-приборов. С 1984 года на нашем предприятии разработано свыше 20 типов переключательных МДП-транзисторов на рабочие напряжения до 1500 В, обеспечивших по настоящее время потребности промышленности и военной техники. На более высокие напряжения МДП-транзисторы не разрабатывались в связи с отсутствием практической потребности в таких приборах. Для МДП-транзисторов считается целесообразным диапазон рабочих напряжений до 600–1000 В и в отдельных случаях до 1500 В. На напряжения свыше 600 В более перспективным считается новый

класс полупроводниковых приборов — биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ и в английской транскрипции IGBT), который преодолел рубеж в 4500 В. Эти приборы сочетают высокие рабочие напряжения и в 5–7 раз более высокую плотность тока, чем в МДП-транзисторах, при сравнимых величинах падения напряжения на открытом приборе. Появление и развитие БТИЗ за рубежом по времени совпало с годами экономического кризиса в России, что существенно замедлило технологически и физически становление этого класса сложных приборов.

Несмотря на трудности, обусловленные десятилетним экономическим кризисом, в НИИ «Пульсар» найдено решение научных и технических задач по созданию БТИЗ. Разработаны БТИЗ 2Е701 (напряжение 500–700 В и ток 25 А) и 2Е702 (напряжение 1000 В и ток 25 А), т.е. с параметрами, аналогичными параметрам подобных зарубежных приборов. Продвижение в область более высоких напряжений требует серьезной работы над основным материалом для этих приборов — двухслойными эпитаксиальными структурами — с целью получения слоев с высокой точностью значений сопротивления и толщины.

С 1975 года активно начинает развиваться технология изготовления арсенид-галлиевых полевых приборов. Были разработаны базовые технологии: планарно-эпитаксиальная и технология ионного легирования. Проводилась работа по формированию субмикронных элементов конструкции, для чего развивались технологии электронно-лучевой литографии и фотолитографии в диапазоне короткого УФ-излучения.

С использованием ионного легирования полуизолирующего арсенида галлия и эпитаксиальных структур в 1980-х годах были разработаны и серийно выпускались СВЧ полевые транзисторы. Далее были созданы мощные и средней мощности СВЧ-приборы на частоты 8–18 ГГц с выходной мощностью до 10 Вт на частоте 8 ГГц и 1 Вт на частоте 18 ГГц, серия малошумящих транзисторов на частоты 4–37 ГГц.

С использованием специальных технологических приемов были созданы малошумящие транзисторы с длиной затвора 0,1 мкм. Приборы имели уникальные параметры: температуру шума 20К на частоте 4 ГГц и были использованы Институтом космических исследований РАН в радиоастрономии (исследование реликтового излучения), а также при создании первых отечественных конвертеров спутникового телевидения. Впервые отечественные транзисторы «ворвались» в диапазон миллиметровых волн и успешно работали до рабочих частот 60 ГГц.

На базе технологии малошумящих транзисторов были разработаны первые отечественные СВЧ монолитные интегральные схемы усилителей на диапазон частот до 30 ГГц.

Развитием этих работ сегодня являются исследования и разработка элементной базы экстремальной электроники на широкозонных полупроводниках, таких как нитрид галлия, карбид кремния, алмазоподобные материалы.

С 1973 года начинает развиваться новое направление полупроводниковой электроники — фотоэлектроника — на базе приборов с зарядовой связью. Эти приборы, как в свое время транзистор, позволили осуществить замену вакуумных приборов (используемых как приемники изображения)

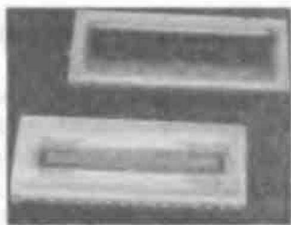


Рис. 2.3.8. Линейные и матричные фоточувствительные БИС на ПЗС

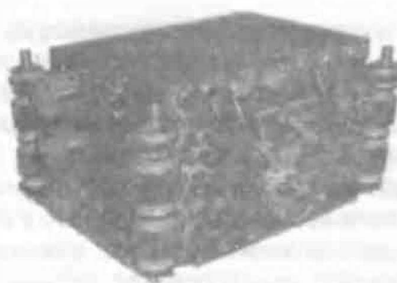


Рис. 2.3.9. Самолетный ответчик системы госопознавания

твердотельными и обеспечили создание высокоинформативных систем дистанционного зондирования Земли как в интересах исследования природных ресурсов, так и в интересах обороноспособности страны.

Были разработаны и освоены в серийном производстве линейные и матричные фоточувствительные БИС на ПЗС, приборы с временной задержкой и накоплением, спектрозональные фоточувствительные приборы. Приборы нашли широкое применение в космической технике, медицине, научном приборостроении, робототехнике и бытовой технике (рис. 2.3.8).

Номенклатура отечественных линейных и матричных ФПЗС потребовала создания комплектов управляющих микросхем. Была разработана КМОП-транзисторная концепция управления ФПЗС, на основе которой впервые в стране, начиная с 1977–1978 годов, на заводе «Пульсар» стали выпускать многофункциональные перестраиваемые КМОП БИС — специализированные системы на кристалле.

В 1970 годы новым направлением в работах предприятия становится создание комплексированных радиоэлектронных изделий. Проведен ряд разработок, создававших технологическую базу для изготовления узлов и блоков радиоэлектронной твердотельной аппаратуры в микроэлектронном исполнении, что позволило значительно снизить габариты и вес законченных изделий. Наиболее крупной стала разработка самолетного ответчика системы госопознавания (рис. 2.3.9).

В настоящее время в области полупроводниковых приборов ведутся разработки и выпускаются приборы по следующим направлениям:

- кремниевые биполярные транзисторы малой, средней и большой мощности ВЧ- и СВЧ-диапазона частот для непрерывного и импульсного режимов работы;
- кремниевые полевые транзисторы ВЧ- и СВЧ-диапазона частот и кремниевые полевые, биполярные и переключаемые транзисторы для силовой электроники, биполярные транзисторы с изолированным затвором и силовые модули на их основе;
- арсенид-галлиевые полевые маломощные транзисторы и транзисторы малой, средней и большой мощности СВЧ- и КВЧ-диапазона частот;
- модули аппаратуры радиолокации и связи на базе узлов и блоков, выполняемых на собственной элементной базе;

- фоточувствительные линейные и матричные приборы с зарядовой связью, фотоприемные приборы для визуализации рентгеновского и гамма-излучения;
- аналоговые и цифровые микросхемы для аппаратуры обработки сигналов;
- термопечатающие головки, термопринтеры, кассовые аппараты.

Основные области применения дискретных полупроводниковых приборов в народном хозяйстве и в оборонном комплексе: связь, радиолокация, навигация, силовая электроника, фотоэлектроника, а также промышленная электроника, торговля и обслуживание населения.

Накопленный в 1970-е годы опыт разработки аппаратуры и комплексированных изделий позволил в 1990-е годы начать новые работы в этом направлении с аппаратостроительными предприятиями. Вместе с Лианозовским электромеханическим заводом (ЛЭМЗ) «Пульсар» впервые в России создал радиолокационные станции для систем управления воздушным движением на основе твердотельных СВЧ-приборов собственной разработки и изготовления. Первая такая станция была создана и поставлена ЛЭМЗ и «Пульсаром» в аэропорт Домодедово (рис. 2.3.10). Это было началом возрождения НПП «Пульсар» как фирмы, занимающейся элементной базой в условиях рыночной экономики.

Эффективное взаимодействие с радиоприборостроительными фирмами стало возможным благодаря новому подходу к созданию радиоэлектронных систем. В целом — это проявление общей тенденции развития микроэлектроники. Сначала был транзистор, затем появились интегральные схемы, теперь элементной базой становятся системы на кристалле, состоящие из сложных функциональных блоков. Сегодня элементная база для радиотехнических предприятий — уже не транзисторы, а законченные сложные функциональные блоки. Именно они стали теми кубиками, из которых разрабатчики аппаратуры строят свои конечные изделия.

Традиционный подход подразумевает последовательно разработку и изготовление транзистора, поставку его радиотехнической фирме и выпуск уже конечного изделия. Весь этот цикл занимает от 7 до 10 лет. Поэтому транзисторы выпускались с некими усредненными параметрами. В результате для каждого конкретного изделия их приходилось значительно дорабатывать. Все это приводило к сложностям во взаимодействии с партнерами, поскольку предприятию-изготовителю ЭБ не очень выгодно дорабатывать серийную продукцию. Если же параллельно реализовать несколько процессов создания конечного изделия, например разработку транзистора и СВЧ-модуля, то можно существенно сократить время, снизить затраты и резко повысить качество продукции. Именно таким путем мы и пошли. Сегодня «Пульсар» параллельно разрабатывает и СВЧ-модули, и твердотельные СВЧ-приборы для них.



Рис. 2.3.10. Первая твердотельная РЛС «Утес-Т» в аэропорту Домодедово

«Пульсар» поставяет комплекты СВЧ-электроники, куда входит весь набор функциональных узлов: передатчики, приемники, средства обработки, синхрогенераторы, источники вторичного электропитания и т. д. Поэтому предприятие выпускает не только мощные, но и маломощные полупроводниковые приборы. Мы производим и биполярные, и полевые, и маломощные приборы на арсениде галлия, и аналоговые схемы для обработки СВЧ-сигналов. В том числе и по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ).

«Пульсар» занимается и силовой электроникой — транзисторами и схемами управления для источников вторичного питания, которые входят в комплект СВЧ-оборудования. Мы выпускаем весь комплекс необходимой элементной базы, в том числе ферритовые изделия, за исключением конденсаторов и сопротивлений.

Сегодня «Пульсар» является головным предприятием по разработке СВЧ-приборов L- и S-диапазонов (1–2 и 2–4 ГГц, соответственно). Производятся они по кремниевой технологии. Но поскольку на «Пульсаре» очень серьезная школа по разработке и исследованию арсенида галлия, на предприятии продолжают работы по созданию мощных GaAs транзисторов.

В последние годы в мире весьма интенсивно развиваются исследования в области широкозонных полупроводников. «Пульсар» был пионером среди промышленных предприятий, который занялся исследованием этой проблемы и созданием промышленной технологии приборов на основе широкозонных полупроводников. Еще в начале 1960-х на предприятии велись работы по карбиду кремния. Сейчас перспективным считается нитрид галлия. Первый в России транзистор на GaN был создан на «Пульсаре», хотя, конечно, вопрос первенства всегда сложен.

Создание СВЧ-приборов и модулей было бы невозможно без дизайн-центра, созданного на предприятии. Он оснащен как лицензионными средствами САПР, так и программными средствами разработки наших специалистов.

Установлены и детально изучены основные механизмы отказов, определяющие надежность кремниевых и арсенид-галлиевых транзисторов: образование горячих пятен и тепловой пробой, инжекционная неустойчивость, формирование сгустков электронно-дырочной плазмы, электродиффузия материалов металлизации в полупроводниковых приборах, влияние неоднородностей и дефектов на условия возникновения и развития отказов и др.

Изучены физические механизмы, ограничивающие область допустимых режимов и надежность биполярных и полевых транзисторов. Разработаны на уровне широкого практического внедрения физический подход и новые методы обеспечения надежности транзисторов, включая нормативные документы по надежностному проектированию, методам испытаний и отбраковки приборов данного класса.

Ведутся работы в области обеспечения надежности полупроводниковых приборов, предназначенных для комплектации космической аппаратуры с длительным сроком функционирования, и комплексированных приемопередающих модулей СВЧ для комплектации РЛС управления воздушным движением.

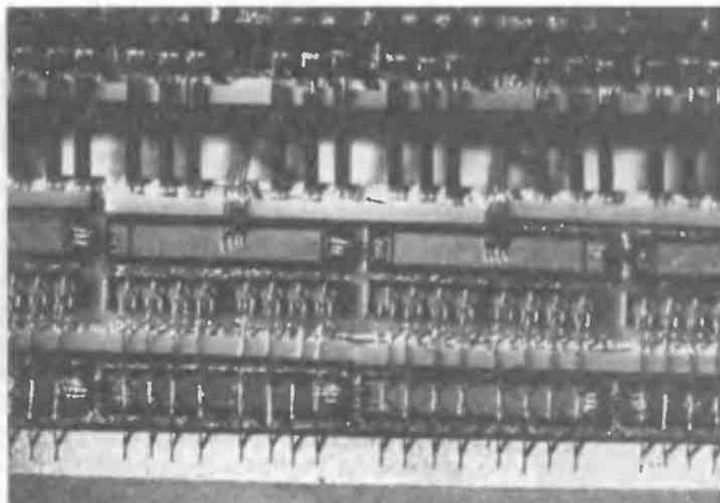


Рис. 2.3.11. Мощный кремниевый СВЧ-транзистор L-диапазона

Основным элементом, определяющим технические характеристики твердотельных передающих устройств, является мощный кремниевый СВЧ-транзистор (рис. 2.3.11), который представляет собой сложную гибридную интегральную схему, работающую при предельно допустимых значениях плотности тока и при максимальных напряжениях. Верхняя по частоте эксплуатационная ниша мощных биполярных кремниевых транзисторов — L- и S-диапазоны. Сегодня активно продолжаются работы, направленные на повышение мощности этих приборов.

Для мощных кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов естественным является режим работы с отсечкой тока, что существенно упрощает схемотехнические решения при реализации импульсного режима работы, используемого в радиолокации. Уровень мощности созданных на предприятии «Пульсар» кремниевых импульсных СВЧ-транзисторов, предназначенных для передатчиков радиолокаторов в L-диапазоне, может составлять 500 Вт при длительностях импульса до 10 мкс, 250 Вт при длительностях до 100 мкс и достигать 150 Вт — при 500 мкс. В S-диапазоне уровень мощности составляет 75 Вт при длительностях радиоимпульса до 100 мкс и 50 Вт — при 300 мкс. Транзисторы этих серий по уровню мощности лишь немного уступают лучшим зарубежным приборам, что создает хорошие предпосылки для развития отечественной твердотельной радиолокации. В случае реального коммерческого интереса рабочие частоты мощных транзисторных модулей могут быть расширены до диапазона 3,9–4,3 ГГц.

Достоинства передатчиков на полупроводниковых приборах неразрывно связаны с переходом от сосредоточенных (в случае применения электровакуумных устройств) к распределенным источникам СВЧ-мощности. Эти источники выполняются в виде блоков или модулей, мощности которых складываются в многоканальных сумматорах или в пространстве в системе активных фазированных антенных решеток. При этом применение большого числа модулей в системе (от десятков до нескольких тысяч) позволяет зна-

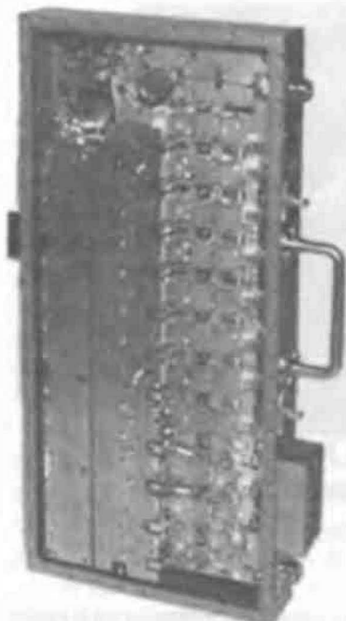


Рис. 2.3.12. 16 транзисторных каскадов, смонтированных в одном корпусе передатчика, суммарная импульсная мощность достигает 3 кВт на частоте 1,3 ГГц

чительно повысить надежность станции в целом. Отказ даже 50% общего числа модулей не всегда лишает систему работоспособности.

Есть еще одно преимущество твердотельных распределенных передатчиков — более высокая (на несколько порядков) потребность в транзисторах, чем в мощных электровакуумных приборах. А это означает возможность реализации крупносерийного производства с высокими технико-экономическими показателями. При этом следует учесть, что при производстве кремниевых транзисторов доминирующими являются групповые технологические процессы.

На сегодняшний день возможно эффективное сложение выходной мощности до 16 транзисторных каскадов, смонтированных в одном корпусе передатчика. При этом суммарная импульсная мощность достигает 3,0 кВт на частоте 1,3 ГГц и 800 Вт в полосе 2,7–2,9 ГГц (рис. 2.3.12). Такие результаты получены благодаря высокой идентичности суммируемых каскадов и применению сумматоров типа «бегущей волны». В свою очередь, идентичность каскадов обусловлена, прежде всего, идентичностью самих мощных СВЧ-транзисторов с внутренними согласующими цепями.

Ряд других проблем, возникающих при разработке усилителей мощности, связан с математическим моделированием мощного усилительного каскада, с анализом и подавлением поперечной неустойчивости в транзисторной структуре, со спецификой работы транзисторного каскада на рассогласованную нагрузку. Отдельно следует назвать развитие методов синтеза мощных широкополосных транзисторных каскадов, работающих в нелинейном режиме.

При проектировании усилительных модулей, предназначенных для комплектования передатчиков РЛС или формирования передающей системы АФАР, необходимо решать многофакторную задачу обеспечения следующих противоречивых требований:

- максимальной мощности;
- минимальных массы и габаритов (особенно для АФАР);
- фазовой стабильности;
- широкополосного режима работы;
- режима теплоотдачи;
- низкого уровня амплитудных и фазовых шумов;
- стабильности параметров радиоимпульса;
- автономного источника питания.



Рис. 2.3.13. Твердотельный передатчик РЛС «Утес-Т»

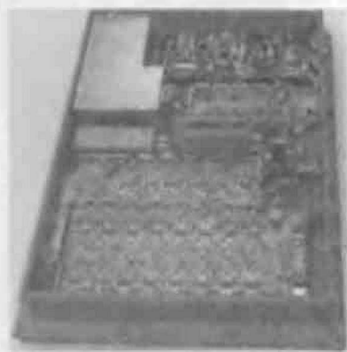


Рис. 2.3.14. Твердотельный передатчик команд управления и сигналов запроса зенитно-ракетного комплекса

В последние годы в НПП «Пульсар» разработан и освоен серийный выпуск целого ряда изделий, предназначенных для твердотельных передатчиков РЛС и АФАР. Это, в частности, усилительный модуль для передатчика трассовой радиолокационной станции УВД «Утес». Разработчик и изготовитель передатчика и станции ЛЭМЗ. В состав одного передатчика входят 64 усилительных модуля с выходной импульсной мощностью 1,5 кВт каждый на частоте 1,3 ГГц. Особенность модуля — наличие жидкостной системы охлаждения. Такое решение было принято в связи с тем, что выделяемая тепловая мощность модуля достигает 600 Вт. Компоновка передатчика представлена на рис. 2.3.13.

Сегодня введены в строй шесть станций подобного типа, и впервые появилась возможность положительной оценки эксплуатационных характеристик мощных СВЧ-транзисторов, усилительных модулей, а, следовательно, и полупроводниковой станции в целом. Следующий модуль для твердотельных передатчиков РЛС — усилитель для передатчика корабельной станции (заказчик НПО «Салют»). Полоса его рабочих частот 870–940 МГц, выходная мощность 150 Вт, длительность радиоимпульса 700 мкс, скважность 6.

В НПП «Пульсар» разработан и серийно поставляется двухканальный передатчик вторичного радиолокатора. Одно из требований заказчика — малые габариты модуля, позволяющие разместить его в конструктиве имеющейся аппаратуры. Выходная мощность модуля по обоим каналам составляет 2,5 кВт на частоте 1,03 ГГц, удельная импульсная мощность порядка 500 Вт/л.

К созданным в последнее время изделиям относится и 4-канальный приемопередающий модуль, представляющий собой законченный фрагмент АФАР. В модуль входят делитель-сумматор на четыре, фазовращатели, система управления, специальный канал для измерения фазовых и амплитудных параметров в режимах приема и передачи. Выходная импульсная мощность по каждому каналу не менее 70 Вт.

Одна из интересных разработок — передатчик команд управления и сигналов запроса зенитно-ракетного комплекса (рис. 2.3.14). Этот модуль имеет

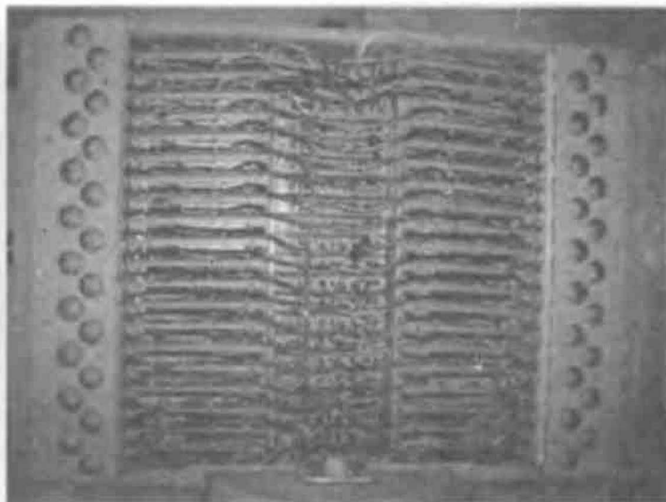


Рис. 2.3.15. Компоновка твердотельных СВЧ-модулей в АФАР

сложный спектр выходного сигнала. В сигнале управления присутствуют восемь низкочастотных модулирующих сигналов, каждая частота со своей глубиной модуляции. Передатчик включает канал запроса мощностью 1,5 кВт, с длительностью радиоимпульса 0,5 мкс. Сигнал формируется командами компьютера. Спектральный анализ излучаемого сигнала и обмен информацией с компьютером проводятся в реальном масштабе времени. Модуль работает в полосе несущих частот 1,0–1,1 ГГц. Испытания комплекса прошли успешно, начата серийная поставка изделий.

Следует отметить и передающий модуль для АФАР на полосу частот 2,7–2,9 ГГц, с выходной импульсной мощностью 140–180 Вт, коэффициентом усиления 23 дБ. Основные трудности, возникшие при проектировании и производстве этого модуля, — учет ограничений по габаритам и массе, связанных с неблагоприятными условиями эксплуатации АФАР (механическими, климатическими). Его удельная импульсная мощность порядка 100 Вт/л.

Основные проблемы, препятствующие достижению заданных электрических характеристик создаваемых модулей, — обеспечение стабильности параметров радиоимпульса (мощности, фазы, шума) и фазовой идентичности по ансамблю модулей в определенной полосе рабочих частот, заданных в диапазонах входных мощностей и температур. Общая компоновка СВЧ-модулей в АФАР, иллюстрирующая плотность упаковки приемопередающими и выходными модулями, представлена на рис. 2.3.15. Все модули, включая задающие гетеродинные, разработаны и производятся НПП «Пульсар». Практически решена поставленная в перспективном плане задача синтеза широкополосных цепей согласования для мощных нелинейных транзисторных каскадов. Ведется разработка модуля АФАР L-диапазона с перекрытием по частоте, превышающим половину октавы.

Достигнутое расширение полосы частот мощных усилителей может привести к расширению ниши применения биполярных СВЧ-транзисторов.



Правда, для этого необходимо, чтобы данное направление было системно востребовано в радиолокации или системах связи.

Упомянутый модуль АФАР L-диапазона помимо беспрецедентно широкой полосы пропускания отличается исключительно малыми габаритами, что достигнуто благодаря объемному совмещению в одном корпусе четырех приемопередающих каналов и использованию жидкостного охлаждения. Если говорить об основном объеме без выступающих элементов крепления и разъемов, то удельная выходная импульсная мощность модуля составит более 400 Вт/л.

На «Пульсаре» создан и успешно действует мощный испытательный центр, оснащенный всем необходимым комплексом оборудования для испытаний полупроводниковых приборов и модулей на стойкость к механическим, климатическим и специальным факторам, а также для испытаний на надежность — всего в центре имеется более 200 единиц испытательного оборудования. Центр позволяет проводить работы, в том числе и по сертификации ИЭТ. Наличие такого центра — это существенное конкурентное преимущество «Пульсара».

Ведутся исследования в области влияния проникающей радиации на изделия электронной техники и разработки радиационно технологических процессов.

Достижения в разработке и производстве полупроводниковых приборов — результат совместной деятельности организаций и предприятий электронной промышленности, академических институтов и высших учебных заведений. Следует особо отметить работы, проведенные коллективами ФТИ им. Иоффе, ФИАН им. Лебедева, ИРЭ РАН, МИРЭА, МЭИ. В электронной отрасли наибольший вклад в становление и развитие полупроводниковой электроники внесен ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «ГЗ «Пульсар», ОАО «НИИ «Сапфир» и заводами по производству полупроводниковых приборов в городах: Санкт-Петербург («Светлана»), Киев (КЗПП), Минск («Транзистор»), Новгород (НЗЛК), Воронеж (ВЗПП), Запорожье (ЗЗПП), Ташкент (Фотон), Брянск (БЗПП), Новосибирск (НЗПП), Таллинн (завод им. Пегельмана), Рига (РЗПП), Винница («Октябрь»), Томилино (ТЗПП) и Фрязино (им. 50-летия Октября) Московской области, Александров (Элекс), Ульяновск («Искра»), заводы в Херсоне, Черновцах, Ивано-Франковске, Томске, Тбилиси, Нальчике и др.

Трудно назвать всех сотрудников НИИ «Пульсар» и завода «Пульсар», внесших наибольший вклад в развитие полупроводниковой электроники, разработку физико-теоретических и научных проблем, развитие технологии, решение вопросов конструирования, во внедрение и организацию серийного производства, в исследования материалов, надежности, измерение параметров, применение полупроводниковых изделий в РЭА и многое другое.

Вот некоторые из них: Абрамов В.Ф., Акимов Ю.С., Аронов В.Л., Анохин Б.Г., Бачурин В.В., Беглецов Н.В., Бергельсон И.Г., Буробин В.А., Ваксенбург В.Я., Вальд-Перлов В.М., Васенков А.А., Вето А.В., Виноградов Р.Н., Вологдин Э.Н., Володин В.А., Волцит В.В., Георгиевская Е.А., Гольдшер А.И., Данилин В.Н., Диковский В.И., Докучаев Ю.П., Дубровская Л.А., Евстигнеев А.С., Енишерлова К.Л., Ерусалимчик И.Г., Ефимов Е.А., Жильцов В.С., Зубков А.М., Иноземцев С.А., Каменецкий Ю.А., Колков-



ский Ю.В., Константинов П.Б., Концевой Ю.А., Корнильев Г.Э., Косогов А.М., Костюков Е.В., Красилов А.В., Крымко М.М., Кубецкий Г.А., Кузнецов Ю.А., Левицкий К.Б., Мадоян С.Г., Мазель Е.З., Малин Б.В., Маранц В.Г., Маслов А.А., Моин И.И., Невежин В.К., Онуприенко Ф.Г., Поликанов Ю.В., Перельман Б.Л., Петров Л.А., Полянов А.Б., Пресс Ф.П., Рогов В.В., Родионов А.В., Ройзин Н.М., Рубцов И.Н., Самохвалов М.М., Сидоров В.А., Синкевич В.Ф., Скворцов И.М., Скрылев А.С., Сопов О.В., Стружинский В.А., Татаренков А.И., Трутко А.Ф., Ушаков М.А., Федотов Я.А., Филатов А.Л., Щиголь Ф.А., Чернявский А.А., Чернокожин В.В., Шибанов А.П., Щелчков Б.И.

2.4. Электронно-лучевые приборы

В.П. Куклев, *доктор технических наук,
профессор*

Развитие электроники и радиотехники взаимно связаны между собой. Потребности в новых электронных средствах определяются требованиями разработчиков радиотехнических средств и систем различного функционирования и назначения. История радиоэлектроники убедительно показывает, что принципиально и качественно новые характеристики и параметры функционирования достигались с появлением новых элементов электронных компонентов. Динамика развития радиотехники оказывала влияние на создание новых электронных компонентов и, наоборот, появление новых электронных приборов открывало новые возможности прогрессивного развития радиотехнических систем. Это можно проследить на многочисленных примерах из истории развития радиоэлектроники.

По электронно-лучевым приборам (ЭЛП) в 1965 году главным институтом был назначен НИИ «Платан». На начальной стадии развития работ по ЭЛП были разработаны и внедрены отраслевые стандарты «Размерно-параметрические ряды ЭЛП», которые устанавливали сетку номенклатуры приборов отображения по размерам и основным параметрам. В дальнейшем такая классификация явилась эффективным средством правильного выбора необходимых и актуальных электронно-лучевых приборов.

Был установлен порядок создания новейших приборов в три этапа:

- на первом этапе, как правило, проводились поисковые НИР (1,5–2 года), которые выполнялись на уровне приборных НИР, т.е. с получением конкретных параметров и характеристик на экспериментальных образцах, соответствующих мировому уровню;
- на втором — приборные НИР (1,5–2 года), выполняемые в рамках ОКР (без оформления полной конструкторской документации по ГОСТам ОКР);
- на третьем этапе ставились приборные ОКР со сроком выполнения также не более 1,5–2 лет. В ТЗ на ОКР при этом включались параметры, достигнутые на приборных НИР, что обеспечивало создание отечественных ЭЛП на уровне, удовлетворяющем современным требованиям.

В статье рассматриваются наиболее характерные примеры того, как создание новых электронных приборов преобразования типа «сигнал-свет» приемные ЭЛП, «свет-сигнал» передающие ЭЛП, «свет-свет» электронно-оптические преобразователи (ЭОПы), «сигнал-сигнал» функциональные счетно-решающие аналоговые приборы оказывало влияние на развитие радиозлектроники.

Электронные лучевые приборы для телевидения

После окончания Великой Отечественной войны решением Правительства СССР было намечено на 7 ноября 1947 года начало передачи стационарного отечественного телевидения и планировалось развитие трансляции по всей территории СССР.

В кратчайшие сроки были созданы первые приемные электронно-лучевые приборы (ЭЛП) — кинескопы, диаметр экранов которых был от 120 до 180 мм. Важнейшим параметром созданного кинескопа была его высокая разрешающая способность — до 625 строк, что обеспечивало достаточную четкость телевизионных изображений. Решалось одновременно несколько материаловедческих проблем — создание ярких, точных по цветовоспроизведению, технологически устойчивых катодолуминофоров. Используемые ранее в осциллографических ЭЛП люминофоры либо имели непригодный зеленый цвет, либо специально синтезировались с очень длительным послесвечением, что недопустимо при передаче телевизионной картины из-за «тянучек» и «смазов» изображения. Были созданы первые отечественные люминофоры, обеспечивающие достаточно качественное телевизионное изображение.

После первого кинескопа 12ЛК1Б, работавшего в телевизорах КВН, были сконструированы 18ЛК2Б, 24ЛК3Б и даже 32ЛК. Разработанные кинескопы отличались диаметром экрана. Потребности страны в десятках тысяч штук были удовлетворены. Приемные ЭЛП для телевидения получили свое дальнейшее развитие в перспективном направлении конструкций цветных кинескопов с теневой маской. Был создан ряд кинескопов с прямоугольным экраном размером 25, 37, 40, 47, 51, 61 67 см по диагонали и организовано их серийное производство. Все цветные кинескопы — трубки с теневой маской размером 25–67 см имели триадную структуру.

Основные характеристики цветных кинескопов

Разрешающая способность (удовлетворяет	
первому телевизионному стандарту)	625 строк
Яркость экрана	более 100 Кд/м ²
Контрастность	50:1
Неравномерность яркости по площади экрана	менее 30%
Угол отклонения электронных пучков	90–110 градусов

На рис. 2.4.1 приведены ряд цветных кинескопов размерами 40 и 47 см с теневой маской, триадная структура экрана и электронно-оптическая система.

В специализированной аппаратуре систем отображения информации (СОИ), в основном, используются электронно-лучевые приемные приборы

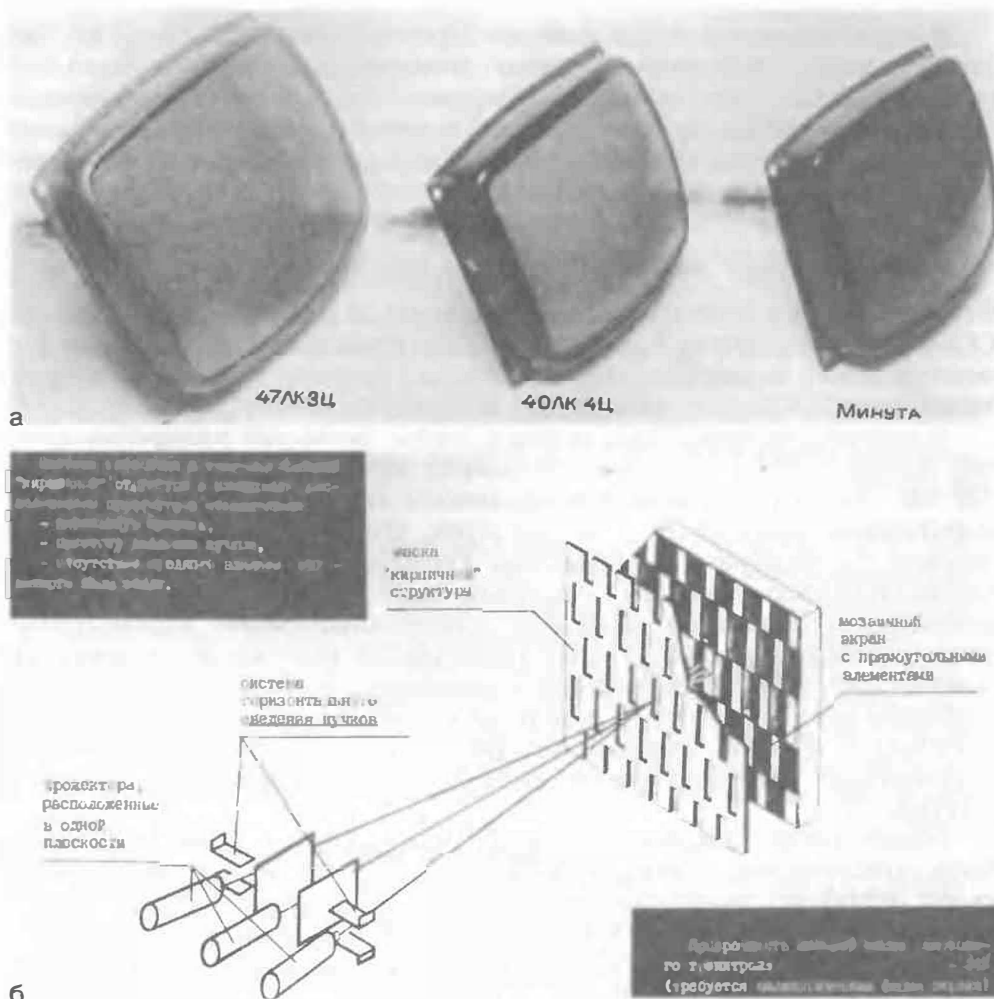


Рис. 2.4.1. Ряд цветных кинескопов размерами 40 и 47 см с теневой маской (а), триадная структура экрана и электронно-оптическая система (б)

с большим разрешением, с длительным послесвечением. По геометрическим размерам экранов эти ЭЛП отличаются от телевизионных. По форме экран прямоугольный с соотношением сторон 1:1, 1:2 и т.п. или круглый. В 1960-х годах были разработаны специализированные СОИ на основе цветной токовой ЭЛТ 25ЛМ6Ц, цвет свечения которой менялся в зависимости от плотности тока на экране трубки. Для получения двухцветного изображения на токовых ЭЛТ в телевизионном режиме необходимо получение плотности тока пучка от 1 мкА/см² до 4-5 мкА/см² при скоростях 2 мм/мкс. Такой режим (способ) изменения цвета изображения усложняет схемные решения, требует дополнительных затрат, потребляемой мощности и увеличивает габариты всего СОИ. Начиная с середины 1980-х годов, СОИ на основе ЭЛТ с токовым управлением цвета изображения (недостатки: ограниченное чис-

ло цветов — 2; малая яркость красного цвета свечения; необходимость обеспечения большой плотности тока пучка при скорости не более 2 мм/мкс; ограниченный размер экрана — не более 25–32 см) стали заменяться разработанными к тому времени цветными дисплейными кинескопами с нужными параметрами. Именно с этого времени все СОО на основе ЭЛП стали конструировать на цветных дисплейных кинескопах. До сих пор с учетом соотношения «цена—качество» у цветных дисплейных кинескопов нет конкурентов по информативности, четкости, яркости, контрастности воспроизводимого изображения.

Для повышения механической устойчивости ВМ необходимо использовать крепление кинескопа с максимально низкой резонансной частотой, обеспечивая наибольший частотный разнос резонансов цветоделительной маски кинескопа и крепежного приспособления, значительно ослабив при этом влияние механических нагрузок на масочный узел. Поэтому крепление кинескопа за пружины бандажа нецелесообразно, так как оно обладает большей жесткостью и, следовательно, более высокой частотой резонанса. Более целесообразно крепление за проушины через жесткие резиновые прокладки. Такое крепление обеспечивает ослабление вибрационных и ударных нагрузок на масочный узел примерно в 4 раза.

До конца 1990-х годов велись работы по дальнейшему совершенствованию кинескопов в направлениях повышения разрешающей способности, точности сведения пучков по всему полю экрана, равномерности яркости, плоскостности экрана и др.

Передающие ЭЛП для телевидения

Основу электронно-лучевых приборов, получивших название «передающие», составляют электронные устройства, формирующие сигналы изображений (иконоскоп). К моменту появления отечественных передающих ЭЛП был известен американский иконоскоп В.К. Зворыкина, но технология его изготовления была полностью засекречена. Отечественные специалисты тоже создали иконоскоп ЛИ-1, соответствующий стандарту 625 строк, с полной технологической схемой производства. Этот самый сложный передающий прибор основан на принципе внешнего фотоэффекта и накопления заряда в диэлектрической мишени, считываемой затем острым электронным пучком. Однако созданные первые иконоскопы могли работать только в студиях, так как требовали освещенности 5000 люкс, что создавало сложные условия при организации телепередач и работе с выступающими (артистами, телеведущими). Необходимо было создавать приборы, работающие при меньшем освещении. Такие приборы были созданы, они получили название «суперорбитроны». Они работали при освещенности 500 люкс и некоторое время успешно применялись в телевизионном вещании в студийных условиях. Для внестудийных передач с мест событий (для репортажных ТВ-камер) требовались другие передающие ЭЛП с высокой фоточувствительностью, имеющие существенно меньшие габариты, массу и потребляемую мощность. Такие приборы были созданы на принципе внутреннего фотоэффекта. Они получили название (видиконы) и были в десятки и сотни раз чувствительнее к свету по сравнению с их аналогами на внешнем фотоэффекте. Это на-



Рис. 2.4.2. Ряд видиконов и рентгеновидиконов

правление получило развитие в области визуализации рентгеновских изображений — были созданы видиконы, работающие в рентгеновской области электромагнитного спектра излучения, позволяющие проводить детальный дефектоскопический (неразрушающий) контроль различных изделий. Принципиальной особенностью рентгеновидиконов (рис. 2.4.2) является возможность непосредственного наблюдения изображения в реальном масштабе времени на мониторах в помещениях с обычным освещением, а не в темной комнате.

Размеры видиконов для вещательного телевидения составляли от 12,5 до 50 мм (0,5–2,0 дюйма). Размеры рентгеновидиконов 25, 90 и 150 мм определялись технологическими возможностями и целесообразностью их применения в системах неразрушающего контроля внутренних и внешних поверхностей испытываемых деталей.

Знакопечатающие ЭЛП

Знакопечатающие ЭЛП (рис. 2.4.3) способны быстро создавать изображения, записывать, запоминать, трансформировать разнокоординатные сигналы и данные о наблюдаемой цели или любого другого объекта методом быстрого печатания информационных данных, символов и знаков.

Приборы этого класса были созданы в 1960–1970 годы. Для них использовались надежные электронно-прозрачные металлические матрицы, способные воспроизводить в секунду до 5000 знаков, символов, букв, цифр, являющихся характерным признаком любого объекта радиолокационной обстановки.

Принцип работы знакопечатающих ЭЛП основан на методе формирования знака, символа, буквы или цифры на люминофорном экране модулированным электронным пучком, проходящим через тот или иной знак матри-

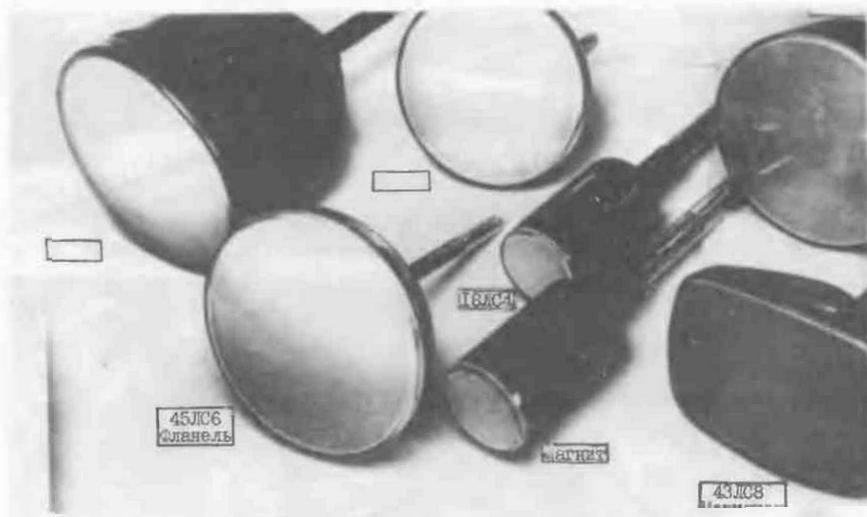


Рис. 2.4.3. Знакопечатающие ЭЛП

цы (рис. 2.4.4) и управляемым системой отклонения в соответствии с координатами цели. При этом около каждой цели может быть создан целый формуляр данных до 6–8 знаков благодаря высокой скорости управления электронным пучком и достаточного времени послесвечения люминофора.

Знакопечатающие ЭЛП выполнялись в колбах больших диаметров, обычно они имели несколько воспроизводящих систем, специальные системы дополнительного оптического картографирования и документирования по всему экрану приборов. Это обеспечивало получение надежной информации об обстановке надводными и подводными кораблями ВМФ, высокую четкость в определении воздушных коридоров ВВС и гражданской авиации. Формуляры



Рис. 2.4.4. Матрицы знакопечатающих ЭЛП



Рис. 2.4.5. Операторная аэропорта

экранов знакопечатающих ЭЛП до сих пор можно видеть на телевизионных экранах при нестандартных ситуациях в аэропортах (рис. 2.4.5).

На рис. 2.4.6 изображен наиболее распространенный прибор из серийного ряда знакопечатающих ЭЛП многофункционального типа.



Рис. 2.4.6. Многофункциональная знакопечатающая ЭЛП

Запоминающие индикаторные ЭЛП

Запоминающие индикаторные ЭЛП (рис. 2.4.7) (1960–1970 гг.) являются разновидностью потенциалоскопов с видимым изображением. Основное назначение — обеспечить достаточно различимое отображение в условиях высокой освещенности, что особенно важно в истребительной авиации.

Для боевых самолетов в условиях высокой внешней освещенности в полете на больших высотах было очень важно обеспечить уверенное наблюдение на индикаторах обнаружения, наведения, прицеливания, навигационной информации и данных жизнеобеспечения без применения неудобных и в принципе неприемлемых тубусов. Соревноваться с ярким (10^5 люкс) солнечным светом в условиях боевой кабины самолета возможно, только разделив функции записи и воспроизведения информации. С этой целью в потенциалоскопе с видимым изображением конструкторы применили две электронно-оптических системы: одна с тонким маломощным электронным пучком, записывающим на мишени электропотенциальное изображение, и вторая, создающая широкий, облучающий одновременно всю мишень электронный поток, который модулируется, проходя через ее мелкоструктурную сетку с диэлектрическим покрытием. Плотность тока во второй системе очень высока, до $20\text{--}30\text{ мкА/см}^2$, поэтому яркость изображения, воспроизводимого на специальном катодолюминесцентном экране, превышала $2500\text{--}3000\text{ кд/м}^2$ (т.е. в $50\text{--}100$ раз выше, чем у одноручевых телевизионных кинескопов того времени). Пилот в ярко освещенной кабине мог наблюдать четкую радиолокационную картину, отражающую обстановку вокруг его машины. Преимущества в яркости приборов типа потенциалоскопа были столь очевидны, что аналогичные приборы начали разрабатываться и для наземного применения. Руководители полетов и диспетчеры гражданских аэропортов и военных аэродромов получили возможность в комфортных услови-



Рис. 2.4.7. Запоминающие индикаторные ЭЛП

ях наблюдать напряженную воздушную обстановку на ярком экране потенциалоскопа с круговым обзором. Наиболее распространенной была запоминающая ЭЛП типа 31ЛН1.

Запоминающие осциллографические ЭЛП

В разработанной серии запоминающих осциллографических трубок (рис. 2.4.8) используется эффективный метод накопления зарядов и запоминания их на различных диэлектриках потенциалоскопов с видимым изображением.

Запоминающие осциллографические ЭЛП позволяют запоминать однократные и непрерывно протекающие процессы со скоростью записи в диапазоне $1-10^4$ км/с, сохранять их в течение нескольких часов, визуализировать на экране и одновременно считывать записанную на мишени (рис. 2.4.9) информацию в виде электрического сигнала. Запись в такой ЭЛТ производилась высоковольтным пучком диаметром 0,5-0,7 мм по площади специальной диэлектрической мишени, покрытой MgO или подобным материалом с высоким значением коэффициента вторичной эмиссии. Слабый короткий сигнал очень быстро фиксировался на бистабильной мишени, которая становилась в этих местах прозрачной для медленных электронов воспроизводящего прожектора. Вокруг закрытых ячеек мишени на экране возникало неяркое свечение фона, на котором прочерчивалась яркая линия сигнала. Эти бистабильные одно- и многолучевые ЭЛТ были настолько информативны и популярны, что осциллографы на них очень быстро заполнили все ядерные центры страны, все станции наблюдения за космическими лучами. Бистабильные специальные потенциалоскопы применялись на атомных авианесущих крейсерах и подводных лодках.

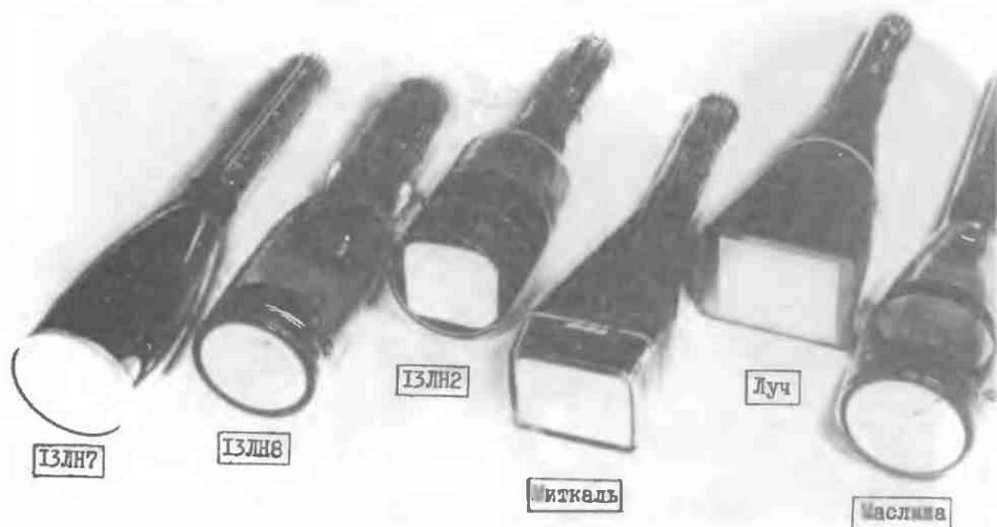


Рис. 2.4.8. Ряд запоминающих осциллографических ЭЛП

Основной элемент прибора — сетчатая мишень.

Мишень состоит из мелкоструктурной сетки с шагом 50–100 мкм, слоя диэлектрика толщиной 5–60 мкм, алюминиевой сетки толщиной 0,1 мкм (удерживается на диэлектрике силами молекулярного сцепления).

Сетчатая мишень

Алюминиевая сетка

Слой диэлектрика

Мелкоструктурная сетка

Сетчатая мишень
(увеличено в 40 раз)

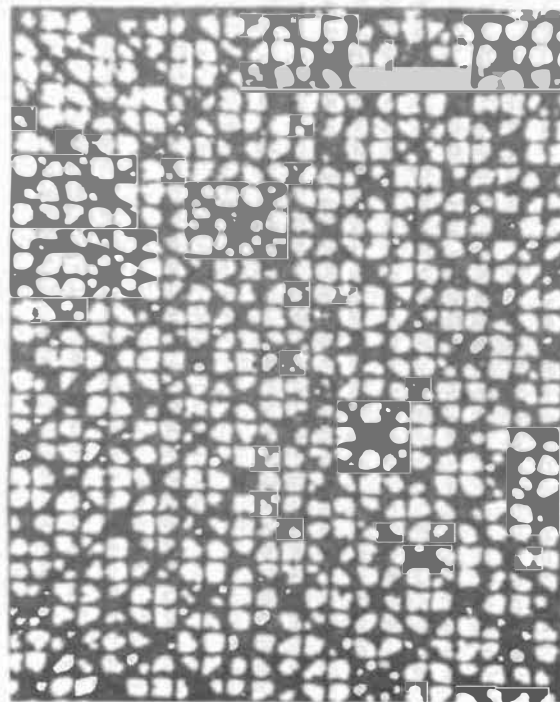


Рис. 2.4.9. Микроэлектронная мишень запоминающих осциллографических ЭЛП

Почти одновременно велись работы по созданию широкополосных и СВЧ осциллографических приборов. Предельный диапазон фиксируемых частот увеличился первоначально до 500 МГц, затем до 1 ГГц и теперь до 10 ГГц. Использование опыта изготовления узлов СВЧ-приборов при разработке осциллографических запоминающих ЭЛП привело к тому, что вместо отклоняющих пластин в ОЭЛП стали использовать сигнальные отклоняющие системы «бегущей волны». Для фиксации высокоскоростных сигналов быстрого действия фотозатворов было недостаточно и поэтому потребовалось введение в конструкцию трубок специальных микроканальных умножителей и волоконно-оптических световодов. В настоящее время ведутся исследования и разработки с целью повышения рабочего диапазона ОЭЛП до 15 ГГц.

Преобразовательные запоминающие ЭЛП

Преобразовательные запоминающие ЭЛП (рис. 2.4.10) занимают особое место в радиотехнических системах.

Наиболее распространенными являются:

- интегрирующие потенциалоскопы;
- вычитающие потенциалоскопы;
- ЭЛП преобразования режимов и форматов.

Интегрирующие потенциалоскопы нашли широкое применение в радиолокационных станциях для накопления сигналов и повышения отношения сигнал/шум. Вычитающие потенциалоскопы позволили успешно решить важнейшую тогда задачу селекции движущихся целей или защиту от пассивных помех противника, а также отражений от местных объектов («местников»), мешающих обнаружению низколетящих целей.



Рис. 2.4.10. Ряд преобразовательных запоминающих ЭЛП

Функциональные счетно-решающие ЭЛП

Функциональные ЭЛТ конструктивно представляют собой часть осциллографической ЭЛТ, в которой вместо излучающего узла размещается функциональная матрица с переменной по облучаемой площади электронной прозрачностью. Прошедший через функциональную матрицу ток, промодулированный по определенной функции от двух переменных, улавливается специальным электронным коллектором. Придав оптической прозрачности значение различных алгебраических либо тригонометрических функций, можно мгновенно получить величину необходимой линейной или угловой поправки, упреждения, сноса. Неточность расчета ФЭЛТ составляла менее 1%, время ответа — единицы микросекунды. Наряду с функциональными зависимостями трубки могут очень точно обсчитывать табличные данные, поэтому потребность в ФЭЛП была и остается значительной до сих пор. Появление такого класса приборов стало возможным благодаря созданию технологической базы вакуумной микроэлектроники. Матрицы функциональных ЭЛР, мелкоструктурные сетки мишеней потенциалоскопов изготавливались различными высокоточными методами нынешней микроэлектроники, т.е. путем создания прецизионных фото, алмазного и химического фрезерования на уникальных делительных машинах, катодного распыления металлов, электрохимической гальванопластики и т.д.

Приведенные выше данные о различных ЭЛП получены, в основном, в период с 1950 по 1985 год. К сожалению за перестроечный период с 1985 по 2000 год трудно отметить какие-то достижения в области развития электронно-лучевых приборов. Однако за это время сформировались направления и основы прорывных технологий, позволяющие разработать оптимальные меры по восстановлению технологической и производственной базы создания унифицированной минимальной номенклатуры ЭКБ средств отображения в комплексе с эффективными вычислительными средствами, необходимой и достаточной для разработки стратегически важных систем и комплексов радиоэлектроники в ближайшие 5—10 лет.

Такой технологией может быть технология создания комплексных систем отображения на базе микродисплеев, «систем на кристалле» и микроэлектронно-оптических систем. Новые перспективные системы управления должны строиться на основе пространственно распределенных вычислительных систем, единых для всех уровней управления, и в реальном масштабе времени. Технические и программные средства должны обеспечивать возможность управления должностными лицами различных рангов независимо от их места расположения (т.е. не только со своих стационарных рабочих мест) и принятия оперативных решений в каждый момент времени. А для этого необходимо создание новых многофункциональных системных комплексов, состоящих из технических и программных средств, обеспечивающих, в частности, создание виртуального изображения информации оперативной обстановки на фоне электронной карты местности («виртуальная реальность» или более прогрессивная «совмещенная виртуальная реальность» с сохранением нормальной визуализации окружающей местности). Такая система отображения может обеспечить возможность эффективного дистанционного управления мобильными объектами (например, БПЛА, БМП,

танки), роботами различного назначения — снайперами, минерами, разведчиками, спасателями МЧС. Эффективность дистанционного управления с использованием системы отображения «виртуальной реальности» обеспечивается эффектом «присутствия» управляющего непосредственно в самом управляемом мобильном объекте и, главное, стереоскопическим эффектом, максимально приближающим к естественному восприятию человеческим глазом стереоскопического видения.

Основным электронным компонентом систем отображения «виртуальной реальности» является микродисплей отражающего рефлексивного типа (LCOS-Liquid-Crystal-on-Silicon) размером 12–40 мм: разрешающая способность до 2048×1550 элементов; контрастность не менее 1000:1; коэффициент использования светового потока не менее 0,65 (против 0,05–0,25 у про-светных LCD); быстродействие (время отклика) единицы миллисекунд (до 180–360 Гц кадровой частоты); малая потребляемая мощность от автономных источников питания.

Разработка базовых типов микродисплеев минимальной номенклатуры из 2–4 типоразмеров 12–40 мм может обеспечить создание унифицированных электронно-оптических видеомодулей для широкого спектра РЭА, систем управления общего и специального назначения, различных уровней управления от стратегического до тактического в различных условиях эксплуатации — от стационарного до мобильного, возимого и носимого вариантов исполнения.

2.5. Квантовая электроника

Г.М. Зверев,
доктор физико-математических наук,
профессор

Изобретение лазеров, ознаменовавшее рождение квантовой электроники, являет собой одно из ярчайших открытий XX века, коренным образом повлиявшее на развитие современной цивилизации.

В 2005 году отмечали 50-летие опубликования пионерских работ нобелевских лауреатов советских ученых Н.Г. Басова и А.М. Прохорова и американца Ч. Таунса по созданию первых приборов квантовой электроники — мазеров и лазеров.

За истекшие годы лазеры не только стали предметом научных исследований, но и легли в основу многих новых базовых технологий. Волоконно-оптическая связь, запись информации на оптические диски, глобальное распространение сети Интернет стали возможны только после появления современных эффективных лазеров.

Огромный вклад внесли лазеры и в технологию обработки материалов (резка, сварка, сверление отверстий, закалка, отжиг и т.п.), они дали новый импульс развитию медицины. Разнообразны и многочисленны военные применения лазеров. В целом лазеры проявили себя во многих направлениях человеческой деятельности.

В статье рассматривается вклад квантовой электроники — конкретно лазеров — в развитие вооружения и военной техники на нескольких конкретных примерах из области лазерных информационных военных технологий: создание лазерных дальномеров, разработка лазерных целеуказателей (подсветчиков цели) для высокоточного оружия, неконтактных взрывателей и лазерных гироскопов, в которых использование лазеров позволило коренным образом улучшить решение боевых задач.

Появление радиолокаторов во время Второй мировой войны дало возможность определять расстояние до самолетов, измеряя временную задержку отраженного от цели импульса СВЧ-излучения. Широкая диаграмма направленности антенны радиолокатора и, соответственно, плохая разрешающая способность радиолокатора не позволяли перенести метод радиолокационного измерения дальности самолетов на земную поверхность, насыщенную местными предметами. Ситуация резко изменилась с появлением лазеров. Расходимость лазерного луча с использованием оптического телескопа не превышает $1/1000$ (уширение лазерного луча составляет 1 м на 1 км), т.е. позволяет четко выделить цель на фоне местности. Поэтому вскоре после изобретения первых лазеров появились и лазерные импульсные дальномеры на кристаллах рубина. Лазер в этих приборах работал в режиме модулированной добротности резонатора. При этом в кристалле происходит накопление энергии возбуждения, подводимой лампой накачки, которая после открытия затвора высвобождается в виде короткого мощного лазерного импульса. Лазер в таком режиме является аналогом магнетронного передатчика радиолокатора.

Так как эффективность лазеров на рубине была очень низкой (для генерации импульса излучения с энергией 0,2 Дж расходовалось до 400 Дж энергии возбуждения — импульсного разряда конденсатора через лампу накачки), конденсаторы и блоки питания — громоздкими, то первые дальномеры имели массу около 100 кг. Тем не менее, такие приборы были разработаны и приняты на вооружение армиями различных стран мира в конце 1960-х — начале 1970-х годов.

Появление новых, более эффективных, лазерных материалов, таких как кристаллы алюмо-иттриевого граната, легированного неодимом, позволило создать твердотельные лазеры с более чем на порядок повышенной эффективностью. А это достижение, в сочетании с разработкой более эффективных лавинных фотоприемников, больших интегральных микросхем для цифровой обработки и индикации сигналов, дало возможность создать лазерные дальномеры нового поколения с массой около 1 кг — ручные лазерные дальномеры — бинокли (рис 2.5.1). Наш институт принял активное участие в создании таких приборов и в оснащении ими Советской армии. В настоящее время такие лазерные дальномеры широко используются для оснащения артиллерийских расчетов, их оптико-электронные блоки входят в состав приборно-прицельного оснащения танков, вертолетов, самолетов и других движущихся военных объектов.

В дальномерах второго поколения используется невидимое инфракрасное лазерное излучение ионов неодима в кристаллах с длиной волны 1,06 мкм. В последнее время идет интенсивная замена приборов этого поколения на новые дальномеры с использованием лазерного излучения с длиной

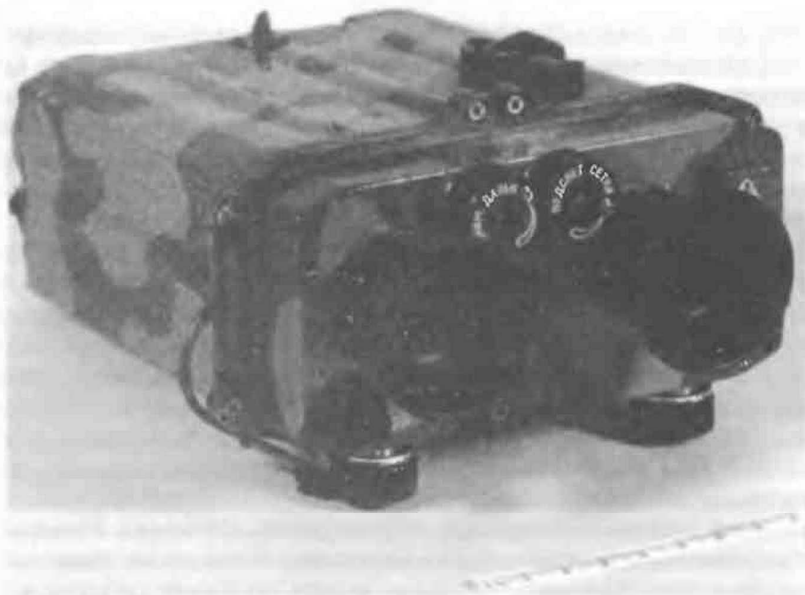


Рис. 2.5.1. Лазерный дальномер

волны 1,54 мкм. Дело в том, что инфракрасный свет неодимовых лазеров опасен для людей, находящихся на пути лазерного луча: при попадании этого излучения в глаза человека оно может повредить сетчатку глаза, так как остро фокусируется оптической системой глаза на ее поверхность. При сильном повреждении человек частично теряет зрение. Более длинноволновое излучение (1,54 мкм) поглощается в объеме глазной жидкости и не достигает поверхности сетчатки. Безопасная дистанция, дальше которой лазерное излучение уже не представляет опасности для зрения невооруженным глазом, для неодимовых лазерных дальномеров превышает 1 км, а для приборов 3-го поколения (1,54 мкм) составляет около 10 м.

Лазеры для дальномеров 3-го поколения более сложные. Прямая генерация лазерного излучения на волне 1,5 мкм существенно менее эффективна, чем в неодимовых лазерах и осуществляется только в стеклах сложного химического состава с комплексным легированием ионами эрбия и иттербия. Поэтому интенсивно развиваются конкурентные методы нелинейного преобразования излучения неодимовых лазеров в требуемый спектральный диапазон в результате вынужденного комбинационного рассеяния света в кристаллах и методами оптической параметрической генерации в нелинейных кристаллах. В нашем институте разработан оригинальный лазерный дальномер безопасного диапазона 1,54 мкм на предложенном нашими отечественными учеными кристалле калий-гадолиниевого вольфрамата (КГВ). В этом приборе в одном и том же кристалле генерируется лазерное излучение на примесных ионах неодима и оно же преобразуется в излучение вынужденного комбинационного рассеяния требуемой длины волны. Учитывая меньшие потери на поглощение в атмосфере на волне 1,54 мкм, прибор эффективно измеряет дальность до 10 км при выходной энергии излучения менее 10 мДж.

Дальнейший прогресс лазерной дальнометрии связан с использованием полупроводниковых лазеров. Хотя мощность одиночного полупроводникового лазера не превосходит несколько десятков ватт, что связано с фундаментальными ограничениями из-за очень малых размеров излучающей области р-п-перехода (при этом плотность мощности достигает 10^7 Вт/см^2), а в типовом лазерном дальнометре на твердотельном лазере импульсная мощность достигает 1 МВт, тем не менее использование групповых излучателей, объединяющих излучение до 100 одиночных диодов, а также методов накопления сигнала от высокочувствительных приемников позволяет создать миниатюрные лазерные дальнометры на дистанции до 3–5 км, измеряющие расстояние до неподвижных предметов, или на дистанции до 1 км — до движущихся целей. Такие приборы находят широкое применение как в гражданских целях (контроль разрешенной скорости автомобилей в потоке уличного движения, устройства предотвращения столкновений морских судов, точная остановка железнодорожных составов в заданном месте, измерение трасс при игре в гольф и т.п.), так и в военных целях при локальных операциях. В принципе дальнометры на полупроводниковых лазерах по массогабаритным характеристикам (сотни грамм) пригодны для размещения на стрелковом оружии.

Лазерные дальнометры постоянно используются при точных траекторных измерениях орбит спутников системы ГЛОНАС. Сокращение длительности лазерных импульсов в этих приборах до пикосекундного уровня позволяет поднять точность траекторных измерений до нескольких сантиметров.

Другим примером военного информационного использования лазеров является лазерное целеуказание. Остро направленный, четко очерченный лазерный пучок является идеальной указкой, позволяющей четко выделить необходимый объект, обратить на него внимание. Поэтому лазерные указки так популярны у лекторов и экскурсоводов.

Размещение лазерной указки видимого света (обычно состоящей из красного полупроводникового лазера и фокусирующей оптики) на пистолете позволяет стрелять, не заглядывая в прицел (например, с бедра), лишь наблюдая визуально лазерную метку на мишени. В боевом стрелковом оружии обычно используется инфракрасное целеуказание невидимым инфракрасным лазерным излучением. Метка на цели при этом наблюдается через инфракрасный ночной прицел или инфракрасные очки.

Этот же принцип лазерного целеуказания (подсветка целей) получил широкое применение при разработке комплексов высокоточного вооружения для стрельбы корректируемыми (управляемыми) артиллерийскими снарядами, авиационными ракетами «воздух—земля» и корректируемыми авиационными бомбами. В них управляемый боеприпас имеет головку самонаведения, которая принимает отраженное от цели лазерное излучение, генерируемое лазерным дальнометром-целеуказателем (ЛЦД), и обеспечивает управление полетом для обеспечения попадания в цель.

Наша страна является одной из немногих стран мира, которые разработали и производят такое вооружение. Артиллерийский комплекс управляемого вооружения «Краснополь» разработки Тульского КБ приборостроения обеспечивает поражение цели с первого выстрела на удаленных дистанциях. Подсветку цели для этого комплекса обеспечивают ЛЦД разработки ФГУП



Рис. 2.5.2. Лазерный дальномер-излучатель

«НИИ «Полюс». За последние два десятилетия произошли разительные изменения в облике и функциях этих приборов. Прогресс микроэлектроники, совершенствование лазеров, новые конструкторские решения позволили существенно сократить вес и габариты ЛЦД (с 60 кг для приборов 1-го поколения до 18 кг для современных образцов (рис 2.5.2)) с существенным расширением их функций — возможностью разведки поля боя днем и ночью и синхронизации выстрела орудия и подсвета цели, наличием средств подключения к автоматизированным системам управления боевыми операциями. Разработанные приборы обеспечивают возможность целеуказания со всеми имеющимися комплексами высокоточного вооружения как сухопутных войск, так и для авиационных средств (ракеты и бомбы с лазерным наведением). Дальнейшее развитие средств лазерного целеуказания идет по пути замены оператора — наводчика средствами технического зрения, что делает возможным размещать ЛЦД на ДПЛА и других автоматизированных безлюдных системах разведки.

Введение лазерного целеуказания в системы высокоточного вооружения совершило революцию в методах поражения малоразмерных целей. Раньше для этого были необходимы сотни и тысячи снарядов, а теперь поражение обеспечивается с первого выстрела. Особенно эффективно высокоточное оружие с лазерным наведением в современных локальных конфликтах и при борьбе с терроризмом, где часто бывает необходимо поразить точечную цель, оставив в целости окружающие здания и местные предметы.

Следующим примером эффективного использования лазеров в системах вооружения являются лазерные взрыватели — неконтактные датчики цели. В них используются полупроводниковые лазеры и фотоприемники, дающие



Рис. 2.5.3. Лазерный гироскоп

команду на подрыв боеприпаса на заданном расстоянии от цели. Современные лазеры и интегральные схемы делают такие взрыватели очень миниатюрными, способными противостоять мощным механическим воздействиям, возникающим при выстреле снаряда или пуске ракеты.

Наконец, еще одно важнейшее военное информационное применение лазеров — лазерная гироскопия. Частота кольцевого лазера (свет в котором распространяется по замкнутому контуру) чувствует вращение этого контура в инерциальном пространстве. На этой идее основаны лазерные гироскопы (ЛГ) — кольцевые газовые лазеры, резонатор которых состоит из прецизионных зеркал с ничтожно малыми потерями света, жестко закрепленных на прочном ситалловом корпусе с независимыми от температуры линейными размерами. Для устранения «мертвой зоны» нечувствительности ЛГ в приборах 1-го поколения использовался виброподвес, заставляющий прибор колебаться вокруг положения равновесия. Такие приборы из-за наличия подвижных частей не могут противостоять жестким механическим воздействиям и поэтому получили широкое применение только в гражданской авиации, где внешние воздействия относительно комфортны. Точность таких ЛГ достигает 0,01 градуса дуги/час. В современных приборах, разрабатываемых в нашем институте, для исключения зоны нечувствительности используются магнитооптические эффекты Зеемана и Фарадея, исключающие необходимость в виброподвесе, превращающие ЛГ в монолитный жесткий прибор, устойчивый к внешним воздействиям (рис. 2.5.3). Такие изделия, имеющие несколько меньшую точность, находят широкое применение для управления высокоманевренными движущимися объектами. Следует сказать, что ЛГ, в отличие от механических гироскопов, не требуют значительного времени для приведения в рабочее состояние.

Перспективы развития лазерных гироскопов состоят в дальнейшей миниатюризации приборов, повышении качества зеркал резонатора, снижении габаритов и энергопотребления, снижении стоимости. Наряду с развитием ЛГ на газовых лазерах проводятся поисковые работы по созданию ЛГ на миниатюрных полупроводниковых лазерах, относительно грубых по точности, но малогабаритных и дешевых.

Рассмотрены лишь несколько отдельных примеров использования лазеров в информационных системах современной военной техники. Бурный технический прогресс в квантовой электронике, как и в электронике вообще, обеспечил лазерам важную роль в системах вооружения XXI века.

Литература

- Казаков А.А. Лазерные информационные технологии военного и двойного применения. — Военный парад, 2003, №1, с.74-75.
- Пашков В.А., Прядеин В.А., Плешков А.А. Лазерные целеуказатели — дальномёры для высокоточного оружия с полуактивными ГСН. — Военный парад, 2002, № 5, с. 68-69.
- Зверев Г.М., Дмитриев В.Г., Голяев Ю.Д. Лазерные гироскопы второго поколения. — Военный парад, 2003, №3, с. 96-97.

РАЗВИТИЕ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

3.1. Динамика развития самолетной радиолокации

А.И. Канащенков,

доктор технических наук, профессор

А.Н. Осокин, *член-корреспондент Академии
электротехнических наук РФ*

И.С. Рыжак, *доктор технических наук, профессор*

XX век стал веком бурного развития науки и техники, в котором все накопленные человечеством знания и материальные ресурсы оказались востребованными двумя мировыми войнами и последующим глобальным противостоянием двух мировых социально-экономических систем.

Особую роль при этом играли три важных научно-технических направления: использование атомной энергии, создание ракетных и радиолокационных систем.

В нашей стране в тяжелейших условиях Великой Отечественной войны была осознана необходимость развертывания работ по этим важнейшим, сложнейшим и дорогостоящим направлениям, для организации которых и руководства ими были созданы Комитеты при Правительстве СССР — Совнарком (Комитеты СНК №1, №2, №3). Каждый из них решал одну из вышеуказанных проблем и имел право привлекать к работам любой наркомат. Были отозваны с фронта по представлению ведущих ученых страны нужные кадры. В кратчайший срок был создан ряд новых предприятий: НИИ, КБ и заводы. Все это позволило в короткие сроки развернуть работы в небывалых масштабах.

Комитет СНК №3 (по радиолокации), созданный в 1943 году, возглавил член Политбюро Г.М. Маленков, его заместителем был назначен выдающийся ученый и организатор в области радиотехники А.И. Берг. Срочно были развернуты широкие научно-исследовательские работы по созданию РЛС, их составных частей и электронных компонентов, организовано серийное производство РЛС, разработанных перед самой войной. Первые радиолокационные станции РУС-2 и «Пегматит» способствовали успешному отражению налетов вражеской авиации на Москву, Ленинград, Севастополь и другие города. Первая авиационная РЛС, созданная в годы войны, «Гнейс-2» (1942 г.), устанавливавшаяся на самолеты ДБ-3Ф, Пе-2 и Пе-3, не допустила снабжения окруженной под Сталинградом армии Паулюса по организованному Люфтваффе ночному «воздушному мосту». Появившаяся к

началу 1945 года авиационная РЛС «Гнейс-5с» устанавливалась на торпедоносцы, предназначенные для удара по немецким кораблям, нападавшим на направляющиеся в СССР конвои союзников с военной техникой, материалами и продовольствием.

После войны радиолокация активно развивалась. Особое место она заняла в ВВС, где использовалась, в первую очередь, в истребительно-штурмовой авиации.

Анализ динамики развития самолетной радиолокации дает яркую картину трансформации во второй половине XX века этого технического средства, решавшего одну конкретную задачу — обнаружение цели в свободном пространстве, в сложнейшую высокоинтеллектуальную систему, обеспечивающую выполнение целого набора важнейших функций и задач авиационных комплексов, способную адаптироваться к еще более сложным новым условиям.

Значение самолетной радиолокации существенно возросло за этот период. Появление ракет класса «воздух-воздух» изменило тактику применения истребительной авиации, что потребовало качественного изменения РЛС — увеличения их дальности действия и расширения функций. Фактически, к настоящему времени, авиация стала решать стратегические задачи, это показали вооруженные конфликты и войны за последние 15–20 лет.

Поэтому при выявлении закономерностей развития радиолокационных систем особое значение в анализе приобретает установление:

- причинно-следственных связей между развитием тактико-технических требований и характеристик РЛС, с одной стороны, и возможностями их реализации, с другой;
- соотношения между эволюционным и революционным путями развития радиолокационных систем и комплексов с выявлением предельных факторов, определяющих необходимость перехода изделий из одного поколения в другое;
- периода вызревания необходимости перехода к следующему поколению. Переход к следующему поколению РЛС необходим, когда тактико-технические возможности предыдущего поколения исчерпаны в условиях действия новых тактических требований, а доработки и модернизация существующих изделий предыдущего поколения не могут обеспечить требуемого от них дальнейшего роста тактико-технических характеристик из-за:
 - изменения тактики боевых действий и возможностей потенциального противника;
 - поставленной задачи достижения либо паритета, либо превосходства над усиливающим свои технические возможности противником;
 - отсутствия необходимых технических средств (технологии, материальной базы, в том числе, компонентной и элементной);
 - отсутствия кадров с необходимой квалификацией, способных осознать необходимость такого перехода, добиться выделения необходимых инвестиций и решения организационно-кадровых вопросов для его реализации, а, главное, способных создавать технику нового поколения;

- отсутствия своевременной подготовки научных и инженерных кадров к работе по созданию изделий нового поколения, в том числе путем корректировки вузовских программ и введением в них новых разделов и даже дисциплин.

Особое место радиолокация заняла в авиации, поскольку существенно повысила боевую эффективность авиационных комплексов, обеспечивая их всепогодное и круглосуточное применение. Именно эти два качества радиолокации, а также самая большая дальность обнаружения цели (по сравнению со всеми другими бортовыми системами, дающими информацию о цели — тепловыми, лазерными, оптическими и телевизионными) выводят бортовую радиолокационную систему на первый план, делая РЛС, или как принято называть за рубежом — радар, основой бортового радиоэлектронного комплекса. Однако у радиолокации есть еще одно не менее важное качество, значение которого с каждым новым поколением РЛС возрастает, — высокая функциональная адаптивность, т.е. способность приспосабливаться фактически к новым условиям. Это обусловлено тем, что только радиосигнал позволяет изменять частоту и полосу излучения в весьма широких пределах, а также его мощность; излучать его непрерывно или импульсно; с широкой мгновенной или результирующей полосой частот (до нескольких гигагерц) или узкополосно; с широким набором возможностей по способу модуляции, что позволяет реализовать управление разрешающей способностью по углам и дальности, не только «осуществлять радиовидение», но и добиваться распознавания цели. О том, сколь велики возможности функциональной адаптации с помощью радиолокационного сигнала, свидетельствует такой факт из истории отечественной самолетной радиолокации: если в течение многих лет отраженный от Земли сигнал РЛС истребителя являлся мешающим, представляя собой одну из самых сильных помех для работы по низколетящим целям, то в радарх поколения «4+» он используется в режиме «картографирование поверхности», в котором с помощью отраженных от Земли сигналов РЛС днем и ночью при любой погоде и высотах полета на борту самолета формирует высококачественное изображение как подстилающей поверхности, так и объектов. Это может использоваться для прокладки маршрута, выделения цели для нанесения удара высокоточным оружием и управления им (ракетами «воздух-поверхность» и управляемыми бомбами), а также для мониторинга окружающей среды.

Необходимо сказать и о весьма важном потенциальном отрицательном свойстве радиолокационных систем и комплексов — их радиозаметности, так как излучение РЛС может в ряде случаев обнаруживаться целью раньше, чем она будет обнаружена РЛС. Именно поэтому необходимо создание бортового интегрированного радиоэлектронного комплекса (ИРЭК), включающего в себя пассивные неизлучающие системы, причем оптические должны использоваться днем в хорошую погоду, а радиометрические и другие пассивные системы, ведущие прием различных радиоизлучений, а также тепловые, — круглосуточно, в основном при работе по целям на малых дальностях. В сложных погодных условиях и при работе в ночное время по целям, находящимся на больших дальностях, когда боевые задачи может решать лишь РЛС, необходимо организовывать групповые действия самолетов с ра-

ботающими РЛС. Необходимо также включать в состав ИРЭК средства радиоразведки и радиоподавления противника, при этом бортовая радиолокационная система управления вооружением СУВ превращается в СУВО — систему управления вооружением и обороной самолета.

Подробное рассмотрение развития радиолокационных систем и комплексов истребительно-ударной реактивной авиации (на примере отечественной) показывает превращение радиолокации из средства, которое давало ограниченную информацию об одиночной цели, в мощную интегрированную на основе радара информационно-управляющую многоцелевую многофункциональную высокоинтеллектуальную систему (обеспечивающую эффективное взаимодействие человека с автоматом), способную одновременно обнаруживать и сопровождать большое количество целей и обстреливать часть из них в соответствии с количеством ракет, имеющимся на борту самолета. Эта система должна иметь широкий набор функций и быть способной адаптироваться к новым условиям и функциям, она должна распознавать цели (что является типичным для интеллектуальной системы, управляющей различными типами оружия), определять их приоритет по степени опасности и выбирать из имеющегося на борту оружия определенный тип, необходимый для поражения данной цели.

Радиолокационные системы могут также успешно использоваться не только на борту истребителей и многофункциональных самолетов, но и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и других типов и классов летательных аппаратов. Опыт последних боевых действий Израиля в Ливане показал высокую эффективность применения БЛА, совершивших за короткий период времени 1350 боевых вылетов для разведки целей, обнаружения и наблюдения за ними. На них устанавливалась аппаратура массой до 250 кг, в том числе, многорежимная РЛС с синтезированной апертурой. Наряду с широким применением указанных БЛА, в настоящее время в США ведутся работы по новому способу снижения заметности стратегических бомбардировщиков В-2 с помощью использования сменных поверхностных панелей, наиболее соответствующих выполняемым функциям, что потребует от авиационных РЛС повышения эффективности их обнаружения.

В таблице (см. цв. вклейку) представлена за период с 1950 по 2000 год динамика развития авиационных радиолокационных систем с последовательным наращиванием их возможностей и функций, их состава, с указанием впервые примененных технических решений, типов РЛС, элементной базы и основных компонентов с их разделением по периодам и поколениям.

Рассмотрены только отечественные авиационные системы и комплексы, принятые на вооружение в нашей стране, а также использующиеся в ряде зарубежных стран. Не приведены РЛС, разработка и испытания которых не завершены. Не приведена РЛС 2-го поколения ЦД-30, серийно изготавливавшаяся и устанавливавшаяся в течение короткого времени на истребителях МиГ-21 БИС, пока не началось крупносерийное производство РЛС «Сапфир-21». Дан прогноз по поколению «5».

Сведения о составе, назначении, определяющих характеристиках и функциях созданных за полвека пяти поколений авиационных радиолокационных систем для реактивных самолетов также приведены в таблице, наглядно

и полно представляющей динамику их развития с переходами от поколения к поколению.

Следует отметить, что самая первая самолетная отечественная РЛС, разработанная в годы ВОВ для винтовых самолетов и серийно выпускавшаяся с 1942 года, «Гнейс-2», работала в метровом диапазоне волн, на ламповом передатчике, использовала импульсный режим излучения и предназначалась для всепогодного и круглосуточного обнаружения воздушных и надводных целей и грубого (с точностью до единиц километров) определения дальности, а также направления на цель. Индикация в ней осуществлялась с применением электронно-лучевой трубки. РЛС «Гнейс-2» устанавливалась на дальний бомбардировщик ДБ-3Ф, пикирующий бомбардировщик Пе-2 и истребитель дальнего действия Пе-3. РЛС «Гнейс-5с» была модификацией «Гнейс-2» и предназначалась для торпедоносцев.

Поколение «1»

РЛС «Изумруд» (рис. 3.1.1) для истребителя МиГ-17 ПФ предназначалась для обнаружения в свободном пространстве одиночной цели, ее сопровождения и обеспечения ведения ближнего боя с применением пушечного вооружения. Она сопрягалась с оптическим прицелом и значительно превосходила по точности и другим тактико-техническим характеристикам РЛС типа «Гнейс».

«Изумруд» была первой отечественной авиационной РЛС, работавшей в сантиметровом диапазоне волн, что позволило при малой апертуре обеспечить пеленгацию с требуемыми точностью и дальностью действия ($D_{\text{ту-4}} = 11 \text{ км}$; $D_{\text{пораж.}} = 1,5 \text{ км}$). В «Изумруде» были использованы две антенны: одна для обнаружения цели, другая для ее сопровождения и прицеливания при атаке. В состав «Изумруда» входил и механический счетно-решающий прибор (СРП), обеспечивающий расчет рубежа атаки. РЛС «Изумруд» была принята на вооружение в составе истребителя МиГ-17 ПФ в 1950 году.



Рис. 3.1.1. РЛС «Изумруд» в поперечном сечении самолета

Поколения «2» и «2+»

Появление ракет класса «воздух-воздух» привело к коренному изменению тактики воздушного боя и сделало возможным осуществление дальнего боя. Однако для этого было необходимо увеличить дальность действия бортовой РЛС. В РЛС «Сокол» (рис. 3.1.2) для существенного увеличения дальности действия была применена однозеркальная антенна диаметром 1 м, что потребовало нового решения в конструкции самолета Як-25, обеспечивающего размещение антенны РЛС в носовой части его фюзеляжа с максимальным использованием апертуры. В состав «Сокола» впервые входил электронный аналоговый СРП, позволявший решать системы дифференциальных уравнений для обеспечения режимов атаки.

В РЛС «Сокол» в одной антенне совмещались функции дальнего поиска и углового сопровождения, а также была применена гидравлическая система управления антенной, что позволило существенно уменьшить ее вес по сравнению с антенной, использующей электропривод (дальность обнаружения 36 км). РЛС «Сокол» была принята на вооружение в составе истребителя Як-25 в 1955 году. Начиная с «Сокола», все отечественные бортовые РЛС предусматривали использование кроме пушек еще и ракет класса «воздух-воздух» для ведения воздушного дальнего боя.

К поколению «2» также относятся РЛС «Орел» (рис. 3.1.3) для истребителя-перехватчика ПВО Су-15, РЛС «Тайфун» для истребителя-перехватчика ПВО Су-15ТМ и РЛС «Сапфир-21» для фронтового истребителя МиГ-21. К поколению «2» следует также отнести РЛС «Изумруд-2» для истребителя МиГ-19, поскольку она обеспечивала использование ракет «воздух-воздух», ее основные характеристики такие же, как у РЛС «Изумруд», отличие составляет только $D_{\text{пораж.}} = 2,5$ км (для ракеты).

РЛС «Смерч» (рис. 3.1.4) для дальнего истребителя-перехватчика Ту-128 и РЛС «Смерч-А» для его модернизированного варианта Ту-128М обеспечили значительное увеличение как рубежей перехвата более скоростных и более высотных целей, так и поражение их на встречных ракурсах. РЛС

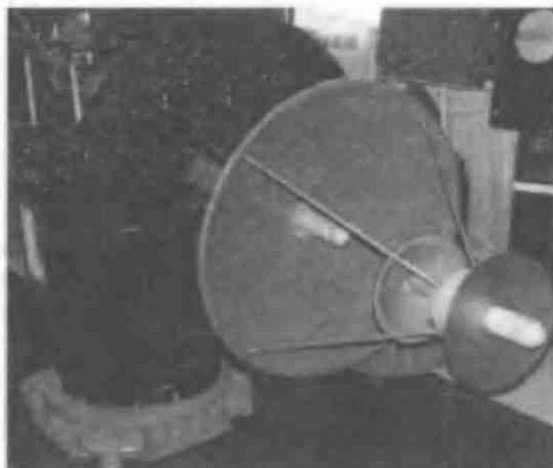


Рис. 3.1.2. РЛС «Сокол»

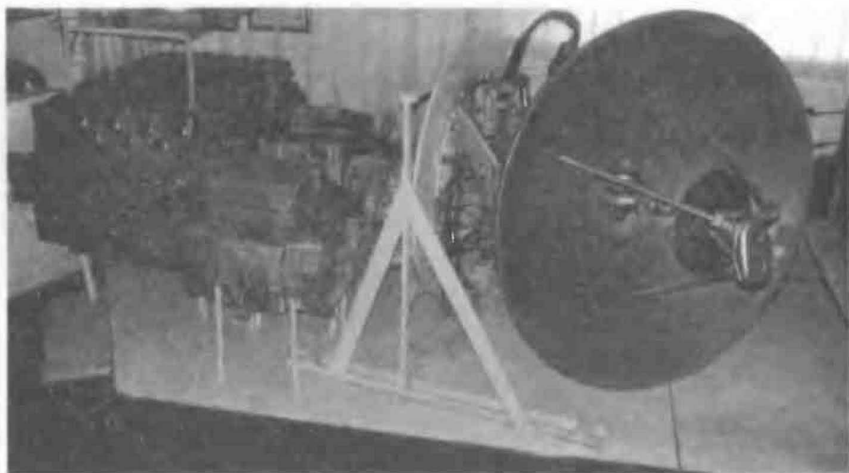


Рис. 3.1.3. РЛС «Орел»

«Смерч-А» предназначалась также для установки в высокоскоростной перехватчик МиГ-25, который выполнял функции высотного разведчика. Все они предназначались для всеракурсного перехвата одиночной цели в свободном пространстве и поэтому отнесены к поколению «2+».

Следует отметить, что поскольку РЛС поколений «2» и «2+» работали по целям только в свободном пространстве, где отсутствовали мешающие отражения от подстилающей поверхности, в них не требовалось использовать когерентные системы. Поэтому во всех РЛС этих поколений стояли магнетронные передатчики.

Отличие РЛС поколения «2+» от «2» — они обеспечивали всеракурсный перехват на дальних рубежах. Для РЛС поколения «2+» были созда-

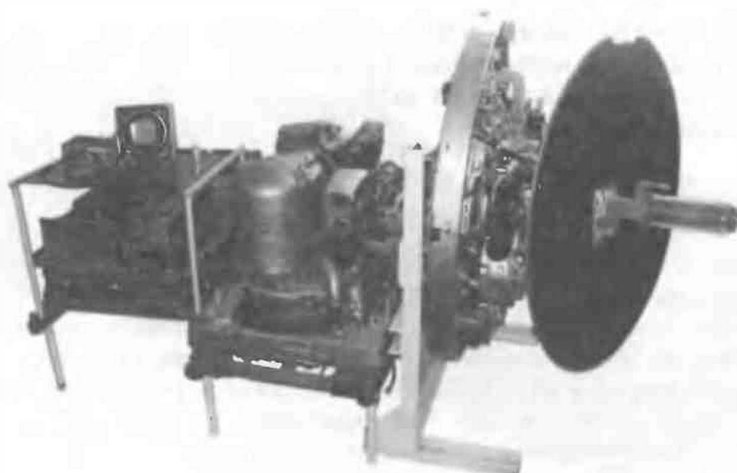


Рис. 3.1.4. РЛС «Смерч»

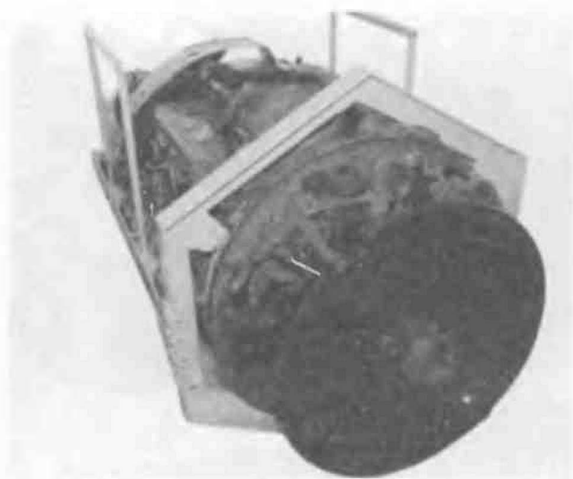


Рис. 3.1.5. РЛС «Сапфир-21»

ны мощные магнетронные передатчики с жидкостным охлаждением, позволившим обеспечить их размещение на истребителе (в «Смерче» $P_{\text{ср.}}=500$ Вт, $P_{\text{имп.}}=500$ кВт; в «Смерче-А» $P_{\text{ср.}}=1000$ Вт, $P_{\text{имп.}}=1$ МВт). Потери энергии в волноводном тракте были значительно снижены вследствие применения ферритовых вентилях в качестве стабильных согласующих СВЧ-устройств. Эти РЛС имели высокую помехозащищенность, в том числе от угловых помех благодаря впервые созданной в стране моноимпульсной пеленгации.

В РЛС этого поколения были впервые применены антенны Кассегрена, которые обеспечивали моноимпульсную пеленгацию, поляризационную селекцию и некогерентную компенсацию угловых помех и имели малый вес. Антенны Кассегрена использовались в РЛС «Смерч», «Смерч-А», «Сапфир-21» (рис. 3.1.5), «Тайфун». Широкодиапазонность антенн этого типа обеспечивала также работу передатчика подсвета полуактивной головки самонаведения ракеты «воздух-воздух» в использующих эту антенну РЛС, а также работу второго передатчика в вынесенном диапазоне частот в РЛС «Смерч-А». Антенны Кассегрена использовались в последующем во всех РЛС поколений «3» и «4».

Поколение «3»

Достигнутые к началу 1970-х годов результаты создания и успехи боевого применения авиационных РЛС и бортовых РЭК на их основе привели к существенному изменению тактики авиационных средств нападения. Их штатным режимом стал маловысотный полет, создающий для самолетной РЛС мощные помехи в виде мешающих отражений от Земли (при этом увеличение мощности передатчика РЛС положения не улучшало, так как при этом возрастала и мощность мешающих отражений).

В связи с этим новой задачей авиационных РЛС поколения «3» стала реализация методов выделения полезного сигнала на фоне мешающих отраже-

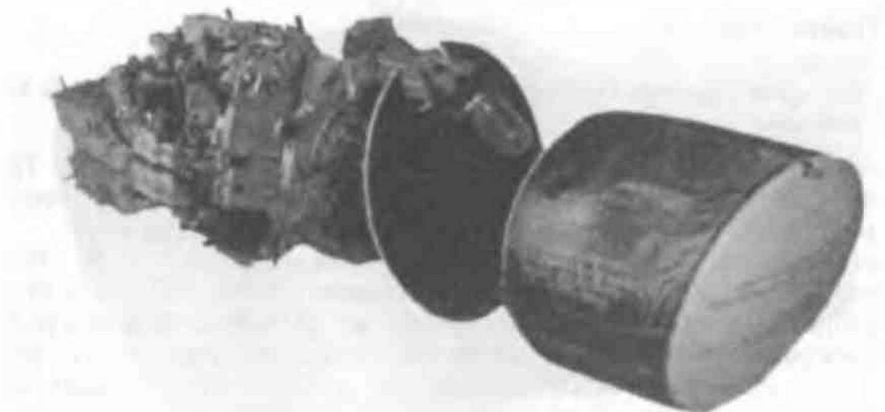


Рис. 3.1.6. РЛС «Сапфир-23»

ний от Земли. Это привело к необходимости применения в качестве зондирующего сигнала импульсного когерентного излучения для осуществления селекции движущихся целей (СДЦ).

В РЛС «Сапфир-23» (рис. 3.1.6), созданной для истребителя МиГ-23, СДЦ обеспечивалась использованием в качестве опорного сигнала отражения от Земли («внешняя когерентность»). Принципиальным недостатком такого метода был высокий уровень флуктуаций опорного сигнала.

Первым в нашей стране истребителем, способным с помощью РЛС перехватывать цели в задней полусфере на фоне Земли, стал истребитель с изменяемой геометрией крыла МиГ-23. Позже на основе РЛС «Сапфир-23» была создана РЛС «Сапфир-25» (рис. 3.1.7) для высокоскоростного перехватчика МиГ-25.

Однако эффективность указанных авиационных комплексов была недостаточной из-за малых дальностей действия РЛС в режиме СДЦ, что являлось следствием недостаточной когерентности опорного сигнала.

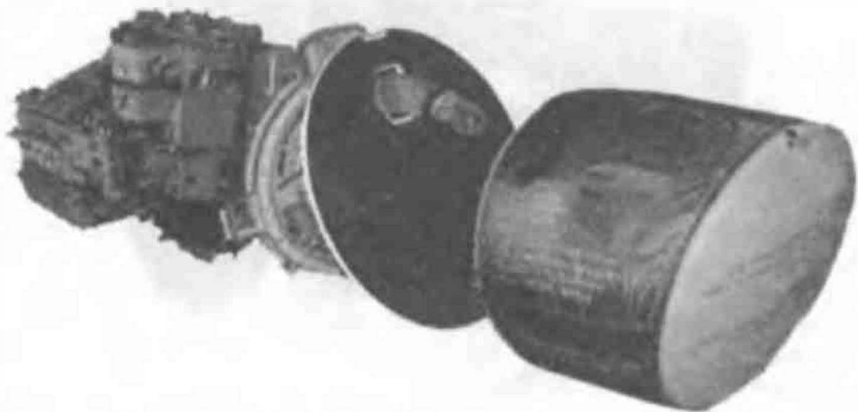


Рис. 3.1.7. РЛС «Сапфир-25»

Поколение «4»

Причины необходимости перехода от поколения «3» к поколению «4» были комплексными:

- неудовлетворительность селекции движущихся целей на фоне Земли при использовании в бортовой РЛС внешней когерентности, что настоятельно требовало применения внутренней когерентности;
- поставленная задача создания истребителя, который мог бы обеспечить превосходство в воздухе, потребовала, чтобы РЛС была многофункциональной и многорежимной, обеспечивающей всеракурсный перехват и работающей не менее чем по двум целям (для этого применялись нескольких видов зондирующих сигналов с различными частотами повторения и сочетанием аналоговой и цифровой их обработки).

В результате созданная РЛС поколения «4» имела высокую боевую эффективность и обеспечивала всеракурсный перехват на фоне Земли.

СУВ С29 на основе РЛС Н019 (рис. 3.1.8) для легкого фронтового истребителя МиГ-29 предназначалась для выполнения широкого набора функций по всеракурсному обнаружению и перехвату различных воздушных целей, в том числе на фоне Земли, а также для решения других задач по завоеванию превосходства в воздухе. $D_{обн. Н019} = 80$ км.

В С27 на основе РЛС Н001 (рис. 3.1.9) для перехватчика ПВО Су-27 также предназначалась для выполнения аналогичных функций в системе ПВО. Поэтому при их создании, которое велось почти одновременно, широко использовалась унификация на уровне блоков и узлов, что позволило существенно сократить сроки обеих разработок и затраты на них, а также упростить и удешевить их эксплуатацию. $D_{обн. Н001} = 120$ км (поскольку диаметр антенны в истребителе Су-27 в 1,5 раза больше, чем в МиГ-29). Все это позволило МиГ-29 и Су-27 стать основой отечественной фронтовой авиации и авиации ПВО, а также использоваться во многих странах мира. Авиацион-

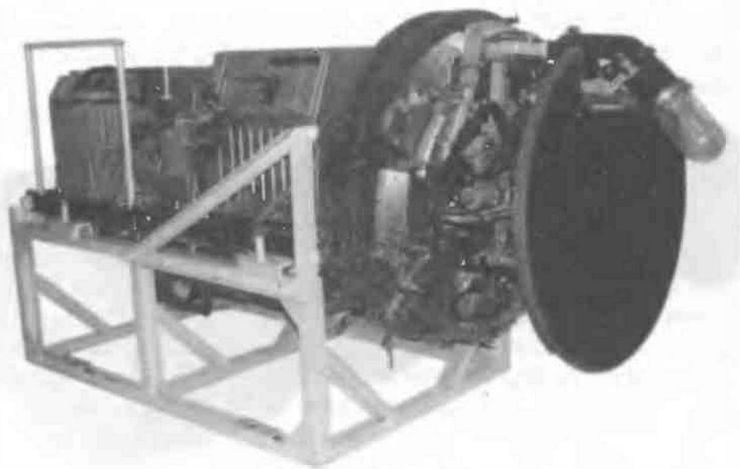


Рис. 3.1.8. РЛС Н019

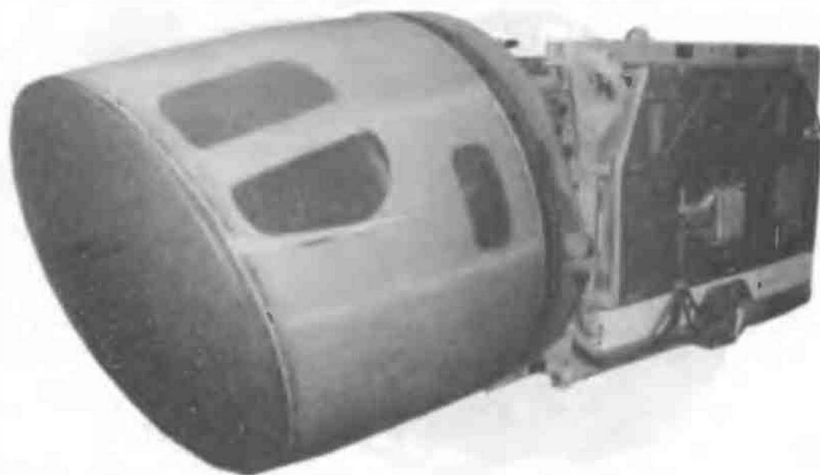


Рис. 3.1.9. РЛС H001

ные боевые комплексы поколения «4» самолетов МиГ-29 и Су-27 (Су-30) показали высокую конкурентоспособность на внешнем рынке. В 2005 году МиГ-29 находился на вооружении ВВС 25 стран мира, а Су-27 — 7 стран.

Следует отметить, однако, что изменение тактики применения истребительной авиации в последние десятилетия потребовало существенного расширения функций авиационных комплексов поколения «4», в частности, их боевой работы по наземным и надводным целям (режим «воздух-поверхность» для РЛС). Радиолокационные комплексы поколения «4» также характеризовались их недостаточной эффективностью при борьбе с малозаметными целями (крылатые ракеты, самолеты типа «Стелс») из-за неспособности обеспечения высококачественного спектрального анализа сигналов.

Поколение «4+» («5-»)

Решение двух вышеуказанных задач потребовало создания РЛС поколения «4+», обладающих и рядом других новых качеств. Это стало результатом того, что РЛС поколения «4+» впервые разрабатывалась не традиционно под конкретный самолет и набор задач, а с учетом широкой перспективы использования многорежимного авиационного комплекса с возможностью наращивания самых различных функций, повышающих тактико-технические характеристики и возможности. Фактически это была первая попытка реализации высокой функциональной адаптивности радиолокационных систем, превращающих ее в интеллектуальную. Это потребовало существенного повышения сложности системы, ее максимальной «цифровизации», открытости ее архитектуры, функциональной интеграции подсистем, максимальной унификации на основе модульности конструкции, а также модульности и унификации программ и алгоритмов. Повышение сложности было вызвано необходимостью распознавания с высокой достоверностью сложных образов в режиме «воздух-поверхность», а также распознавания не только класса, но и типа цели в режиме «воздух-воздух».

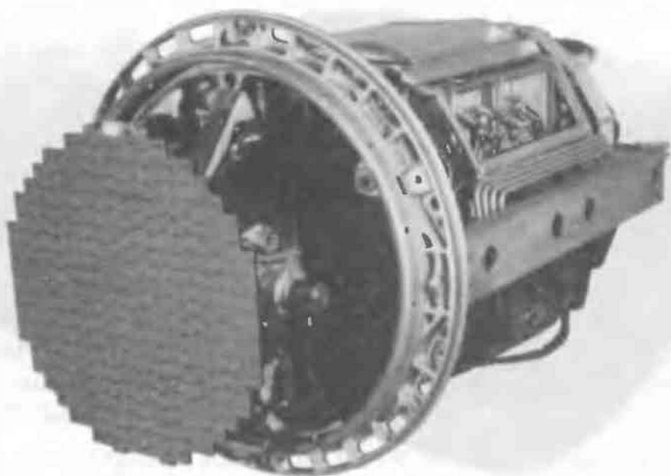


Рис. 3.1.10. РЛС «Копье-21И»

Уменьшение ЭПР целей в результате непрерывной работы по совершенствованию геометрических форм самолетов и применению в них радиопоглощающих покрытий, а также появление нового класса целей — крылатых ракет авиационного и морского базирования, запускаемых за пределами досягаемости их носителя, потребовало дальнейшего совершенствования бортовых РЛС и, в первую очередь, их приемопередающего тракта.

Значительный вклад в это внесла замена антенны Кассегрена на щелевую антенную решетку (ЩАР), в которой высокий коэффициент усиления сочетается с низким уровнем боковых лепестков, а также создание передатчиков и задающих генераторов (ЗГ) с низким уровнем фазовых шумов (чистый спектр).

Для этого поколения РЛС была разработана и внедрена ЩАР, имеющая при той же апертуре больший коэффициент усиления и более низкий уровень боковых лепестков. Применен задающий генератор и передатчик с более высокой внутренней когерентностью. Использованы цифровой процессор и БЦВМ с высоким быстродействием и большой памятью для обеспечения первичной и вторичной обработки больших потоков сложной информации и формирования режимов управления. Применен цифровой спектральный анализ в большом динамическом диапазоне. Все это увеличило дальность действия РЛС по низколетящим и малозаметным целям, позволило реализовать режим «воздух-поверхность» и осуществлять разрешение целей в группе. На основе единой комплексной системы унификации был создан ряд многофункциональных РЛС поколения «4+»:

- РЛС «Копье-21И» (рис. 3.1.10) для модернизации МиГ-21 БИС в МиГ-21 БИС UPG;
- РЛС «Копье-М» (рис. 3.1.11) для модернизации штурмовика Су-25 в Су-25М (Су-39);
- РЛС «Жук-МЭ» (рис. 3.1.12) для модернизации МиГ-29 в МиГ-29СМТ и МиГ-29К;

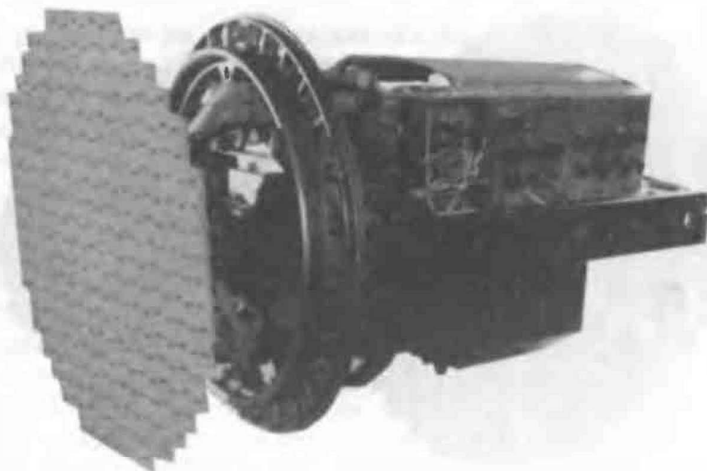


Рис. 3.1.11. РЛС «Копье-М»

— РЛС «Жук-МСЭ» (рис. 3.1.13) для модернизации истребителя Су-27 и его модификаций в Су-30МКК и др.

Все эти РЛС унифицированы на уровне блоков, узлов и модулей, а также программных и алгоритмических модулей. К РЛС поколения «4+» следует отнести также РЛС «Заслон» (рис. 3.1.14) для тяжелого дальнего перехватчика МиГ-31, для которого впервые в стране была создана и внедрена пассивная фазированная антенная решетка (ФАР), что существенно увеличило количество обнаруживаемых и атакуемых целей и дальность действия РЛС.

К поколению «4+» следует отнести и штатные радары Н001 и Н019, модернизированные на основе применения «обводного канала», представляющего собой дополнительный радиолокационный канал для обеспечения работы РЛС в режимах «воздух-поверхность» и «воздух-воздух».

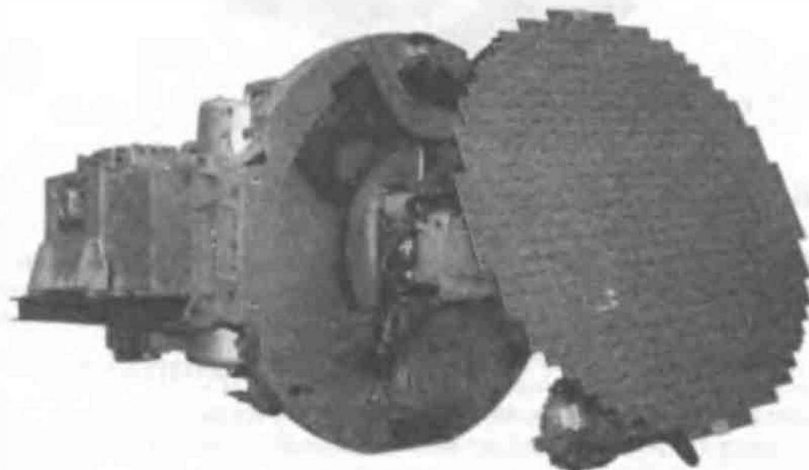


Рис. 3.1.12. РЛС «Жук-МЭ»

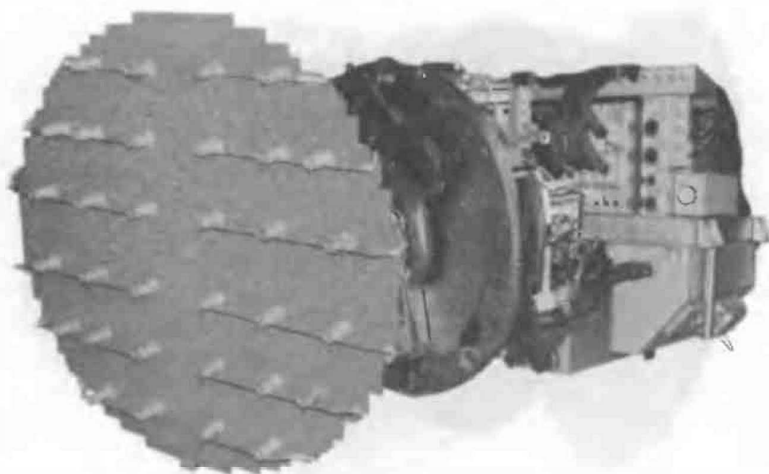


Рис. 3.1.13. РЛС «Жук-МСЭ»



Рис. 3.1.14. РЛС «Заслон»

Поколение «5»

Какое-то время считалось, что облик истребителя 5-го поколения условно определяется формулой «3С» (где С — качества истребителя, определяющие его тактические возможности):

«3С» = «скорость» + «скрытность» + «сверхманевренность».

Однако развитие авиации показало, что помимо указанных трех качеств, определяющих тактические возможности истребителя, сегодня в формировании облика истребителя 5-го поколения особую роль играют качества его бортового радиоэлектронного комплекса, поэтому вышеуказанную формулу



необходимо расширить до «5С», так как она должна отражать сочетание качеств истребителя 5-го поколения, обеспечивающих его тактические и интеллектуальные возможности:

«5С» = «стремительность» + «скрытность» + «суперспособности» + «самозащита» + «системность» (в этой упрощенной формуле «стремительность» объединяет два важнейших качества самолета — скорость и сверхманевренность).

В силу этого особую роль играет бортовой многофункциональный интегрированный радиоэлектронный комплекс (ИРЭК) истребителя, основой которого является бортовая радиолокационная система.

Это сказывается и на соотношении стоимостей ИРЭК и всего истребителя 5-го поколения. Если в поколениях «4» и «4+» стоимость бортовой СУВ на основе БРЛС не превышала 10% стоимости истребителя (цена «4+» явно не соответствует его гораздо более высоким возможностям), то она может достигнуть 50% стоимости всего авиационного комплекса 5-го поколения.

В динамике развития радиолокационных авиационных систем — это очевидный качественный скачок. Если во всех предыдущих поколениях каждое новое поколение было вызвано к жизни и направлено на устранение выявленных недостатков предыдущего поколения и обеспечение выполнения нескольких конкретных новых функций, то переход к поколению «5» в РЛС знаменует качественный скачок — обладание РЭК на основе РЛС искусственным интеллектом. Именно факт наличия искусственного интеллекта и должен рассматриваться как главный критерий отнесения ИРЭК на основе радиолокационной системы к 5-му поколению.

В связи с этим необходимо отметить, что создание РЭК поколения «4+» на основе радиолокационной системы во многом не только предвосхищало, но и аппаратурно реализовало ряд возможностей РЭК поколения «5».

Это приводит к двум результатам:

1. Далеко не все возможности, заложенные в РЛС поколения «4+», сегодня в полной мере осознаны, из чего следует, что предстоит большая работа по их дальнейшему пониманию и использованию.

2. Часть работ по созданию РЛС поколения «5» уже использована в качестве задела достижения при создании РЛС поколения «4+». В известной степени это позволяет считать поколение «4+» по ряду качеств поколением «5-».

Совершенно очевидно, что одной из ключевых проблем создания РЭК на основе РЛС поколения «5» становится надежность, так как такой РЭК является сложно организованной технической системой, поскольку искусственный интеллект предполагает решение не фиксированного набора ряда predetermined задач и выполнения конкретных функций, а многообразных задач и функций, в том числе возникающих в процессе адаптации к условиям боевого применения. Более того, должны решаться задачи по защите самолета от неожиданно возникающих опасностей, обусловленных рельефом местности, метеопреобразованиями и т.п. Все это требует существенного функционального усложнения аппаратуры и резко увеличивает число компонентов и электрорадиоэлементов, что без принятия специаль-

ных мер привело бы к катастрофическому снижению надежности и живучести РЭК.

Один из методов кардинального решения этой проблемы — обеспечение высокой надежности сложных систем — был предложен и разработан выдающимися учеными в области информации и теории автоматов К. Шенноном и Дж. фон Нейманом: создание надежных сложных систем из ненадежных элементов. В ИРЭК на основе радиолокационной системы 5-го поколения таких подсистем несколько.

Первая из них, получившая наибольшую известность, — АФАР. Обычно указывается, что АФАР в ИРЭК 5-го поколения решает следующие задачи:

- увеличивает дальность действия;
- обеспечивает независимое электронное управление несколькими сформированными лучами, ведущими не только одновременную работу по значительному количеству воздушных целей, но и одновременную работу по воздушным и наземным целям;
- адаптивно формирует провалы в диаграммах направленности для повышения помехозащищенности и скрытности работы и т.п.

Однако АФАР являет собой яркий пример потенциально надежной живучей системы, ибо в случае выхода из строя (отказа) целого ряда ее элементов ППМ (до 15-20%) обеспечивается ее нормальная работа.

Следует отметить, что даже при высокой надежности ППМ (до 10^5 часов на отказ) отказ сосредоточенной системы питания привел бы к отказу системы в целом. Поэтому второй надежной функционально взаимодействующей подсистемой в составе ИРЭК 5-го поколения должна быть распределенная система питания.

Обе указанные подсистемы — многоканальные, распределенные с возможностью адаптивного управления их взаимодействием, что создает многоуровневое резервирование.

На повестке дня — создание вычислительной системы с аналогичными возможностями живучести.

Таким образом, представленный материал показывает динамику развития РЛС для истребителей и ударных самолетов в нашей стране за полвека и их закономерности, главная из которых отражает причинно-следственные связи развития выполняемых функций и реализующих их компонентов.

Вывод: в 4-х поколениях авиационных радиолокационных систем функции РЛС и СУВ наращивались эволюционно, и введение каждой конкретной функции вызывалось либо недостатком предыдущего поколения, либо необходимостью решения новой задачи и обеспечивалось дополнительным оборудованием с некоторыми новыми качествами. При создании поколения «4+» в БРЛС и СУВ фактически впервые была заложена основа искусственного интеллекта, обеспечивающего решение задач и функций, определенных не только на момент создания, но и которые могут возникнуть в период жизненного цикла системы. Это и есть революционный скачок — переход к обладанию авиационной радиолокационной системой искусственным интеллектом. Это и есть главное отличие авиационного боевого комплекса, условно называемого истребителем 5-го поколения!

ВЕРТОЛЕТЫ.

Следует отметить, что комплексная унифицированная система разработки и изготовления РЛС и СУВ поколения «4+» не только дала возможность начать разработку современных многофункциональных РЛС и СУВ для вертолетов, но и послужила основой для них. И хотя указанные радары к настоящему времени еще не приняты на вооружение в составе вертолетов, а проходят летные испытания («Арбалет» для Ка-52 и «Копье-А» для Ка-27), целесообразно рассказать о некоторых их особенностях.

Главной причиной необходимости установки РЛС на вертолет явилось, прежде всего, обеспечение безопасности полета в очень сложных условиях, поскольку вертолет в основном используется в условиях маловысотного полета, при сложном рельефе, особенно ночью или в сложных метеоусловиях. При использовании в боевых вертолетах РЛС решает также задачу обеспечения борьбы с огневыми средствами противника без захода в зону возможного поражения.

Кроме того, вертолетные РЛС становятся незаменимыми при осуществлении мониторинга окружающей среды на огромных пространствах нашей страны, особенно в сложнейших условиях Заполярья, где большую часть года либо ночь, либо непогода, препятствующая наблюдению с помощью оптических средств. Проведение круглосуточного всепогодного мониторинга позволяет также предупреждать и бороться с лесными пожарами, осуществлять контроль состояния нефте- и газопроводов, осуществлять жизнеобеспечение морских платформ по добыче нефти и газа в условиях шельфов, вести всепогодное наблюдение и спасение людей с терпящих бедствие морских судов и т.д.

Радиолокационный комплекс (РЛК) «Арбалет» для вертолета Ка-52 и других предназначен для использования в ударных вертолетах и состоит из двух подсистем диапазонов L и Ка. Подсистема диапазона L осуществляет круговой обзор, ее антенный пост является надвтулочным и представляет собой неподвижный облучатель и подвижное (вращающееся вместе с винтом) параболическое зеркало. Подсистема диапазона Ка решает задачи сопровождения цели и прицеливания. Ее антенна с параболическим зеркалом устанавливается в носовой части вертолета. Каждая из подсистем имеет собственный приемник и передатчик (передатчик Ка-диапазона выполнен на клистроне, передатчик L-диапазона — на мощных полупроводниковых транзисторах, совместно работающих на когерентный сумматор). Аналоговые приемники подсистем также различны. Первичная обработка сигналов осуществляется процессором «Багет-55», а вторичная обработка и формирование режимов — БЦВМ Ц181. Остальные составные части обеих подсистем используют унифицированные модули самолетных РЛС поколения «4+».

Вертолетная РЛС «Копье-А» для вертолета Ка-28 и других предназначена для контроля территории при охране морских границ. Работает в X-диапазоне, обеспечивая четыре режима: «воздух-поверхность», «воздух-воздух», «метео», «радиолокационное картографирование». Использует унифицированные блоки и модули самолетной РЛС «Копье» поколения «4+». Антенна — параболическая, с горизонтальной поляризацией, обеспечивает круговой обзор и оптимизирует обнаружение целей на морской поверхности.

Метеонавигационная РЛС «Гукол-7» для вертолета Ми-8, а также других летательных аппаратов-самолетов, вертолетов и БПЛА. Обеспечивает обнаружение метеообразований, в том числе турбулентности и «сдвига ветра» (что особо важно для безопасности взлета и посадки ЛА), опасных наземных препятствий в условиях маловысотного полета, картографирование земной поверхности. Работает в диапазоне «Ка». Антенна — ЩАР с овальной апертурой. Разработана на основе развития авиационных метеорадаров типа «Гукол», а также радиолокационных головок самонаведения класса «воздух-поверхность».

Литература

- Канащенко А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных радиолокационных систем. — М.: Издательство ИПРЖР, 2002.
- Авиационные системы радиоуправления. Изд-е в 3 томах/Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003.
- Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденция развития/Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003.
- Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах/Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003.
- Проблемы и решения. — Фазотрон, 2006, № 1-2.
- Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиозлектронной борьбы/Изд-е ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. — М., 1998.
- Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиолокационное подавление информационных каналов систем управления оружием. — М.: Радиотехника, 2005.
- Современная радиозлектронная борьба. Вопросы методологии/Под ред. В.Г. Радзиевского. — М.: Радиотехника, 2006.
- Синани А.И., Белый Ю.И. Эволюция антенных систем для бортовых радиолокационных комплексов. — М.: Радиотехника, 2005, №2, с. 40-45.
- Федотченко А.И. Система управлением «Заслон». — М.: Радиотехника, 2005, №2, с. 19-22.
- Белый Ю.И., Таганцев В.А. Радиолокационный прицельный комплекс Н001: Модернизация продолжается. — М.: Радиотехника, 2005, №2, с. 28-29.
- Загородний В.Г., Петряев Г.В. Радиолокационный прицельный комплекс «Оса» — пионер эффективных многофункциональных и многоцелевых радиолокационных прицельных комплексов с фазированной антенной решеткой для легких и средних самолетов. — М.: Радиотехника, 2005, №2, с. 22-25.
- Канащенко А.И., Гуськов Ю.Н., Рыжак И.С. Радиолокационные информационные и аппаратно-интегрированные системы 5-го поколения. — Полет, 2003, №10, с. 12-14.
- Канащенко А.И., Гуськов Ю.Н., Осокин А.Н. «Интеллект» для российского истребителя 5-го поколения.— Независимое военное обозрение, 2003, № 22.
- Канащенко А.И., Гуськов Ю.Н., Осокин А.Н. Радиолокация формирует облик истребителя 5-го поколения. — Военный парад, 1999, №3.
- Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра/Под ред. Е.А. Федосова — М.: Дрофа, 2001.



3.2. Первая отечественная твердотельная РЛС противовоздушной обороны с активной ФАР

И.Я. Иммореев, *доктор технических наук,
профессор*

Предпосылки создания РЛС с активными фазированными антенными решетками

Прогресс в создании новых типов боевых самолетов и особенно ракет, ставших к середине XX века одним из основных средств воздушного нападения, привел к существенному росту скоростей целей и уменьшению их эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). В результате резко сократились рубежи обнаружения таких целей радиолокационными станциями противовоздушной обороны (ПВО), что привело к значительному уменьшению времени реакции системы ПВО, необходимому для отражения воздушного нападения.

Логичным выходом из создавшегося положения было увеличение излучаемой мощности вновь создаваемых РЛС и формирование радиолокационных комплексов, позволяющих получить информацию о трех координатах цели в реальном масштабе времени. Однако повышение характеристик станций на основе прежних технических решений привело к значительному увеличению веса, габаритов и, как следствие, стоимости таких комплексов и РЛС.

Примером может служить один из первых советских радиолокационных комплексов «Алтай» (П-80), работавший в коротковолновой части дециметрового диапазона длин волн (рис. 3.2.1).

Этот комплекс состоял из двух двухкоординатных РЛС и четырех высокотомеров. Другим примером является разработанная в 1961 году мощная трехкоординатная РЛС «Памир» (П-90), которая обладала наиболее высокими тактико-техническими характеристиками среди подобных РЛС того времени (рис. 3.2.2).

Каждая из двух антенн, развернутых на 180°, имела систему парциальных каналов для измерения угла места амплитудным моноимпульсным методом. Однако увеличение излучаемой мощности потребовало выполнения этой РЛС в стационарном исполнении, поскольку передатчики на мощных электровакуумных приборах (например, клистродах) вместе с источниками питания и системой охлаждения обычно занимают до 80% веса и объема аппаратуры станции. Стационарность РЛС вызывала необходимость проведения строительных работ при ее изготовлении и тем самым ограничивала возможность ее применения.



Рис. 3.2.1. Радиолокационный комплекс «Алтай» (П-80)



Рис. 3.2.2. РЛС «Намир» (11-90)

В начале 1980-х годов появились спутниковые системы, которые вели активное оптическое и радиотехническое наблюдение за территорией противника. Одновременно получили широкое развитие противорадиолокационные ракетные системы, наводимые на излучение РЛС и предназначенные для их подавления. Сочетание этих двух новых военных технологий по существу «поставило крест» на дальнейшем развитии стационарных и малоподвижных РЛС предыдущего поколения, которые потенциально могли быть уничтожены противником в первые минуты боевых действий.

Требовалось существенное усовершенствование РЛС ПВО, являющихся одним из наиболее эффективных средств контроля воздушного пространства, и в первую очередь придание им мобильности без снижения тактических характеристик.

Именно в этот период фазированные антенные решетки (ФАР) начали широко внедряться как в РЛС ПВО, так и в РЛС различного назначения. Электронное сканирование луча антенны разрешало РЛС на разных этапах радиолокационного наблюдения выполнять различные задачи и, тем самым, обеспечивало ее многофункциональность, а также позволяло станции быстро адаптироваться к складывающейся воздушной и помеховой обстановке.

Первые ФАР как на передачу, так и на прием строились по пассивной схеме. В передающей ФАР сигнал от одного генератора, выполненного, как правило, на мощном электровакуумном приборе, распределялся системой деления мощности между излучателями антенной решетки — каналами антенны. Управление фазой в каждом канале (иногда в группе каналов) выполнялось с помощью ферритового или полупроводникового фазовращателя, работающего на высоком уровне мощности.

Однако разработка пассивных ФАР показала, что замена зеркальной антенны фазированной антенной решеткой увеличивает потери энергии в высокочастотной части станции в 2-4 раза. Чтобы сохранить характеристики станции, необходимо дополнительное повышение выходной мощности передатчика. Поэтому применение пассивных ФАР в РЛС с большими рубежами обнаружения малоразмерных целей приводило к такому увеличению объема и веса аппаратуры, которое не позволяло решить задачу «повышение мощности — сохранение мобильности». Это была «цена», которую необходимо было платить за многофункциональность и адаптацию РЛС.

Одним из реальных решений этой задачи являлся переход к использованию в РЛС ПВО активных фазированных антенных решеток (АФАР), позволяющих избежать указанных выше потерь энергии в высокочастотных трактах станции.

В 1965 году во Всесоюзном (ныне Всероссийском) НИИ радиотехники в Москве — старейшем радиолокационном НИИ страны — была создана первая небольшая экспериментальная АФАР, в которой каждый из 84 излучателей возбуждался модулем, выполненным на серийной лампе бегущей волны. АФАР работала в непрерывном режиме и излучала общую мощность около 15 Вт. Позднее (1968 г.) в этом же НИИ была разработана и испытана экспериментальная АФАР большего размера, модули которой содержали двухкаскадный усилитель на металлокерамических лампах. Эта АФАР имела уже 512 каналов и излучала среднюю мощность 5 кВт.

Опыт проведенных работ показал, что, с одной стороны, АФАР нельзя проектировать традиционным методом, когда антенна, передатчик и высокочастотный тракт разрабатываются отдельно, а потом из них формируется передающая часть РЛС. В составе АФАР параметры всех этих элементов взаимосвязаны и все они оказывают значительное влияние на параметры диаграммы направленности антенны. Поэтому АФАР должна рассматриваться как единый комплекс и ее проектирование является системной задачей. С другой стороны, использование в РЛС активной решетки влияет на построение других систем станции, таких, например, как система обработки информации или система источников питания. Это обстоятельство также требует системного подхода к проектированию РЛС с АФАР.

На экспериментальных АФАР были проверены теория и корректность математических моделей, определены требования к элементам АФАР и к идентичности их параметров, разработаны методики настройки модулей АФАР, созданы специальные стенды для регулировки этих модулей.

Полученный опыт позволил перейти к созданию АФАР для боевых РЛС ПВО различного назначения. Как пример, можно назвать одну из ранних РЛС большой дальности 5Н88, разработанную во ВНИИРТ в 1977 году (рис. 3.2.3).

РЛС имела АФАР, где линейка из 64-х управляемых по фазе излучателей облучала зеркальную антенну. Каждый излучатель возбуждался своим мощным клистроном при общей излучаемой средней мощности 64 кВт. В 1980 году во ВНИИРТ была создана РЛС 5Н59 для обнаружения целей на малых высотах с АФАР на металлокерамических лампах, выполненной также в виде линейки из 72 каналов и излучающей около 1 кВт средней мощности (рис. 3.2.4).

Однако сочетание нового технического решения — фазированной антенной решетки и старой элементной базы — электровакуумных генераторных приборов не позволяло уменьшить вес и габариты и, тем самым, повысить мобильность РЛС, позволяющую обеспечить большие рубежи обнаружения малоразмерных целей. Станции этого класса продолжали оставаться в категории потенциальных «жертв» противорадиолокационных ракет. В результате стало очевидно, что основная перспектива развития многофункциональных РЛС дальнего обнаружения лежит в разработке АФАР на СВЧ-транзисторах и в переходе к созданию на их базе полностью твердотельных РЛС.

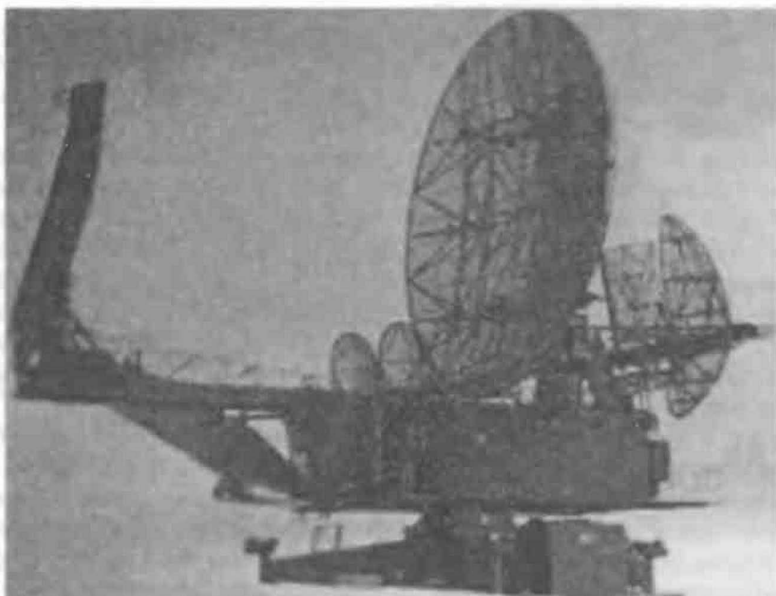


Рис. 3.2.3. РЛС 5Н88 с АФАР в виде строки, облучающей зеркальную антенну

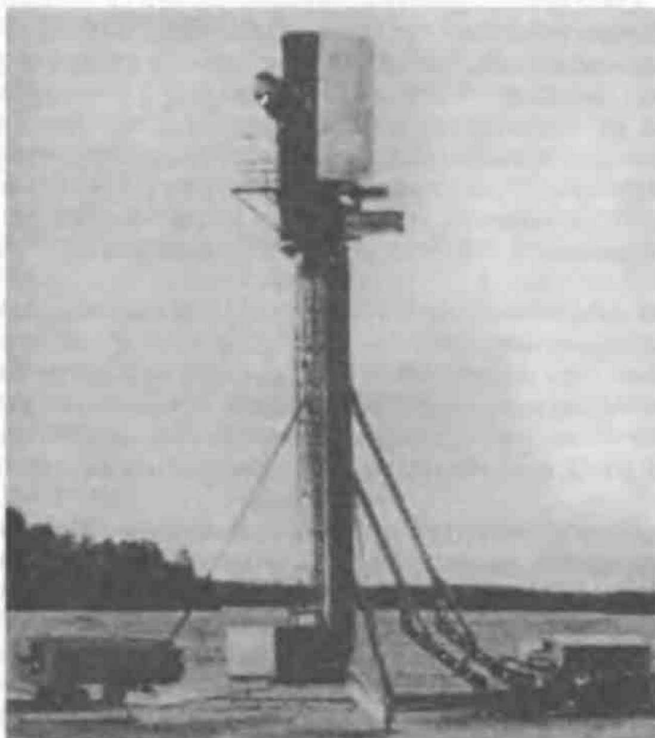


Рис. 3.2.4. РЛС 5Н59 с АФАР на металлокерамических лампах

Полностью твердотельная РЛС 67Н6Е

Создание первой твердотельной РЛС ПВО 67Н6Е (Гамма-ДЕ) было начато во ВНИИРТ в 1980-х годах. Работа стимулировалась сообщениями о создании в США первой твердотельной РЛС AN/TPS-59 с пассивной ФАР. Однако создатели советской РЛС не пошли по американскому пути. Для уменьшения веса и объема аппаратуры отечественной РЛС было решено проектировать ее антенную систему в виде АФАР и суммировать мощности многих генераторов в пространстве, а не внутри антенны, как это было сделано в РЛС AN/TPS-59.

Одновременно с разработкой РЛС в НИИ «Пульсар» (г. Москва) была начата разработка СВЧ-транзисторов для выходного усилителя АФАР. НИИ «Пульсар» начал выпускать СВЧ-транзисторы с высоким уровнем мощности с 1980 года. Переход к транзисторному передатчику потребовал изменения некоторых традиционных систем РЛС: приемника, обработки информации, источников питания передатчика, охлаждения передатчика.

Дело в том, что структура транзисторов не позволяет генерировать большую импульсную мощность подобно электровакуумным приборам (ЭВП). Поэтому средняя мощность, необходимая для обеспечения заданной дальности обнаружения целей, может быть получена только путем значительного увеличения длительности излучаемых сигналов (до десятков и сотен микросекунд) и уменьшения их скважности (до единиц). Чтобы сохранить высокое разрешение целей по дальности при такой длительности сигнала, в РЛС использованы сложные виды модуляции и согласованные фильтры с коэффициентом сжатия более 100.

Полностью изменились источники питания передатчика. На смену высоковольтным модуляторам с напряжением в десятки киловольт пришли выпрямители с низким напряжением (десятки вольт) и суммарным током в десятки килоампер. Дальность обнаружения цели РЛС 67Н6Е составляет около 350-400 км. Чтобы обеспечить эту дальность обнаружения с заданным качеством, необходимо излучать не менее 8 кВт средней мощности. Наибольшую мощность имеют низкочастотные СВЧ-транзисторы. Поэтому при проектировании РЛС 67Н6Е использован L-диапазон. Схема АФАР этой РЛС приведена на рис. 3.2.5.

Каждый из 1024 излучателей антенной решетки возбуждается отдельным усилителем, схема которого приведена на рис. 3.2.6.

В выходном каскаде усилителя был использован СВЧ-транзистор 2Т979А разработки НИИ «Пульсар», имеющий среднюю мощность 10 Вт и импульсную мощность 50 Вт. На выходе каскада два транзистора включены параллельно для увеличения выходной мощности усилителя. Выходная средняя мощность каждого усилителя равна 20 Вт, а импульсная — 100 Вт. Внутренний вид усилителя показан на рис. 3.2.7.

Каждый модуль АФАР состоит из усилителя, согласующей цепи и излучателя. Общий вид модуля сверху и снизу показан на рис. 3.2.8 и рис. 3.2.9.

Из-за потерь в согласующей цепи усилителя и в излучателе излучаемая импульсная мощность одного канала АФАР составила 55 Вт, средняя — около 10 Вт. В результате излучаемая средняя мощность всей АФАР при полностью исправных усилителях равна примерно 10 кВт. Таким образом,



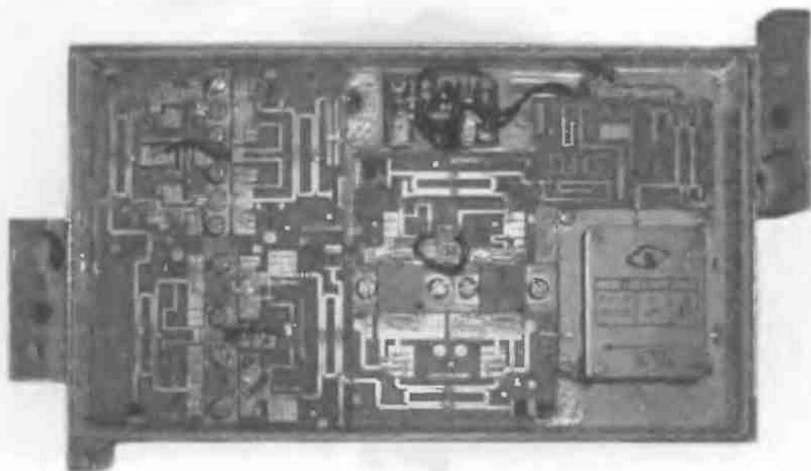


Рис. 3.2.7. Общий вид усилителя мощности АФАР РЛС 67Н6Е

выбранная схема АФАР допускает отказ до 20% усилителей без нарушения основных требований к РЛС по дальности обнаружения целей.

В дальнейшем усилитель АФАР РЛС 67Н6Е был переведен на более мощный транзистор 2Т9140, также разработанный в НИИ «Пульсар». Это позволило облегчить температурный режим передающего устройства и тем самым увеличить его наработку на отказ. При этом средняя мощность передатчика повысилась почти на 40% (без увеличения мощности, потребляемой от источников питания). В результате создан запас потенциала РЛС и улучшены ее характеристики.

АФАР РЛС 67Н6Е установлена на перевозимой поворотной платформе. На этой платформе кроме системы делителей, усилителей мощности, фазо-

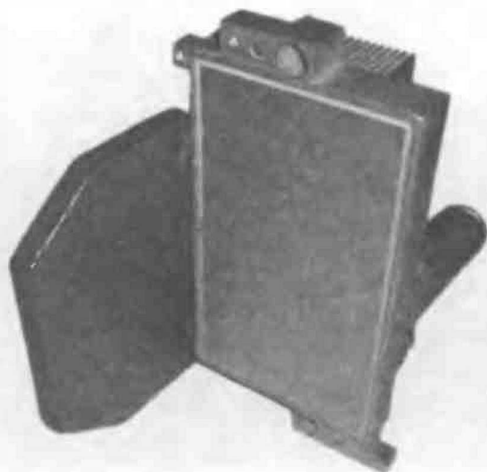


Рис. 3.2.8. Общий вид модуля АФАР РЛС 67Н6Е (вид сверху)

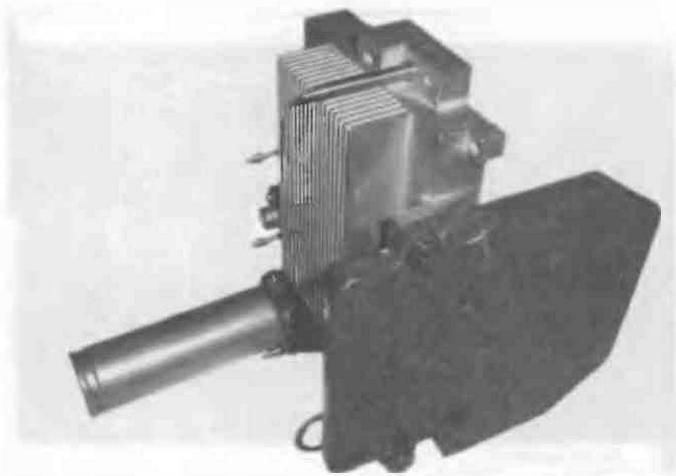


Рис. 3.2.9. Общий вид модуля АФАР РЛС 67Н6Е (вид снизу)

вращателей и излучателей расположены также источники питания усилителей мощности и система их воздушного охлаждения. В общую конструкцию передающей АФАР (рис. 3.2.10, 3.2.11, 3.2.12) встроены также каналы приемной ФАР РЛС.

Свертывание и развертывание АФАР осуществляется собственным механизмом в течение 5 мин. АФАР транспортируется на прицепе тягача и может эксплуатироваться в любых климатических условиях. На рис. 3.2.13 показаны все транспортные единицы РЛС 67Н6Е на марше.

Отметим ряд особенностей процесса разработки, создания и испытаний АФАР РЛС 67Н6Е.



Рис. 3.2.10. АФАР РЛС 67Н6Е в транспортном положении



Рис. 3.2.11. АФАР РЛС 67Н6Е в рабочем положении

1. Все модули АФАР прошли настройку и регулировку на специальном стенде для уменьшения фазовых ошибок в многоканальных звеньях АФАР и снижения потерь коэффициента направленного действия (КНД) антенны (см. Приложение к статье, с. 193). Электрические длины (разность фаз колебаний на входе и выходе) всех модулей приведены к электрической длине эталонного модуля. Изменение КНД в процессе эксплуатации РЛС было невелико, поскольку электрические длины транзисторных усилителей мало чувствительны к изменению напряжения питания, входной мощности и других факторов. Так, изменение напряжения питания на 1% вызывало изменение электрической длины трехкаскадного усилителя АФАР не более чем на 1 градус. Это позволило применить в РЛС простые и дешевые нестабилизированные источники питания АФАР.



Рис. 3.2.12. АФАР РЛС 67Н6Е с поднятым радиопрозрачным укрытием



Рис. 3.2.13. РЛС 67Н6Е на марше

В процессе разработки было выявлено, что полный КПД АФАР зависит от среднеквадратичного отклонения разброса фаз модулей от среднего значения. Это обстоятельство позволило при производстве модулей вместо жестких требований на электрическую длину каждого модуля задавать среднее значение электрической длины на партию модулей и ввести допуск на отклонение электрической длины каждого модуля от этого среднего значения. При таком подходе значительно уменьшилось количество модулей, электрическая длина которых не соответствовала заданным требованиям.

2. Выходное сопротивление мощного транзистора составляет единицы Ом и согласование его в (10–15)% полосе частот со стандартным входом полоскового излучателя, который имеет сопротивление 50 Ом, является весьма трудной задачей. Согласование усложняется большим разбросом выходных параметров транзисторов и изменением входного КСВ излучателя при сканировании луча антенны. Для решения этой задачи на выходе каждого модуля АФАР установлен миниатюрный ферритовый циркулятор, разработанный в НИИ «Феррит» (г. Ленинград), который обеспечивает согласование усилителя с излучателем с КСВ не хуже 1,5 во всей рабочей полосе частот.

3. Мощные СВЧ транзисторные усилители имеют высокую чувствительность к превышению порога рабочей температуры кристалла, которая для большинства СВЧ-транзисторов составляет +175°C. Это значение температуры не должно превышаться даже кратковременно при любом изменении режима работы усилителя и любом изменении КСВ нагрузки. При превышении этого температурного порога время наработки на отказ усилительного каскада резко уменьшается. Это обстоятельство предъявило жесткие требования к эффективности и надежности системы охлаждения модулей АФАР. Наиболее эффективной явилась система принудительного воздушного охлаждения, которая обеспечила выполнение этого требования при температуре внешнего воздуха, доходящей до +55°C.

4. Каждый каскад транзисторного усилителя имеет небольшой коэффициент усиления (КУ) — от 6 до 10 раз в зависимости от выходной мощности. Поэтому модули АФАР выполнены по многокаскадной схеме. Когда импульс возбудителя проходит через каскады усилителя, его передний фронт и задний срез существенно укорачиваются. В результате возрастают уровни побочных и внеполосных излучений. Это затрудняет выполнение



стандартных требований по электромагнитной совместимости радиосистем. Для устранения этого явления в состав АФАР введены дополнительные импульсные модуляторы с заданной длительностью фронта и среза импульса.

5. Важной задачей при создании АФАР являлось уменьшение потерь в системе деления мощности. Наименьшие потери имеют полосковые воздушные развязанные делители. Но сложная конструкция и технология изготовления делают этот тип делителя относительно дорогим. Поэтому в АФАР использованы более простые делители, выполненные на пленочных фольгированных диэлектриках в виде печатных плат большой длины (до 6 м). Разброс амплитуд и разброс фаз между выходами этих делителей не превысил $\pm 0,5$ дБ и $\pm 15^\circ$ соответственно.

Заключение

Разработка и испытания РЛС 67Н6Е закончены более 15 лет тому назад. Полученный в результате опыт проектирования АФАР, а также аппаратурные и технологические решения многократно использованы в более поздних разработках. Проведена также модернизация АФАР этой РЛС. Модернизация коснулась в первую очередь усилителя, входящего в состав модуля АФАР. В выходном каскаде усилителя транзисторы 2Т979А и 2Т9140 заменены более мощными транзисторами А885А, также разработанными в НИИ «Пульсар». Заменены также транзисторы предварительного каскада. Это позволило поднять выходную импульсную мощность усилителя со 100 до 200 Вт. В результате создан запас потенциала РЛС и улучшены ее характеристики. Новый транзистор имеет более высокий КПД. В результате облегчен температурный режим передающего устройства и тем самым увеличена его наработка на отказ. Схема активного модуля АФАР РЛС 67Н6Е повышенной мощности на новых транзисторах приведена на рис. 3.2.14.

Видно, что эта схема существенно проще схемы первого модуля (см. рис 6). Конструкция нового усилителя, размещенная в корпусе первого модуля АФАР, показана на рис. 3.2.15.

Повышение КПД нового модуля АФАР позволило существенно повысить общий КПД РЛС. Из состава аппаратуры РЛС исключены преобразователи с частотой 400 Гц, которые обеспечивали питание части аппаратуры АФАР. Переход на единый источник питания с частотой 50 Гц позволил дополнительно улучшить энергетические характеристики станции. В результате излучаемая мощность РЛС увеличена в 2,5 раза при неизменной мощности, потребляемой от первичных источников питания.

Появление новой элементной базы для аналоговой и цифровой аппаратуры обработки радиолокационной информации позволило существенно уменьшить объем и повысить производительность этой аппаратуры, перенести ее на вращающуюся платформу и отказаться от специальной кабины. Теперь информация о трассах целей поступает непосредственно с АФАР на индикаторы РЛС. Если для наблюдения за целями используются выносные индикаторные посты, то фактически вся аппаратура модернизированной РЛС 67Н6Е, за исключением первичного источника питания (электростанции), размещается на одной вращающейся платформе, что обеспечивает РЛС исключительно высокую мобильность.

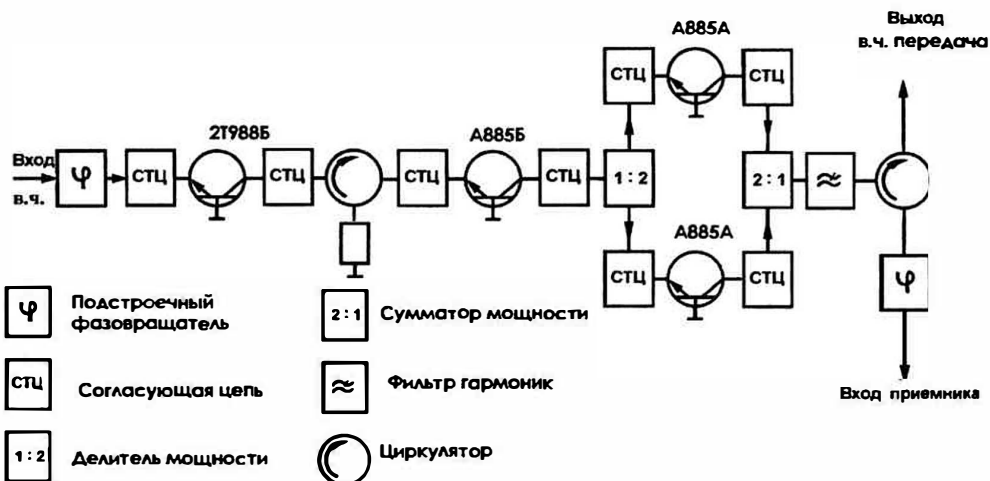


Рис. 3.2.14. Схема активного модуля АФАР РЛС 67Н6Е повышенной мощности

Несомненный прогресс в разработке мощных транзисторов позволяет прогнозировать их появление в ближайшие годы на все более высоких частотах, что, несомненно, будет способствовать созданию твердотельных АФАР в разных частотных диапазонах. В то же время полученный опыт создания АФАР показывает, что их использование в РЛС экономически оправдано только в тех случаях, когда РЛС по своему назначению должна обеспечивать большую скорость управления лучом при высоком энергетическом потенциале и иметь высокую мобильность.

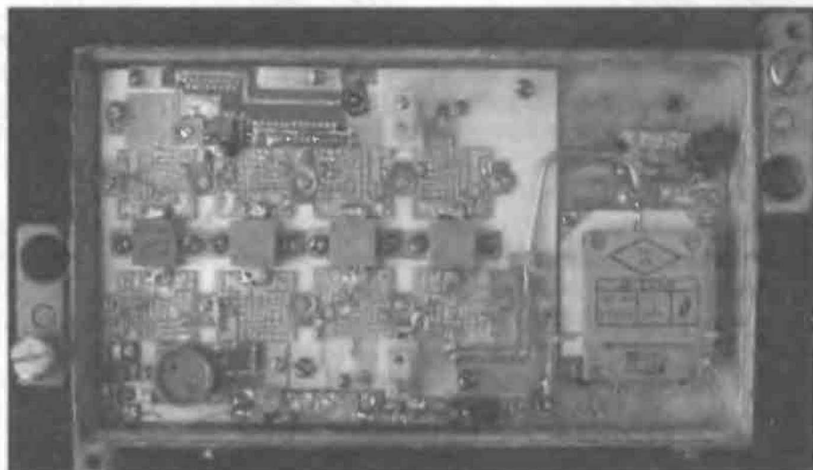


Рис. 3.2.15. Общий вид усилителя АФАР РЛС 67Н6Е повышенной мощности

Особенности построения передающих АФАР

Определения

Активной фазированной решеткой (АФАР) называется многоканальная антенна (антенная решетка), у которой к каждому излучателю подключен передатчик или приемник. Структурная схема передающей АФАР приведена на рис. 3.2.16.

АФАР состоит из трех основных частей, выполняющих различные функции.

Решетка излучателей образует апертуру антенны и состоит из одинаковых слабонаправленных излучателей (вибраторных, щелевых, рупорных, волноводных). Излучатели обычно расположены в узлах прямоугольной или косоугольной сетки.

Система формирования диаграммы направленности (ДН) создает распределение амплитуд и фаз сигнала в излучателях решетки и содержит комплект усилителей мощности, комплект фазовращателей, а также комплект согласующих цепей. Последовательное соединение излучателя с согласующей цепью, усилителем мощности и фазовращателем образует один канал АФАР. Обычно все элементы канала объединяются в единую конструкцию, которая называется модулем. Схема модуля зависит от диапазона частот РЛС и излучаемой мощности. Идентичность и стабильность амплитудных и

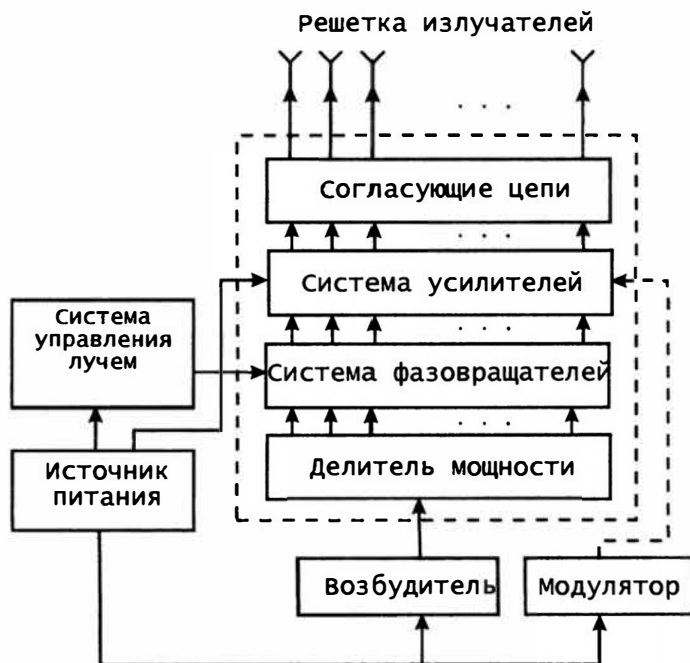


Рис. 3.2.16. Структурная схема передающей АФАР

фазовых характеристик модулей обеспечивается за счет применения элементов с высокой стабильностью параметров и специальных схемных решений. Перед установкой в АФАР производится регулировка коэффициента передачи (фазы и коэффициента усиления) каждого модуля.

Делитель мощности обеспечивает передачу сигнала от одного источника (общего возбудителя) ко всем каналам (модулям) АФАР.

Кроме перечисленных выше основных систем в составе любой АФАР имеется система управления лучом, система электропитания, система контроля функционирования и система охлаждения.

Особенности энергетики АФАР

При создании любой РЛС необходимо уменьшать потери энергии на ее пути от источника питания до облучаемой цели. Для этого передатчик должен генерировать необходимую мощность при максимуме КПД, а передающая антенна должна формировать заданную диаграмму направленности с максимальным коэффициентом направленного действия (КНД). Тогда общий энергетический потенциал передающей системы будет определяться как энергетическим КПД передатчика, так и КНД антенны. В традиционной РЛС с зеркальной антенной эти параметры не связаны друг с другом и могут быть улучшены независимо.

Однако АФАР является передатчиком и антенной одновременно. Поэтому функции антенны и передатчика в ней взаимосвязаны и взаимозависимы. Расчет КНД в этом случае отличается от расчета КНД для традиционных антенн. Это является главной особенностью энергетики АФАР и отличает АФАР от других типов антенн.

Поясним это.

Передающая система традиционного радара с зеркальной антенной, как правило, является одноканальной: один генератор — одна антенна (рис. 3.2.17).

КНД антенны, входящей в эту систему, зависит от отклонения распределения амплитуды и фазы излучаемого сигнала по апертуре антенны от заданного закона. Эти отклонения, уменьшающие КНД антенны, обычно вызваны технологическими ошибками, возникающими при изготовлении антенны, и носят случайный характер.

В РЛС с АФАР передающая система является многоканальной (рис. 3.2.18). Сигнал от возбудителя проходит по параллельным каналам АФАР



Рис. 3.2.17. Блок-схема одноканальной передающей системы

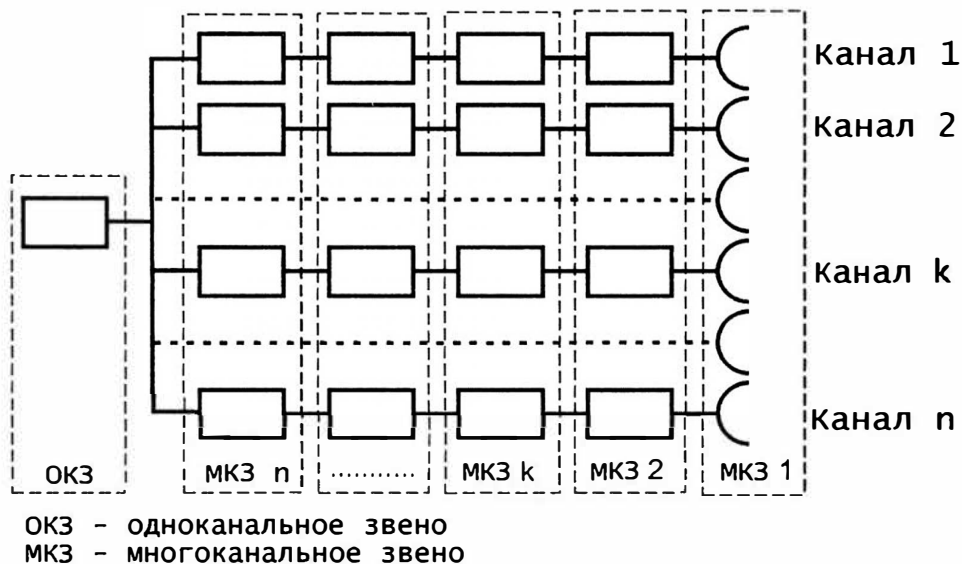


Рис. 3.2.18. Блок-схема многоканальной передающей системы (АФАР)

через многоканальные звенья: делитель мощности, усилители мощности, фазовращатели, согласующие цепи и излучатели.

Элементы, образующие каждое звено, не являются абсолютно идентичными. Они имеют отклонения параметров от номинального значения, вызванные погрешностями при изготовлении. В результате амплитуды и фазы сигналов на выходах элементов каждого многоканального звена системы будут различны. Таким образом, не только излучатели, но и другие многоканальные звенья, показанные на рис. 3.2.18 (вплоть до источников питания), создают ошибки амплитудно-фазового распределения и уменьшают КНД антенны.

Таким образом, каждое многоканальное звено АФАР вносит в систему двойные потери энергии: за счет уменьшения энергетического КПД и за счет уменьшения КНД антенны. Это позволяет сформулировать требования к параметрам элементов, входящих в состав многоканального звена системы, и к идентичности этих параметров, а также позволяет находить минимум потерь, вызываемых данным звеном.

Отметим важный момент. В процессе проектирования и изготовления АФАР реальные данные об ошибках распределения какого-либо звена могут быть получены только после изготовления достаточно большой партии элементов данного звена и измерения их параметров. Если эти элементы к моменту проектирования АФАР не изготовлены, можно воспользоваться параметрами ближайших аналогов этих элементов. Когда аналоги также отсутствуют, можно выполнить расчет на основе допусков, заданных для изготовления данных элементов. Опыт проектирования показывает, что последний способ имеет большие погрешности.

Но во всех этих случаях мы получим значения ошибок только на выходе данного звена, но еще не на апертуре антенны.

Чтобы определить влияние ошибок данного звена на КНД антенны, необходимо «перенести» ошибки распределения с выхода этого звена на апертуру антенны. Очевидно, что при этом переносе все последующие звенья АФАР, через которые сигнал с ошибками проходит до апертуры антенны, будут изменять (увеличивать или уменьшать) величину ошибок распределения данного звена на апертуре.

Когда радиотехническая система состоит из одного канала, сигнал на выходе системы определяется как входной сигнал, умноженный на произведение коэффициентов передачи звеньев, расположенных между входом и выходом системы.

В многоканальной системе выходной сигнал на апертуре антенны находится аналогично. Однако коэффициент передачи каждого многоканального звена теперь приобретает статистический характер. И это необходимо учитывать при расчете КНД антенны.

Отметим, что в одном и том же звене могут быть несколько независимых причин появления ошибок. Так, ошибки фазы на выходе многоканального звена фазовращателей могут, например, возникнуть как из-за нестабильности управляющего напряжения, так и из-за колебаний температуры.

Можно частично уменьшить ошибки амплитуды и фазы на выходе каждого многоканального звена с помощью подстройки его элементов. Для этого в процессе регулировки элементов данного звена на их входы подается одинаковое значение сигнала, а затем с помощью регулировок устанавливается одинаковое значение выходного параметра, например, амплитуды или фазы.

В таблице приведен пример расчета полного КПД экспериментальной АФАР, выполненной на лампах бегущей волны (ЛБВ), имеющих большую зависимость фазы выходного сигнала от напряжения питания (большую крутизну коэффициента передачи напряжение—фаза). В расчете использованы статистические характеристики (дисперсии амплитуды σ_u и фазы σ_φ) звеньев АФАР, полученные в результате измерений реальных элементов.

Таблица

Параметр Звено	σ_u звена, %	σ_φ звена, град.	σ_φ в антенне, град.	g_i	Энерг. КПД η_{ic} , %	Полный КПД $\eta_{ic} \cdot g_i$, %
Излучатель	—	10	10	0,97	95	92
СВЧ-тракт	—	20	20	0,88	95	84
Усилитель	—	50	50	0,53	25	13
Модулятор	1,5	—	45	0,52	80	41
Выпрямитель	0,5	—	15	0,9	90	81
АФАР					15,1	3,3

Как видно из таблицы, многоканальное звено усилителей существенно снижает полный КПД всех последующих звеньев. Так, например, звено модуляторов имеет на выходе среднеквадратичное отклонение амплитуды вы-

ходного напряжения от номинала всего 1,5%. Но полный КПД этого звена падает почти вдвое (с 80 до 41%) за счет увеличения фазовых ошибок в последующем звене усилителей.

Энергетический КПД рассматриваемой АФАР равен 15,1%. За счет фазовых ошибок в многоканальных звеньях он падает до 3,3%. Таким образом, неидентичность параметров элементов в многоканальных звеньях приводит к значительному уменьшению полного КПД АФАР.

Транзисторные усилители мощности, используемые в АФАР, имеют значительно меньшую крутизну коэффициента передачи напряжение-фаза, чем ЛБВ. Поэтому при переходе от ЛБВ к транзисторным усилителям полный КПД АФАР, рассмотренной в данном примере, повышается с 3,3 до 9,2%.

Но и в этом случае вклад фазовых ошибок в уменьшение полного КПД составляет почти 6%. Причиной является низкий коэффициент усиления одного каскада транзисторного усилителя. Чтобы обеспечить такой же коэффициент усиления, как у ЛБВ, необходимо иметь транзисторный усилитель, состоящий из 6-7 каскадов. В результате общий КПД усилителя уменьшается, а крутизна коэффициента передачи напряжение-фаза (по сравнению с одним каскадом) увеличивается. Снижается и надежность усилителя. Поэтому в некоторых случаях (например, на космических платформах) оказывается целесообразнее использовать в АФАР не транзисторы, а дешевые ЛБВ, выполненные методом печатной технологии, и стабильный источник питания.

Достоинства и недостатки твердотельных АФАР

Теоретические работы, результаты моделирования и опыт разработки и испытаний РЛС 67Н6Е позволяют кратко сформулировать достоинства и недостатки передающих твердотельных АФАР.

Основные достоинства АФАР:

Высокий уровень излучаемой мощности, который достигается благодаря суммированию в пространстве многих маломощных сигналов. Отсутствие потерь на высоком уровне мощности повышает КПД передающей системы, позволяет упростить и удешевить делители и фазовращатели, работающие на низком уровне мощности, а также повысить быстродействие системы управления лучом.

Высокая надежность. Нарботка на отказ твердотельного усилителя составляет 10^4 – 10^5 ч, наработка на отказ всей АФАР — $(8-12) \cdot 10^3$ ч. При этом отказ в твердотельном передатчике не наступает мгновенно, неисправности накапливаются постепенно. При небольшой избыточности числа модулей в АФАР и при соблюдении периодичности обслуживания, наработка АФАР на отказ практически не влияет на надежность РЛС. Замена неисправных усилителей осуществляется в период профилактического обслуживания РЛС. Поэтому РЛС с АФАР могут проектироваться как необслуживаемые радары.

Простота эксплуатации. Эксплуатация твердотельных АФАР упрощается благодаря отсутствию высокого напряжения. Питающее напряжение в

АФАР составляет 24-30 В. Высокая фазовая стабильность транзисторных усилителей не требует их регулировки в процессе эксплуатации.

Малые массогабаритные характеристики. Увеличение мощности одного транзистора приводит к уменьшению числа усилителей, а, следовательно, к снижению массы и уменьшению габаритов АФАР. Опыт проектирования и модернизации твердотельной АФАР показал, что при импульсной мощности транзистора 50 Вт масса и габариты АФАР значительно лучше аналогичных характеристик РЛС с передатчиком на ЭВП. Дополнительный выигрыш в массе и габаритах дает использование нового транзистора с импульсной мощностью 100 Вт. Это обстоятельство позволило расположить всю аппаратуру РЛС 67Н6Е вместе с источниками питания на одной транспортируемой платформе.

Основные недостатки АФАР:

Сложность аппаратного построения и высокая стоимость, которые не позволяют АФАР конкурировать по этому параметру с зеркальными и подобными им типами антенн.

Большая длительность излучаемых сигналов. В результате твердотельные РЛС имеют большую «мертвую зону» и относительно сложную аппаратуру для обработки сигналов с большим коэффициентом сжатия.

Низкий коэффициент усиления одного мощного транзисторного каскада. Использование в модулях АФАР многокаскадных усилителей усложняет схему передатчика и увеличивает его стоимость.

Литература

- Смирнов С.А., Зубков В.И. Краткий очерк истории ВНИИРТ. — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники, 1996.
- Ранние разработки ВНИИРТ. — М.: ВНИИРТ, 2002.
- Lain C.M., Gersten E.J. AN/TPS Overview. Proceeding of the IEEE International Radar Conference. Washington, D.C. USA. 1975.
- Иммооров И.Я. К оценке энергетики радиолокационных антенн. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая, 1969, вып. 13.
- Иммооров И.Я. Особенности энергетики многоканальных систем с электронным сканированием. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетеchnическая, 1971, вып. 17.
- Иммооров И.Я. Широкополосность фазированных антенных решеток/В кн.: Проблемы антенной техники. — М.: Радио и связь, 1989.
- Активные антенные решетки/В сб.: Антенны (современное состояние и проблемы). — М.: Советское радио, 1979.
- Brookner E. Practical Phased Array Antenna Systems, Artech House.1996.
- Иммооров И.Я. Активные передающие ФАР в радиолокационных системах/В кн.: Проектирование фазированных антенных решеток. — М.: Радиотехника, 2003.
- Иммооров И.Я., Махлин Р.Л., Редькин Г.Е. Активная передающая ФАР современной твердотельной РЛС/В кн.: Активные фазированные решетки. — М.: Радиотехника, 2004.
- Immooev I. Active Transmitting Phased Antenna Arrays. — IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. April 2005, 2005, v.41, № 2, p. 407-420.

3.3. Динамика радиоэлектроники и радиотехники в суперрадиолокации

С.Ф. Боев, *доктор экономических наук*
В.К. Слока, *доктор технических наук, профессор*

Среди радиолокационных станций (РЛС) и комплексов, созданных для решения научных, народнохозяйственных и оборонных задач, выделяются те, которые предназначены для информационного обеспечения стратегических систем ракетно-космической обороны (РКО) страны — предупреждения о ракетном нападении (ПРН), контроля космического пространства (ККП) и противоракетной обороны (ПРО). Они отличаются, прежде всего, тем, что в них реализованы тактико-технические характеристики, близкие к предельно достижимым с точки зрения принципиальных физических ограничений и технических возможностей на момент создания. В связи с высокой сложностью и стоимостью такие РЛС производятся в единичных экземплярах. Не всякое государство может позволить себе иметь столь дорогие инструменты. Создание таких РЛС требует самого высокого уровня науки, технологии и организации. Поэтому разработка и сооружение каждой такой новой суперРЛС является значительным научно-техническим достижением не только отечественного, но и мирового масштаба.

Объективная потребность в РЛС сверхдальнего действия появилась в 1950-х годах в связи с разработкой баллистических ракет (БР) и искусственных спутников Земли (ИСЗ). Их высокие скорости движения, большие дальности и высота полета потребовали принципиально новых подходов к разработке и производству радиолокационной техники. Существовавшие ранее РЛС наблюдения воздушных целей оказались непригодными для обнаружения и измерения параметров движения БР и ИСЗ. Они имели максимальную дальность действия до 200–300 км при наблюдении крупных объектов — самолетов. А нужно было обнаруживать и сопровождать на расстояниях в несколько тысяч километров быстро движущиеся объекты гораздо меньших размеров — головные части ракет и ИСЗ при их полете в околоземном космосе. Кроме того, к РЛС сверхдальнего действия для систем ПРН и ККП предъявлялось еще одно, беспрецедентное на то время требование, — они должны были обеспечивать непрерывное дежурство с высокой степенью достоверности. Это требовало от аппаратуры таких станций высочайшей надежности, а ремонт их узлов должен был выполняться в процессе непрерывной работы.

В нашей стране эти работы были начаты в 1954 году под руководством академика А.Л. Минца в созданном им Радиотехническом институте (сейчас ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»), а позднее также в НИИ дальней радиосвязи (НИИДАР). В настоящее время руководство работами по созданию суперРЛС дальнего действия осуществляет ОАО «Концерн «Радиотехнические и информационные системы» (Концерн «РТИ Системы»), куда в качестве головных предприятий-разработчиков вошли указанные институты.

В Радиотехническом институте (далее РТИ), который в 2006 году отметил свое 60-летие, под руководством А.Л. Минца были построены первые

полигонные образцы будущих РЛС сверхдальнего действия, а именно станции метрового диапазона ЦСО-П (1961 г.) и дециметрового диапазона ЦСО-С (1963 г.). На базе первой из них были затем созданы РЛС «Днестр» (1967 г.) и «Днестр М» (1969 г.), которые, благодаря достигнутым характеристикам, стали использоваться для контроля космического пространства и предупреждения о ракетном нападении.

А.Л. Минц был назначен генеральным конструктором системы ПРН. Его по праву можно считать основателем указанных оборонительных систем. При участии А.Л. Минца зарождались и развивались проекты последующих стратегических суперРЛС — «Днепр», «Даугава», «Дарьял», «Дон-2Н».

Научно-исследовательским институтом дальней радиосвязи (НИИДАР), которому в 2006 году исполнилось 90 лет, были созданы в 1970-х годах РЛС серии «Дунай» и в 2002 году цифровая РЛС «Волга», которые тоже относятся к разряду суперРЛС стратегического назначения и входят в состав систем РКО страны. Все такие суперРЛС с полным основанием можно считать вершинами научных, технологических и конструкторских достижений мирового радиостроения и отечественной радиоэлектроники.

Работы по радиолокации дальнего действия

Разработке РЛС сверхдальнего действия предшествовал проведенный в РТИ большой объем научных исследований и экспериментальных работ по разрешению принципиальных вопросов создания таких РЛС. В частности, были проведены натурные эксперименты по наблюдению и измерению эффективной площади рассеяния (ЭПР) головных частей баллистических ракет в районе их падения, на основе этих экспериментов был выбран оптимальный диапазон радиоволн. К этой работе, а также к дальнейшим исследованиям всего спектра радиофизических проблем, связанных с разработкой и созданием суперРЛС, от параметрических усилителей до влияния случайно-неоднородных сред на распространение радиоволн, были привлечены сильнейшие радиофизики во главе с С.М. Рытовым, впоследствии членом-корреспондентом АН СССР. Как подтвердилось в дальнейшем, выбор метрового диапазона радиоволн для локации малоразмерных целей на сверхбольшой дальности оказался решающим.

Работа РЛС по целям с большими скоростями (ракеты, спутники) при больших размерах антенны требовала применения электронного сканирования. А.Л. Минцем еще в 1935 году были определены методы фазового управления передатчиками для электронного сканирования сверхмощного радиоизлучения антенн. Это явилось основой для разработки в РТИ рупорных антенн с частотно-фазовым сканированием.

Гигантские энергии излучаемых сигналов, требующиеся для РЛС сверхдальнего действия, не могли быть реализованы в коротких импульсах, с которыми работали РЛС того времени. Применение же сигналов большой длительности не обеспечивало необходимую точность измерения дальности. Требовались принципиально новые формы радиолокационных сигналов с малой пиковой мощностью, но с хорошим разрешением по дальности. Лучшие отечественные и зарубежные ученые искали решение этой проблемы.



Среди них были и научные работники РТИ. А.Л. Минцем и его сотрудниками выбор был сделан в пользу мало изученных в то время фазо-кодоманипулированных (ФМ и КМ) сигналов, обладающих характеристиками, близкими к характеристикам оптимальных сигналов с высоким разрешением как по дальности, так и по скорости. Почти полувековая история подтвердила правильность этого выбора, особенно в условиях использования высоких цифровых технологий в наши дни.

Однако в то время для обработки ФМ-сигналов (их сжатия) были использованы аналоговые методы накопления на графиконе и ультразвуковые линии задержки. В серийной станции «Днестр» применялся накопитель на линии задержки.

РЛС «Днестр» и ее последующая модификация «Днестр-М» были полностью автоматизированы, управлялись ЭВМ (на РЛС «Днестр» — ЭВМ 5Э71, а на РЛС «Днестр-М» — более мощная ЭВМ 5Э72). На ЭВМ вычислялись также все параметры ИСЗ, которые передавались на командный пункт. По сравнению с РЛС «Днестр» в станции «Днестр-М», кроме высокопроизводительной ЭВМ и целого ряда аппаратуры на новейшей элементной базе того времени, использовался более длинный излучаемый сигнал — 800 мкс вместо 200 мкс. Для повышения точности измерения дальности производилась фазовая манипуляция сигнала 127-значной М-последовательностью с длительностью дискрета 6,25 мкс. В РЛС «Днестр» при дроблении сигнала до 100 мкс точность и разрешающая способность РЛС «Днестр-М» повысились в 16 раз.

В РЛС «Днестр» в угломестной плоскости применялся фазовый метод измерения угла, а в азимутальной — амплитудный, путем дробления излучаемого импульса на два подимпульса с изменением их несущей частоты. В РЛС «Днестр-М» в угломестной плоскости также применялся фазовый метод измерения угла, а пеленгация цели в азимутальной плоскости производилась разработанным в РТИ новым методом, суть которого заключалась в согласовании полосы зондирующего сигнала и «мгновенной» полосы антенны. Отсюда и была выбрана оптимальная длительность дискрета ФМ — 6,25 мкс.

К числу научно-технических достижений при создании РЛС «Днестр-М» следует также отнести разработку и внедрение параметрических усилителей метрового диапазона волн, позволивших вдвое снизить шумовую температуру приемного устройства с 400К до 200К.

Первые РЛС «Днестр» и «Днестр-М» были предназначены для применения в системе истребления спутников ИС. Испытание системы ИС, в том числе и радиолокационной системы в составе двух узлов ОС-1 и ОС-2, было успешно завершено в 1970 году, и она была поставлена на боевое дежурство. Созданная система радиолокационного поля протяженностью 3–5 тыс. км на базе двух узлов ОС-1 и ОС-2 с командными пунктами, на одном из которых (ОС-1) велся каталог спутников, представляла прообраз современной системы ККП.

Дальнейшее совершенствование РЛС «Днестр-М» привело к созданию новой РЛС дальнего действия «Днепр» (рис. 3.3.1), тактико-технические характеристики (ТТХ) которой существенно превысили ТТХ своей предшественницы. Основные особенности станций «Днепр» — более совершенные ме-



Рис. 3.3.1. РЛС «Днепр»

тоды обработки сигналов. В частности, на базе спецвычислителей было дополнительно введено когерентное накопление пачек импульсов (до 32), что существенно повысило потенциал станции и ее точность. Было также усовершенствовано управление диаграммой направленности антенны в угломестной плоскости, расширен сектор обзора по азимуту и повышена помехозащищенность. Для существенного повышения надежности произведена замена элементной базы на новую, в то время транзисторную электронику.

Конструктивно РЛС «Днепр» состоит из двух секторных РЛС, каждая из которых имеет антенну в виде сдвоенного рупора (250×12 м в раскрыве), возбуждаемого двумя рядами шелевых излучателей, расположенных на двух волноводах. Комплект приемопередающей аппаратуры, подключенный к паре волноводов одного конца антенны (радиолокационный канал), состоит из двух передатчиков и линейки приемоиндикационной аппаратуры, обеспечивающей частотно-фазовое управление диаграммой направленности в секторе $30^\circ \times 30^\circ$ (по азимуту и углу места, соответственно).

Четыре комплекта приемопередающей аппаратуры обеспечивают работу РЛС в секторе 120° . По углу места РЛС работает в интервале от 5° до 35° .

Для измерения координат и их производных по целям в станции «Днепр» используются сложные пачечные когерентные сигналы. Управление аппаратурой РЛС, обработка радиолокационной информации, информационный обмен с командным пунктом и функциональный контроль аппаратуры РЛС производятся в автоматическом режиме с помощью вычислительного комплекса электронных управляющих машин.

Основные тактико-технические характеристики

Зона обзора, град:	
по азимуту	120
по углу места	5–35
Импульсная мощность одного передатчика, МВт	1,25
Длительность зондирующего импульса, мс	0,8
Мощность, кВт	
средняя излучаемая	200
потребляемая	2100
Дальность действия по объектам с ЭПР* = 1 м ² , км	1900
Точность измерения координат:	
по дальности, км	1
по азимуту, мин	10
по углу места, мин	50
по радиальной скорости, м/с	5

*ЭПР — эффективная площадь рассеяния

РЛС «Днепр» составили основу радиолокационных узлов, созданных в 1968–1972 годах для обеспечения сплошного поля надгоризонтного обнаружения в основных направлениях (рис. 3.3.2). Две РЛС «Днепр» (в Мурман-

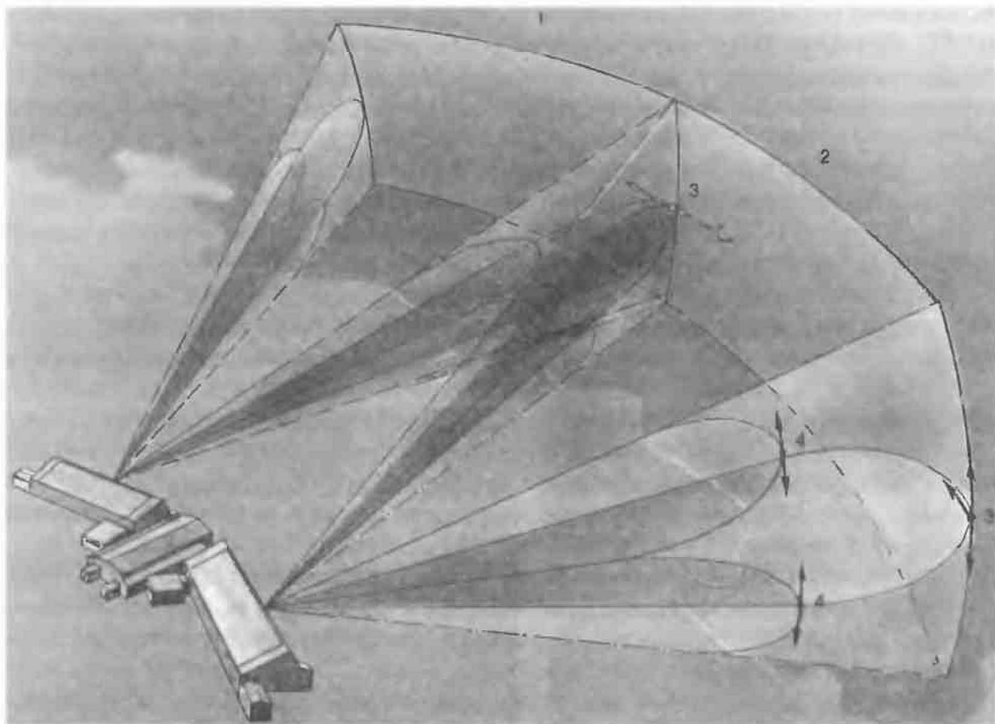


Рис. 3.3.2. Зона обзора РЛС «Днепр»

ске и в Иркутске) были сооружены на базе действующих РЛС «Днестр-М», а четыре РЛС «Днепр» были созданы заново — на Балхаше, в Иркутске, Севастополе и Мукачево. Они работают непрерывно уже более 30 лет и вместе с развернутыми позднее РЛС «Дарьял» составляют основу наземной части системы ПРН страны.

Дальнейшее развитие РЛС системы ПРН связано с непрерывным совершенствованием средств нападения вероятного противника, в том числе с увеличением количества ракет, уменьшением размеров и ЭПР их боевых частей, формированием сложных баллистических целей (СБЦ), уровнем возможного помехового противодействия. С целью дальнейшего улучшения информационных характеристик в состав радиолокационного комплекса была введена принципиально новая компонента — приемная РЛС (ПРЛС) «Даугава».

Она предназначалась, главным образом, для решения двух задач. Во-первых, эта приемная позиция должна была повысить достоверность радиолокационной информации северного узла при работе в неблагоприятной помеховой обстановке, вызванной, в частности, влиянием полярной ионосферы. Во-вторых, на ней намечалось реализовать и отработать первую крупноапертурную фазированную антенную решетку (ФАР), которая должна была дополнить высокочастотную передающую позицию с частотным качением луча.

Крупноапертурная ФАР ПРЛС «Даугава» позволила существенно улучшить характеристики узла за счет значительного повышения потенциала, радикального улучшения точности и разрешающей способности. Создание ПРЛС «Даугава» было крупнейшей научно-технической и производственной задачей отечественного радиостроения 1970-х годов. Требовалось разработать и поставить на боевое дежурство комплекс РЛС с крупноапертурной ФАР, содержащей 2048 излучателей на площади около 3000 м². Такая ФАР была создана на основе полного ряда СВЧ гибридных полосковых микросхем — многоканальных цифровых фазовращателей, аттенуаторов, сумматоров, направленных ответвителей и т.п. Разработка этой элементной базы и соответствующих методов расчета была проведена в РТИ.

Для изготовления микросхем был переоборудован крупный Южный радиозавод в г. Желтые Воды (Украина). В результате массогабаритные параметры многоканальной аппаратуры ФАР были снижены в тысячи раз по сравнению с традиционной СВЧ-аппаратурой. Надежность каналов ФАР обеспечивалась с помощью специальной автоматической аппаратуры, способной выявить, например, один неисправный переключающий р-і-п-диод из 400 тыс. штук, действующих в аппаратуре.

ПРЛС «Даугава» явилась прообразом и базой для отработки приемной ФАР следующего поколения РЛС серии «Дарьял». Разница между этими ФАР заключалась в размерах антенного полотна (антенна «Даугавы» была копией антенны РЛС «Дарьял», уменьшенной в два раза) и, соответственно, в числе излучателей и приемных каналов. Вычислительный комплекс был таким же, как в РЛС «Днепр».

Среди многочисленных проблем, которые пришлось преодолеть при разработке и сооружении крупноапертурной ФАР, можно выделить следующие:



Рис. 3.3.3. РЛС «Дарьял»: слева — передающий центр, справа — приемный центр

- обеспечение широкого сектора обзора множеством узких лучей (был реализован сектор обзора 90° по азимуту и по углу места);
- учет взаимного влияния близко расположенных приемных элементов и борьба с «ослеплением» антенны;
- выбор типа излучателей и их геометрического расположения в раскрыве антенны;
- выбор элементов и реализация системы фазирования на большой площади (в качестве элементов фазирования были использованы жесткие фазостабильные кабели, специально разработанные для этих целей, общая длина кабелей составила около 1000 км).

С целью преодоления дальнейшего совершенствования маскировки космических целей (снижения их ЭПР, усиления средств радиопротиводействия) в РТИ в 1971–1972 годах был разработан эскизный проект новой суперРЛС, которой было присвоено название «Дарьял» (рис.3.3.3). Наряду с крупногабаритной приемной ФАР в ней впервые была применена активная передающая ФАР. Кроме того, ее отличительными особенностями являются рекордно высокая излучаемая мощность и использование цифровых методов обнаружения сигналов.

Для такой сложной РЛС острой задачей стало обеспечение ее надежности при непрерывном дежурстве. С целью радикального решения этой задачи было впервые использовано крупномодульное построение приемной и передающей ФАР. При этом структурное построение РЛС позволяло сохранять требуемые характеристики при выходе из строя до 10% модулей.

РЛС «Дарьял» спроектирована в виде двух центров (позиций) — передающего и приемного. Основу приемного центра составляет фазо-фазовая приемная антенная решетка, состоящая из 4096 крест-вибраторов и подключенных к ним 8192 приемных усилителей, обеспечивающих независимый прием сигналов двух ортогональных поляризаций. Приемная антенна имеет двухступенчатую систему формирования луча. Вначале формируются сигналы от 32 вибраторов подрешетки, а затем суммируются сигналы от 128 таких подрешеток. Аппаратура первой ступени формирования приемной диаграммы направленности располагается на 18 этажах здания непосредственно за антенным полотном площадью около 6000 м².

В РЛС «Дарьял», в отличие от РЛС «Днепр», есть антенна автокомпенсации помех (АКП), которая вместе со специальной аппаратурой обеспечивает подавление активных шумовых помех от четырех помехоносителей. Еще одно отличие заключается в применении в два раза более длинного сигнала с фазовой манипуляцией 527-значной М-последовательности. В РЛС «Дарьял» установлена самая мощная по тем временам ЭВМ 5Э66 и применена новейшая элементная база.

Основу передающего центра составляет активная фазо-фазовая передающая антенна, состоящая из 1260 передатчиков со средней мощностью каждого 10 кВт. Передатчик состоит из усилителя мощности (передающего модуля) и модулятора. Передающие модули вместе с вибраторами вставляются непосредственно в антенную решетку, составляющую переднюю наклонную часть здания. Основную часть здания занимают модуляторы, расположенные на 12 этажах.

Передающие модули сменные, и для доставки их на ремонт в РПБ и после ремонта обратно в антенное полотно была разработана специальная транспортная система, состоящая из двух наклонных подъемников и манипуляторов. Вся транспортная система представляет собой сложный инженерный комплекс, работающий с большой точностью (единицы миллиметров) при больших нагрузках (передающий модуль весит больше тонны, а манипулятор — около 10 тонн).

РЛС «Дарьял» представляет собой очень сложное изделие не только в радиотехническом, но и в инженерно-строительном плане. Достаточно сказать, что по мощности энергопотребления и водоснабжению она эквивалентна городу с населением 50–60 тыс. человек (как, например, г. Печора, где была построена первая такая РЛС). В разработке и создании РЛС «Дарьял» принимало участие большое число НИИ, КБ и заводов Советского Союза, при этом основная аппаратура РЛС разрабатывалась коллективом сотрудников РТИ.

Основные тактико-технические характеристики РЛС «Дарьял»

Диапазон волн	метровый
Зона обзора, град:	
по азимуту	90
по углу места	40
Дальность действия:	
по объектам с ЭПР = 0,1 м ² , км	6000
Пропускная способность	более 50 космических объектов и до 4 аэродинамических помехоносителей

В 1984–1985 годах узлы на базе этих РЛС стали функционировать на Севере страны и в Азербайджане. Следует отметить, что потенциал указанных РЛС на два порядка превосходит потенциал зарубежных станций аналогичного назначения. РЛС «Дарьял» до сих пор остается самой мощной станцией метрового диапазона в мире. Это — единственный радиолокатор, способный обнаруживать высокоорбитальные космические объекты вплоть до геостационарных орбит.



Рис. 3.3.4. МРЛС «Дон-2Н»

Наряду с созданием суперРЛС и комплексов дальнего обнаружения для систем ПРН и ККП осуществлялась разработка и создание информационных средств ПРО. Это требовало дальнейшего развития сложившихся традиций и технических решений применительно к более высокочастотным диапазонам радиоволн и цифровой обработке сигналов для достижения требуемой пропускной способности и гибкости управления. Эти задачи были успешно решены в многофункциональной суперРЛС (МРЛС) «Дон-2Н», являющейся сейчас основным информационным средством в составе систем обороны центрального региона. Помимо наличия полной цифровой системы обработки сигналов и информации эта МРЛС отличается высокой пропускной способностью и широким набором зондирующих сигналов, обеспечивающих работу в различных режимах. В передающей активной крупномодульной ФАР реализованы предельно допустимые плотности мощности излучения в раскрыве (средняя мощность 30 кВт на 1 м²).

МРЛС «Дон-2Н» (рис. 3.3.4) предназначена для обнаружения баллистических целей, их сопровождения, измерения координат, анализа состава сложных целей и их распознавания. Она способна одновременно сопровождать в автоматическом режиме до 100 элементов СБЦ, осуществляя информационное обеспечение различных систем РКО.

МРЛС «Дон-2Н» представляет собой четырехгранный радиолокатор в виде усеченной пирамиды высотой 33 м, длиной сторон 130 м у основания и 90 м по кровле с неподвижными ФАР диаметром 18 м и зоной обзора во всей верхней полусфере. Число управляемых вибраторов в четырехгранной ФАР — более 250 тысяч, т.е. в сотни раз больше, чем в ранее созданных РЛС системы ПРН метрового диапазона. Работа в сантиметровом диапазоне волн при указанных размерах ФАР обеспечивает формирование узких лучей диаграммы направленности. Это позволяет получить высокие характеристики разрешения и точности по угловым координатам. Для достижения высокой надежности в условиях непрерывного дежурства станция имеет крупномодульную структуру. В МРЛС реализованы высокопроизводительный

спецвычислитель цифровой обработки радиолокационных сигналов в реальном масштабе времени и управляющий высокопроизводительный многопроцессорный вычислительный комплекс на базе МВК «Эльбрус-2», в котором была использована самая современная отечественная цифровычислительная электроника того времени.

С усложнением задач, возлагаемых на высокопотенциальные РЛС, проявляется тенденция повышения их программоемкости. Если в первых РЛС типа «Днестр» в боевой программе были реализованы примерно 10 тыс. условных команд на ЭВМ с быстродействием 100 тыс. оп./с, то в последних модификациях РЛС серии «Дарьял» уже было 500 тыс. условных команд, а спецвычислитель обработки сигналов выполнял более 50 млн. оп./с. В МРЛС «Дон-2Н» объем боевой программы, без учета операционной системы, превышает 1200 тыс. команд. При этом, по мере перехода к полной цифровой обработке сигналов, произошла трансформация программного обеспечения в функционально-программное. Затраты на его создание составляют 40–50% стоимости аппаратурного комплекса.

Основные тактико-технические характеристики МРЛС «Дон-2Н»

Диапазон волн	сантиметровый
Зона обзора, град.	
по азимуту	360
по углу места	1–90
Дальность действия	
по баллистическим целям, км	2500
Точность измерения координат	
по дальности, м	20
по угловым координатам, град.	0,02–0,04
Имеется режим сверхразрешения	

В одном из совместных с США экспериментов по исследованию возможности отслеживания малоразмерных космических объектов (так называемого «космического мусора») МРЛС «Дон-2Н» успешно сопровождала специально запущенные шары диаметром 5 и 10 см на дальностях 1500–2000 км. Создание суперРЛС «Дон-2Н» безусловно является научно-техническим и производственным достижением мирового радиостроения. Эта МРЛС безупречно осуществляет боевое дежурство в стратегических системах РКО нашей страны.

Некоторые итоги и перспективы работ по созданию высокопотенциальных радиолокаторов

Основной результат работ по созданию описываемых суперрадиолокаторов состоит в том, что они послужили основой зарождения и развития отечественных наземных систем РКО, которые, удовлетворяя всем требованиям международных договоров и соглашений, эффективно выполняют свои функции по защите нашего государства от стратегического наступательного



Рис. 3.3.5. Зоны контроля группировки радиолокационных средств системы ПРН

оружия массового поражения, обеспечивают военный паритет и геополитическое равновесие в мире (рис. 3.3.5).

Другим важным итогом стало то, что три основные составляющие — наука, технология и организация, которые определили условия для создания таких мощных радиотехнических комплексов, благодаря этим работам сами вышли на более высокий качественный уровень. Каждая новая РЛС — это очередная ступень в их развитии и достижение отечественного и мирового радиостроения.

Динамика развития суперрадиолокации тесно связана с динамикой радиоэлектроники и радиотехники. Нарастание излучаемой мощности зондирующих сигналов стало возможным благодаря прогрессу технологии и производства передающих устройств — мощных генераторных ламп, клистронов, твердотельных приборов. Повышение чувствительности приемных

устройств достигнуто применением ЛБВ, транзисторов и параметрических усилителей с низким уровнем собственных шумов. Достижения в области микроэлектроники СВЧ позволили снизить массогабаритные параметры аппаратуры и реализовать крупноапертурную ФАР — один из основных элементов современного радиолокатора, во многом определяющий его ТТХ. Прогресс в области формирования и обработки сложных высокоинформативных радиолокационных сигналов обеспечил многофункциональность и дальнейшее повышение ТТХ суперРЛС. Наконец, бурное развитие электронно-вычислительной техники и переход к цифровым технологиям кардинально меняют облик и возможности нового поколения суперРЛС.

Прежние достижения суперрадиолокации получены ценой высоких финансовых затрат и объединения научно-производственного ресурса коллективов многих предприятий. Эксплуатация таких РЛС требует также больших финансовых затрат и технически сложного обслуживания. Это связано, в первую очередь, с высоким уровнем энергопотребления комплексов, а также с эксплуатацией сложных инженерных конструкций, таких как системы жидкостного охлаждения передатчиков, механизмы автоматической замены вышедших из строя энергоемких передающих модулей активных ФАР.

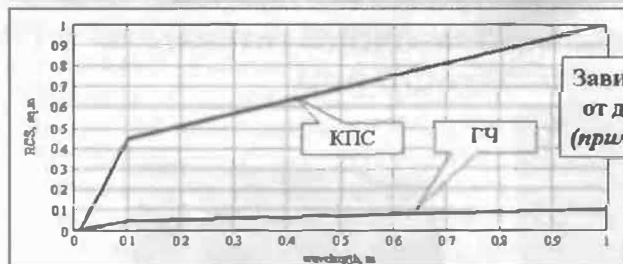
Сегодня прогресс СВЧ-микроэлектроники и цифровых вычислительных технологий позволяет радикально изменить подходы к конструированию и созданию суперРЛС нового поколения. Наряду с повышением информационных характеристик таких РЛС принципиально новыми направлениями при их создании являются реализация энергосберегающих технических решений, а также контейнерно-модульное построение с высокой заводской готовностью.

Эффективность энергосбережения достигается только при комплексном подходе к решению всего ряда задач, связанных с созданием РЛС. Значительный вклад в этот показатель вносят новые технологии мощной СВЧ-электроники, использующие нанотехнологическую базу, позволяющую существенно повысить КПД и термоустойчивость передающих модулей, значительно снизить их энергопотребление, упростить отвод тепла и обслуживание.

Максимальная цифровизация и интеллектуализация аппаратуры на всех уровнях, включая компоненты активных ФАР, позволяют реализовать высокую степень адаптации РЛС к неблагоприятным внешним условиям и помеховой обстановке, избежать неоправданных энергетических потерь.

Особое место в ряду энергосберегающих технологий суперрадиолокации отводится возможности работы одной суперРЛС в двух диапазонах. На рис. 3.3.6 представлены достоинства длинноволновой и коротковолновой части дециметрового диапазона волн, используемого в радиолокации РКО. Современная микроэлектроника позволяет успешно совместить в едином конструктиве аппаратуру для двухдиапазонной работы суперРЛС нового поколения. Облик такой РЛС в контейнерном исполнении показан на рис. 3.3.7. За счет высокой степени адаптивности управления и обработки в ней осуществляется синергетическое сложение максимальных возможностей обоих диапазонов (UHF и S). В таблице приведены основные тактико-технические характеристики такой РЛС. Возможности ее перебазирования и быстрого

Обеспечение большой дальности обнаружения: длинноволновая часть ДМ

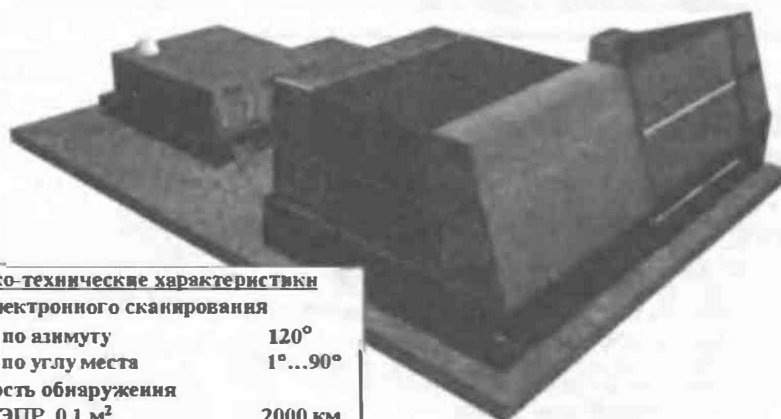


Зависимость ЭПР ГЧ и КПС БРСД
от длины волны
(пример)

Обеспечение высокой точности и распознавания: коротковолновая часть ДМ

Длина волны	Размер апертуры ФАР (для ширины луча ФАР 1 град.)	Ширина полосы сигнала
1 м	50 м	1 МГц
0,1 м	5 м	200...300 МГц

Рис. 3.3.6. Выбор частотных диапазонов суперРЛС



Тактико-технические характеристики	
Зона электронного сканирования	
по азимуту	120°
по углу места	1°...90°
Дальность обнаружения цели с ЭПР 0,1 м²	2000 км
Точность сопровождения	
по углам	3 угл.мин.
по дальности	5 м

Рис. 3.3.7. Конструктивный облик двухдиапазонной суперРЛС

развертывания в поле ГЛОНАСС-GPS позволяют оперативно сформировать инфорадиолокационную соту, способную на сигнально-логическом уровне эффективно взаимодействовать с космическим и воздушным эшелонами. Это существенно расширяет возможности решения задач РКО при минимальных энергозатратах.



**Перспективная РЛС системы ПРН
высокой заводской готовности
контейнерного типа**



Рис. 3.3.8. РЛС нового поколения

Таблица. Основные характеристики суперРЛС нового поколения

Характеристика	Значение
Диапазон частот	UHF + S
Размер зоны действия по азимуту по углу места Конструктивная дальность	до 360° 1–90° 3000–3500 км
Дальность обнаружения цели с ЭПР = 0,1 м ² (с вероятностью 0,95)	до 2000 км
Разрешающая способность по угловым координатам (поиск/сопровождение) по дальности (поиск/сопровождение) по дальности (сверхразрешение)	4°/0,5° 1000 м/30 м 1–1,5 м
Точностные характеристики (с.к.о. элементов движения) по угловым координатам по дальности по радиальной скорости	3–4 угл.мин 5 м 1,0 м/с
Пропускная способность (число сопровождаемых целей)	100–200

Новые энергосберегающие решения и эффективное использование перспективной СВЧ-микродоэлектроники в сочетании с новой радиоцифровой и цифро-вычислительной базой позволяют сегодня успешно осуществлять создание отечественных суперрадиолокаторов нового поколения для стратегических российских национальных систем. Контейнерное исполнение и



высокая заводская готовность комплексов обеспечивают быстрое их развертывание на объекте без больших строительных работ. Отсутствие сложных систем жидкостного охлаждения и высокий уровень автоматизации контроля позволяют существенно снизить эксплуатационные затраты и сократить численность обслуживающего персонала. Разработки таких суперРЛС нового поколения завершаются в РТИ и НИИДАР.

Первый головной образец суперРЛС (рис. 3.3.8) для российской системы ПРН вводится на объекте Лехтуси. Открытая контейнерно-модульная архитектура позволяет наращивать тактико-технические характеристики такой РЛС, а также осуществлять совершенствование аппаратурно-программных компонентов в процессе ее эксплуатации. Все это призвано обеспечить сверхдлительный жизненный цикл суперРЛС нового поколения.

3.4. Средства и системы радиоэлектронной борьбы

Ю.Н. Мажоров, кандидат технических наук, профессор,
Перунов Ю.М, академик РАН

Вопросы аппаратурного решения средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в общедоступной литературе в нашей стране практически никогда не освещались. В то же время существует прямая зависимость схмотехнических, конструкторских решений и функциональных возможностей аппаратуры РЭБ от возможностей изделий электронной техники. И, наоборот, существует зависимость требований к изделиям электронной техники (ИЭТ) от аппаратурных решений, названных выше.

Развитие средств РЭБ неразрывно связано с появлением и применением в практике различных радиотехнических средств управления и обнаружения наземного, морского, воздушного и космического назначения. Снижение эффективности действия этих средств или их подавление должно осуществляться с помощью средств радиоэлектронной борьбы. Такая целевая направленность средств РЭБ повлияла на развитие их номенклатуры. Исторически радиоэлектронная борьба развивалась и совершенствовалась по мере развития средств связи и радиолокации (см. Приложение «Из истории развития радиосредств борьбы и радиоразведки», с. 268).

Последние два десятилетия характеризуются массовым внедрением в вооруженные силы ведущих государств мира автоматизированных систем и радиоэлектронных средств для управления войсками (силами) и оружием, что позволило повысить с 1970 года боевой потенциал войсковой группировки (без увеличения ее количественного состава) в 2,5–3 раза. В этих условиях резко возросла роль радиоэлектронной борьбы. Многообразие необходимых средств РЭБ потребовало привлечения к их разработке и производству значительного количества творческих коллективов и предприятий.

Средства радиозлектронной борьбы, созданные в ЦНИРТИ

Средства радиозлектронной борьбы 50-х годов XX века

Основными рабочими диапазонами большинства радиолокационных станций в Европе и США в период 1950-х годов были волны метрового диапазона, волны 20-, 10- и 3-сантиметрового диапазонов. Соответственно этому разрабатывались станции помех.

До 1959 года основными видами создаваемых радиолокаторам помех были следующие:

- прицельная по частоте и направлению непрерывная шумовая помеха;
- заградительная широкополосная непрерывная шумовая помеха;
- дипольные отражатели (ДО) и радиопоглощающие материалы (РПМ).

Наиболее эффективной и универсальной помехой являлась шумовая помеха, подобная собственным шумам радиоприемника радиолокатора. Поскольку создание прицельных непрерывных шумовых помех требует точного знания частоты и направления на подавляемый локатор, то для подавления многоканальных радиолокаторов аппаратура помех весьма громоздка. В то же время перестраиваемый по частоте локатор эффективно подавить она не может. Для этой задачи начали создаваться станции заградительных помех. Они были эффективны, но при работе в сантиметровом диапазоне требовали мощных источников излучения. Так, например, для защиты группы самолетов от обнаружения наземными радиолокаторами в строю самолетов должен был находиться специальный самолет — постановщик помех типа бомбардировщика, но кроме станции помех он уже не мог нести бомбовой нагрузки.

Еще большие проблемы применения станций непрерывных шумовых помех возникли тогда, когда были созданы зенитные ракеты, способные осуществлять самонаведение на источник помех и поражать его. Появились и авиационные ракеты, самонаводящиеся на наземные источники излучения. Типичными для таких средств является американская наземная зенитная система «ХОК» и авиационная ракета поражения РЛС «Шрайк» и «Харм».

Дипольные отражатели широко применялись как немцами, так и англичанами во Второй мировой войне. Это были металлические полоски из фольги, упакованные в пачки. Длина полосок выбиралась примерно равной половине длины волны радиолокатора, которому создавались помехи. В этом случае обеспечивалась наибольшая эффективность отражения. В начале 1950-х годов были разработаны устройства для локаторов, которые позволяли уверенно выделять движущиеся цели (самолеты) на фоне медленно перемещающихся в пространстве металлизированных полосок, и эффективность применения дипольных помех резко снизилась.

Радиопоглощающие материалы при падении на них радиоволны поглощают энергию волны, превращая ее в тепло. Отражающаяся энергия уменьшается во много раз и объект, который закрыт таким материалом, может стать невидимым для радиолокатора. Использование поглощающих материалов в со-

четании со специальной формой конструкции самолета позволило создать США самолеты-«невидимки», а в СССР использование таких покрытий для защиты головных частей баллистических ракет сделало невозможным перехват головных частей средствами противоракетной обороны (ПРО).

В конце 1940-х — начале 1950-х годов разработка средств помех для противодействия радиолокационным станциям определялась как важнейшая задача. В первую очередь для защиты самолетов ВВС требовалось создать станции помех для подавления наземных радиолокаторов ПВО и станций оружейной наводки зенитной артиллерии (СОН). Важно было также подавить работу самолетных радиолокаторов, предназначенных для осуществления прицельного бомбометания (ПСБН).

Эти радиолокационные средства работали в 3-, 10-, 20-сантиметровом и метровом диапазонах волн. Однако для их подавления точные значения частот их работы предстояло разведать, для чего надо было разработать приемники радиотехнической разведки. В метровом диапазоне проблем с созданием приемников не было. Для этого уже существовали все необходимые изделия электронной техники. Но для приемников в сантиметровом диапазоне нужны были перестраиваемые генераторы (отражательные клистроны) с максимально возможными диапазонами перестройки, а также широкополосные смесители — преобразователи частоты. Необходимые клистроны были созданы в НИИ-160, а полупроводниковые смесительные диоды — в лаборатории НИИ-108. В ходе работ, именовавшихся «ПР-1» и «ПР-2», были созданы станции радиотехнической разведки в интересах ВВС, ПВО и ГРАУ. Приемники начали выпускаться серийно и получили названия «приемник предварительной разведки» — станция «П» и «приемник точной разведки» — станция «РМ». На базе этих работ был создан комплекс аппаратуры, который был принят на вооружение. В него входили станции грубой разведки СРС-2 на диапазон от 10 см до 5 м и станция точной разведки СРС-1 (четыре вида приемников). Вес всего комплекса был значительный, так как вес каждого комплекта станций достигал 250–300 кг. На рис. 3.4.1 показаны антенны станции на концах крыльев самолета.

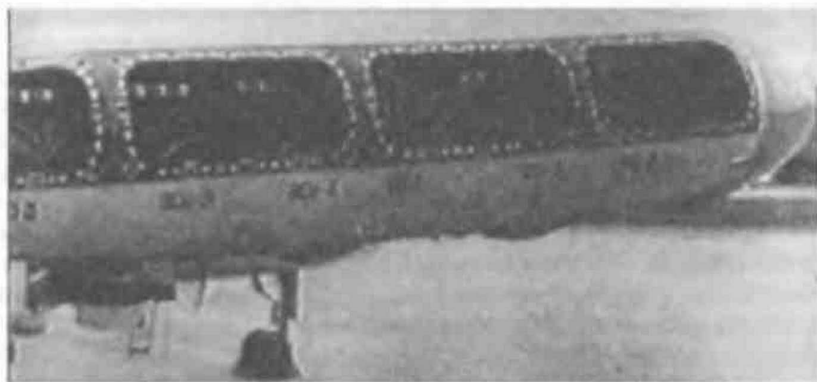


Рис. 3.4.1. Антенна станции СРС радиотехнической разведки на концах крыльев самолета

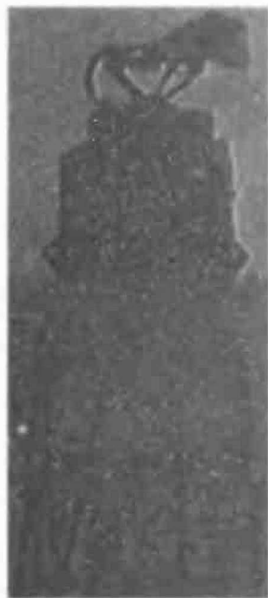


Рис. 3.4.2. Выносной передатчик помех

Для создания передатчиков помех нужны были мощные перестраиваемые генераторы сверхвысокой частоты (СВЧ). Таковыми стали мощные перестраиваемые магнетроны непрерывного режима работы. Изменение частоты достигалось механическим перемещением элемента, изменяющим емкость или индуктивность резонаторов. Магнетроны имели возможность изменения частоты в пределах до 20% и достаточно высокий КПД.

Для модуляции излучения шумами в качестве задающего генератора шума был использован газоразрядный прибор в виде «пальчикового» триода, баллон которого заполнялся инертным газом и помещался в продольное магнитное поле. Спектр шумов прибора, называемого тиратроном, доходил до 10 МГц. Других специализированных ИЭТ для первых станций помех не требовалось.

В течение 1950-х годов было разработано несколько типов станций помех, часть которых выпускалась серийно. Из наземных станций помех для подавления шумовой помехой самолетных радиолокационных бомбоприцелов первой была станция СПБ-1 («Альфа»). Для тех лет это была вполне современная станция. Она позволяла вести широкополосный поиск сигналов РЛС, осуществляла точное определение частоты подавляемого локатора и наведение на нее частоту передатчика помех. Станция позволяла определять направление на источник излучения и наводить на него антенну станции помех. Передатчик излучал шумовую прицельную непрерывную помеху и выносился из станции на 50–100 м. На рис. 3.4.2 представлен выносной передатчик помех.

Налет самолетов обычно производится звеном из трех самолетов, и одновременно на каждом из них работают радиолокационные прицелы. С целью одновременного подавления всех самолетов звена была разработана станция помех СПБ-5 («Бэа»). Эта станция уже имела три передатчика шумовых помех и соответствующую аппаратуру управления ими. Передатчики помех размещались в прицепе к автофургону, где находилась аппаратура разведки и управления, модернизированная для задач наведения и управления по трем излучающим целям. Станции СПБ-1 и СПБ-5 выпускались серийно. Они работали в 3-сантиметровом диапазоне, и каждый передатчик обладал мощностью порядка 500 Вт. Для управления группой таких станций при защите района ПВО была разработана аппаратура управления «Сегмент». Она могла выдавать данные для постановки помех всей группировке станций помех. Для оптимального использования станций СПБ-5 в группе станций помех была произведена модернизация этой станции, которая выпускалась как СПБ-7.

Первой самолетной станцией помех для подавления наземных радиолокаторов ПВО была станция «СПС-1» («Натрий»). Она имела панорамный

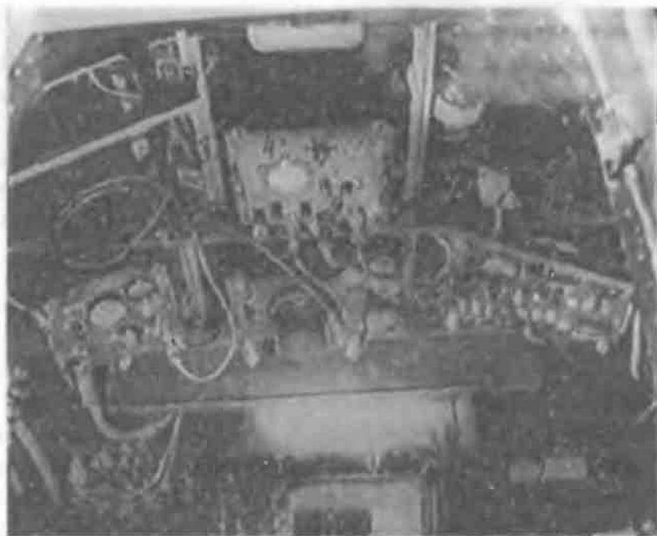


Рис. 3.4.3. Рабочее место оператора станции помех в самолете

приемник для разведки и определения частоты станции, подлежащей подавлению. Определяла направление на источник излучения и обеспечивала наведение передатчика помех как по частоте, так и по направлению. Передатчик излучал шумовую прицельную непрерывную помеху. Станция работала в 10-сантиметровом диапазоне. Магнетрон передатчика имел мощность порядка 300 Вт. На рис. 3.4.3 представлено рабочее место оператора «СПС-1» в самолете.

Такая станция не могла создать эффективную помеху многоканальным радиолокаторам и для этого была создана станция заградительных непрерывных шумовых помех «Завеса». Для нее были разработаны мощные магнетроны, каждый из которых мог генерировать спектр шумов полосой до 50-60 МГц. Пять таких передатчиков, настроенных в стык, создавали помеху в полосе почти 300 МГц, закрывая шумовой помехой почти 10% 10-сантиметрового диапазона. Именно в этой полосе практически работали все локаторы этого диапазона. Станции не требовался приемник разведки, поскольку она закрывала помехой весь возможный диапазон частот. Главным ее недостатком была значительная потребляемая мощность от бортовой сети самолета. Станция была размещена на самолетах ТУ-16 и ТУ-22.

Для создания шумовых непрерывных прицельных помех в 20-сантиметровом диапазоне была разработана станция помех «Силикат». Она была аналогична станции СПС-1, имела такой же приемник разведки в требуемом диапазоне. Передатчик работал на перестраиваемом магнетроне и имел мощность 600 Вт.

Как видно, главным и важнейшим элементом всех станций помех этого поколения были перестраиваемые мощные магнетроны. Их создание явилось важным успехом создателей изделий электронной техники. Именно они позволили создать названные выше средства электронной борьбы, выпускавшиеся серийно, что позволило вооружить нашу армию современными

по тем временам средствами РЭБ. Поскольку на вооружении в ряде стран состояли также радиолокаторы метрового диапазона волн, то для их подавления была разработана станция помех метрового диапазона «Модуляция». Источником шумовых сигналов был тиратрон, спектр которого переносился преобразователем частоты в нужный диапазон, а затем усиливался широкополосным ламповым усилителем. Этот же метод использовался при создании станций помех дециметрового диапазона — «Фасоль», «Лось», «Мимоза».

Разработка и создание средств РЭБ в период 1960–1980-х годов

Рост помехозащищенности радиолокаторов побуждал к поиску новых методов и способов формирования помеховых сигналов. К числу новых способов для повышения эффективности и живучести станций помех следует отнести предложенный автором способ, по которому на каждый принятый от локатора зондирующий импульс излучалась серия импульсов, аналогичных отражаемому от цели, имитируя этим большое число целей или шумовой сигнал, длительностью меньше периода повторения. Так возникла идея создания ответных многократных и шумовых помех (авторские свидетельства № 18825, 22 января 1958 г., на имя Мажорова и № 20264, 7 апреля 1959 г., на имя Мажорова, Мякотина, Зиничева, Киреева). Предложенные способы стали основой создания нового класса станций многократных импульсных и шумовых ответных помех.

Для станций ответных помех нужно было создать устройство, которое бы позволяло за время длительности (0,5–1 мкс) принимаемого импульса радиолокационной станции точно определить частоту излучения и запомнить эту частоту на время, в течение которого будет происходить генерация ответных помех, принимаемых радиолокатором. Макетный образец такого устройства был создан в работе «Север-1». Он получил название «Система определения и воспроизведения частоты» — СОВЧ (рис. 3.4.4). Такое название закрепилось за этим устройством почти во всех последующих образцах станций ответных помех, создававшихся после 1960 года.

В 1990-х годах был создан блок на новой элементной базе ИЭТ (рис. 3.4.5), где вся система СОВЧ уже могла быть размещена всего на одной плате. Поскольку система СОВЧ на своем выходе прямо воспроизводила частоту принятого сигнала, мощность которого составляла единицы милливатт, то для создания помехи на этой частоте его нужно было усилить до требуемых значений. Возникла потребность в разработке мощных широкополосных усилителей СВЧ. Это были лампы бегущей волны (ЛБВ), способные усиливать сверхвысокие частоты. Однако серийного выпуска таких ламп в нашей стране еще не было. Образцы ЛБВ, как и первый макетный образец станции ответных помех «Север-1» на лампах бегущей волны, были разработаны в институте.

Для промышленного производства станций ответных помех были крайне необходимы новые виды ИЭТ. В первую очередь была необходима промышленная разработка и серийный выпуск цепочек ламп бегущей волны для усиления в широкой полосе частот сигналов от уровня единиц милливатт до

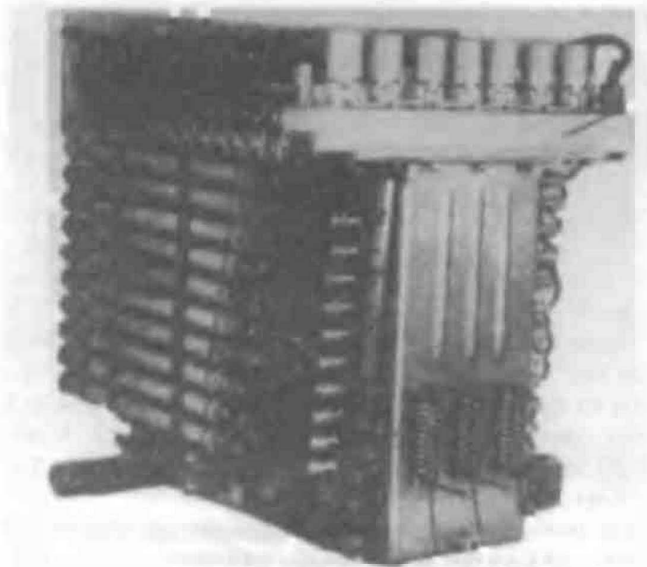


Рис. 3.4.4. Один из первых блоков системы СОВЧ

десятков и сотен ватт. Другой важной задачей являлось создание надежных полупроводниковых транзисторов для замены электронных ламп. Это тоже стало задачей предприятий электронной техники. Для имитации движения создаваемых ложных целей возникла необходимость создания ультразвуковых линий задержки. Не было и маломощных переключателей СВЧ-диапазона с временем переключения за доли микросекунд.

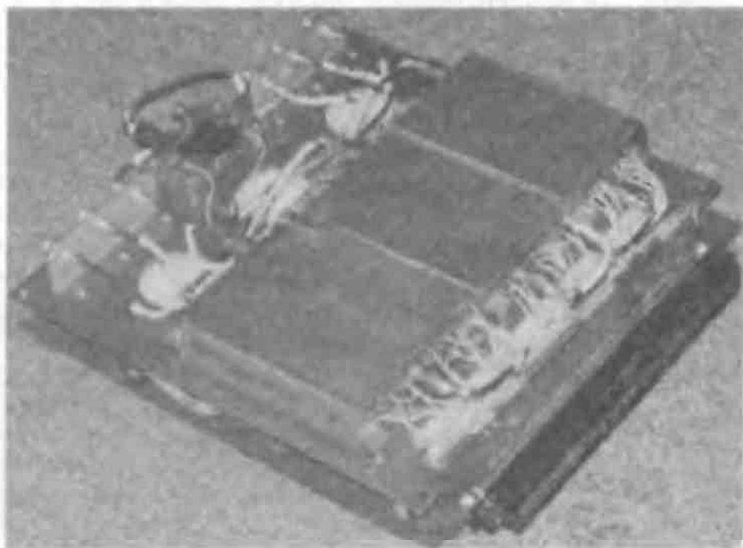


Рис. 3.4.5. Блок СОВЧ, созданный на новой элементной базе ИЭТ



Рис. 3.4.6. В таком виде ЛБВ поставлялась заказчику

Разработка этих изделий электронной техники проводилась как институтом ЦНИРТИ, так и институтами и КБ электронной промышленности. Однако поставка таких важнейших приборов, как ЛБВ, в то время выглядела следующим образом. Лампа бегущей волны поставлялась потребителю в виде стеклянного баллона (рис. 3.4.6), в котором размещались катод, управляющий электрод, замедляющая спираль и вывод анода. Систему фокусировки магнитного поля, устройство ввода и вывода СВЧ-сигнала должен был делать потребитель.

Фокусирующее магнитное поле для работы лампы создавалось специальными соленоидами, для питания которых требовались стабилизированные и мощные источники питания. В результате, например, только один выходной каскад усилителя на ЛБВ в первой станции помех «Резеда» весил почти 30 кг, а все усилители станции имели вес более 100 кг. Все попытки обязать разработать усилитель на ЛБВ в виде единой конструкции с магнитным полем, как это делалось за рубежом, встречали решительное сопротивление руководства электронной промышленности.

Помогло преодолеть такое положение событие, которое произошло 1 мая 1960 года. Как известно, в этот день на территорию нашей страны вторгся американский самолет-нарушитель «У2», пилотируемый Пауэрсом. Самолет был сбит нашей ракетой системы С-75. В хвостовой части самолета была установлена для индивидуальной защиты станция помех «Рейнджер». Это была станция ответного типа 3-сантиметрового диапазона. Ее двухкаскадный усилитель выходного каскада был выполнен на пакетированных ЛБВ и вся станция имела вес не более 16 кг. Решением Комиссии по военно-промышленным вопросам (ВПК) было предписано сделать такую же станцию в институте, а пакетированные усилители ЛБВ разработать на предприятиях электронной промышленности. И такая станция была разработана (рис. 3.4.7, 3.4.8).

Станция получила название «Соната». Это была первая в СССР станция помех, полностью созданная на полупроводниковых приборах и работавшая на первых пакетированных лампах бегущей волны 3-сантиметрового диапазона. Сравнение этой станции с разработанной в 1956 году КБ «Экран» (Самара) станцией однократных ответных помех СПС-3 с применением электровакуумных приборов и непакетированных ЛБВ показывает их различие. Вес и габариты станции «Соната» почти в пять раз легче и меньше. Это всего один блок! Станция СПС-3 могла создавать помехи только импульсным РЛС, использующим коническое сканирование пространства. Станция «Соната» кроме такой помехи могла создавать еще и уведящие помехи по скорости РЛС непрерывного излучения. Из этого примера видно, какое огромное влияние характеристики и параметры изделий электронной техни-

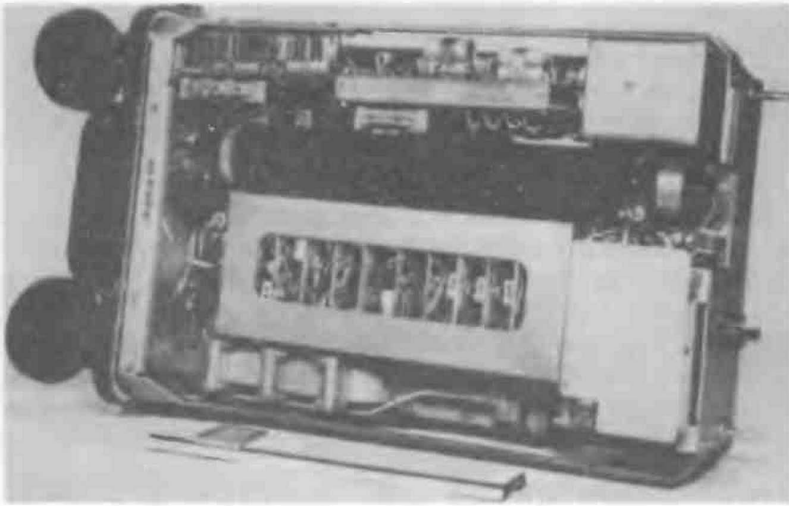


Рис. 3.4.7. Станция «Соната» (без кожуха)

ки оказывали на эксплуатационные характеристики создаваемых станций помех. Столь же велика была роль полупроводниковых транзисторов, когда ими стало возможно заменять радиолампы.

Первой промышленной многофункциональной станцией однократных, многократных и шумовых ответных помех стала станция «Резеда». Станция предназначалась для индивидуальной защиты самолетов типа бомбардировщик от обнаружения наземными локами ПВО, а также станциями оружейной наводки зенитной артиллерии (СОН). Она имела три частотных литеры, с помощью которых перекрывался весь частотный 10-сантиметровый диапазон, где могли работать наземные радиолокаторы ПВО и СОН. Для нарушения автоматического сопровождения самолетов по угловым координатам путем сканирующей диаграммы направленности в станции был предусмотрен режим помех, исключавший такое сопровождение. Это режим однократной ответной помехи. Кроме того, для предупреждения летчика об атаке со стороны задней полусферы в станции было предусмотрено специальное приемное устройство.

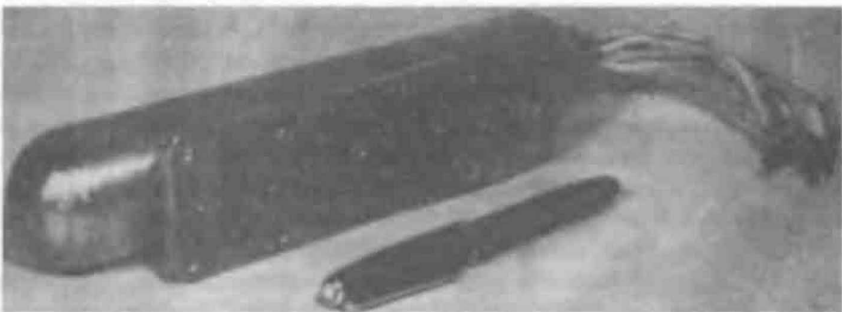


Рис. 3.4.8. ЛБВ «Шкив»

Многократные ответные помехи в виде подобных, отраженных от самолета сигналов, располагались на разных дальностях, а также могли занимать на экранах РЛС различное угловое положение. Станция могла создавать помехи любому радиолокатору ПВО, работавшему в ее частотном диапазоне как многочастотному, так и с перестройкой частоты. В промышленном образце станции были сохранены почти все характеристики, полученные в макетном образце «Север-1», включая и выходную мощность передающей части. Однако отсутствие пакетированных ламп бегущей волны, отсутствие высокочастотных полупроводниковых триодов, которые заменялись радиолампами пальчиковой серии и лампами типа «дробь» привело к значительному увеличению веса станции. Общий вес одного частотного литера станции доходил до 250 кг. Это не давало возможности разместить эффективную станцию защиты на самолетах типа истребитель. Первый литер станции был разработан в 1960 году. В дальнейшем было разработано еще два литера для перекрытия всего требуемого диапазона.

Принципы создания ответных помех, пришедших на смену непрерывным шумовым помехам, получили всеобщее признание, и большинство вновь создаваемых станций помех для подавления работы импульсных радиолокаторов создавались как станции ответных помех не только для ВВС, но и для службы ПВО и ВМФ.

В середине 1960-х годов для защиты кораблей Военно-морского флота началась разработка станций помех «Гурзуф». Они создавались Таганрогским научно-исследовательским институтом связи (ТНИИС). За основу создаваемых станций были взяты станции ответных помех «Резеда». Поскольку станции «Резеда» были созданы для ВВС, то потребовалась большая переработка этих станций под условия эксплуатации их на кораблях ВМФ. Это, прежде всего, увеличение числа литеров для перекрытия заданного диапазона работы, так как более мощные выходные усилители на непакетированных ЛБВ увеличили число литеров с трех до семи. Были разработаны новые антенно-фидерные системы. В связи с более высокими требованиями в ВМФ по прочности и влагозащите все блоки станции полностью реконструировались.

В 1960-е годы развитие средств и систем управления зенитным ракетным оружием (ЗУРО) достигло высокой степени. Ракетный комплекс «Найк Геркулес», система «Хок» в США, отечественные системы С-75, С-125 обладали способностью уничтожать самолеты, летающие на малых и больших высотах с любой скоростью, с вероятностью 0,98. Так, во время войны во Вьетнаме, где действовала авиация США против Северного Вьетнама, которому СССР поставил нашу систему С-75, только в 1966 году было сбито более 400 самолетов, а всего США потеряли в этой войне более 4000 самолетов. Для того чтобы уменьшить катастрофические потери самолетов, американцы начали масштабное применение средств помех для их защиты. Результаты сказались незамедлительно — живучесть защищаемых самолетов возросла почти в десять раз!

Возникла необходимость создания новых отечественных станций помех для защиты самолетов всех классов, начиная от истребителя. К этому времени электронной промышленностью было развернуто серийное производство пакетированных ЛБВ и ламп обратной волны нужных диапазонов частот,

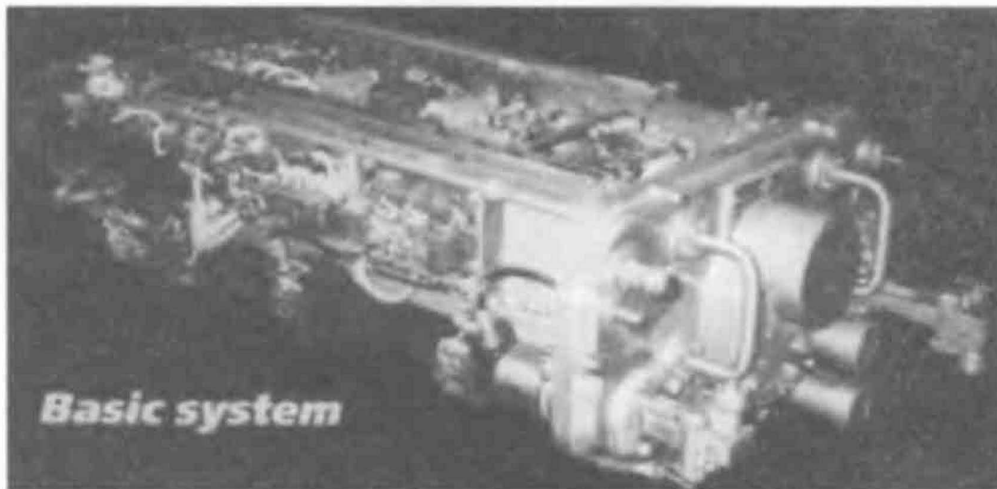


Рис. 3.4.9. Литер станции «Сирень-И»

начался выпуск транзисторов, работоспособных на частотах сотен мегагерц. Это создало предпосылки для разработки унифицированных станций помех для защиты всех классов боевых самолетов ВВС. Учитывая различные величины отражающих площадей ($S_{\text{эфф}}$) истребителей и бомбардировщиков и различие их задач, решено было разработать станции помех, позволяющие наращивать возможности по подавлению различных РЛС в зависимости от типа самолета, на котором размещалась станция помех. Разработка станций производилась ЦНИРТИ и КБ «Экран».

Для защиты истребителей было разработано три литеры станций «Сирень-И» (рис. 3.4.9). Это были станции ответного типа. Они перекрывали диапазон от 3- до 10-сантиметрового. Станции могли создавать помехи РЛС импульсного и непрерывного излучения и работали автоматически. Для импульсных РЛС создавалась однократная помеха каналу сопровождения по углам, а также уводящая помеха по дальности. Для РЛС непрерывного излучения создавалась уводящая помеха по скорости. Станции были сконструированы с учетом максимально возможного использования полупроводниковых триодов и с применением пакетированных ламп бегущей волны. В станциях предусматривалось устройство предупреждения летчика об атаке самолета со стороны задней полусферы. Вес станции в зависимости от диапазона находился в пределах 30–40 кг.

Станция предназначалась для защиты самолетов легкого типа, имеющих небольшую эффективную площадь рассеяния $S_{\text{эфф}}$.

Для защиты фронтовых самолетов истребителей-бомбардировщиков предназначалась станция «Сирень-Ф». Основу ее составляла станция для истребителей, но в ее состав был введен блок усиления мощности, что позволяло защищать более крупный самолет. Режимы создаваемых помех были такие же, как у станции «Сирень-И». Для перекрытия всех частот было разработано три литеры станций «Сирень-Ф». За счет добавления блоков мощности вес станции был в пределах 60–70 килограмм. На

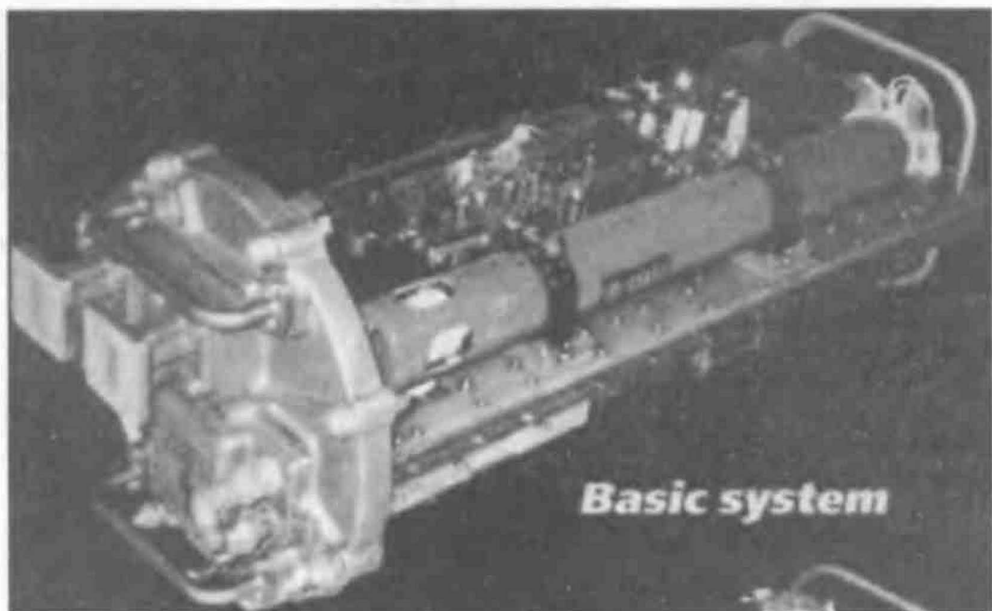


Рис. 3.4.10. Блок усиления мощности станции «Сирень-Ф»

рис. 3.4.10 представлен блок усиления мощности, который превращал станцию «Сирень-И» в станцию «Сирень-Ф», предназначенную для защиты самолетов фронтовой авиации.

Поскольку эти станции не создавали помех радиолокаторам обнаружения системы ПВО, то по требованию ВВС была разработана станция «Сирень-Д», которая также имела три литеры для работы в соответствующих диапазонах частот. Основу этой станции составляла станция «Сирень-Ф», но в ее состав был включен блок определения частоты импульсов подавляемой РЛС и ее длительного воспроизведения для создания ответных многократных импульсных помех и ответных шумовых помех, т.е. система СОВЧ. Станция предназначалась для установки на бомбардировщиках и обеспечивала не только его собственную защиту, но и прикрытие боевых порядков истребителей, сопровождавших бомбардировщик. По существу, эта станция полностью заменяла станцию «Резеда» предыдущей разработки, но весила почти в 2,5 раза меньше. Добиться этого удалось, практически, только благодаря тому, что электронной промышленностью были созданы вполне современные для того времени ИЭТ, в том числе ЛБВ пакетированной конструкции. Все функциональные логические узлы станции были выполнены на германиевых транзисторах МП101, МП103, П306, П309, П416, 1Т308, 1Т311, а также на только что появившихся в то время кремниевых транзисторах 2Т203, 2Т312, которые имели более широкий температурный диапазон устойчивой работы. Этот пример наглядно показывает, насколько велико значение ИЭТ в деле разработки и конструирования новой техники РЭБ.

Разработка комплекса станций «Сирень» с использованием принципов унификации и наращивания возможностей аппаратуры позволила организо-

вать серийный выпуск такой техники в гораздо больших объемах без увеличения производственных площадей. Разработка этих новых станций помех, испытания, размещение их на объектах ВВС, принятие на вооружение и серийное их производство проводились в период с 1963 по 1974 год. Почти все боевые самолеты ВВС были оснащены станциями помех типа «Резеда» и «Сирень».

В конце 1960-х годов, в связи с военными конфликтами между Объединенной Арабской республикой и Израилем, остро встал вопрос о создании эффективных средств помех ЗРК «Хок». Эти системы были закуплены Израилем в США, они стали основным средством ПВО этой страны и показали высокую эффективность в борьбе с авиацией Египта. Египетские летчики, получая сигнал от бортовой станции самолета об облучении самолета РЛС «Хок», стремительно делали противозенитный маневр и уходили из зоны возможного действия системы «Хок». Многие же, просто зная пункты размещения ЗРК, избегали захода в эти зоны.

ЗРК «Хок» создавалась как устойчивая к помехам система. Режим излучения РЛС — непрерывный и весьма узкополосный — делал широкополосную шумовую помеху малоэффективной. Головка наведения ракеты ничего не излучала, так как была пассивного типа и сканировала только на прием отраженного от цели сигнала. Были приняты и меры другого характера.

Предложенный автором совместно с А.А. Зиничевым новый способ борьбы с ЗРК «Хок» (защищенный авторским свидетельством № 69587 с приоритетом от 18 августа 1970 года, получивший название «Способ создания помех из вынесенной точки») был реализован в станции «Смальта». Станция помех в виде специального ретранслятора сигналов РЛС «Хок», размещаемая на земле или вертолете, функционировала в удалении от РЛС, большем, чем дальность полета ракеты «Хок». На сигналы этого ретранслятора ракета совершала полет, в конце которого происходила ее самоликвидация, так как дальше ракета лететь не могла. Два типа постановщика таких помех были разработаны Калужским научно-исследовательским радиотехническим институтом (КНИРТИ). Наземный вариант станции «Смальта» (рис. 3.4.11) размещался в автофургоне типа ГАЗ. Вертолетный вариант станции «Смальта-В» размещался в вертолете МИ-8.

В приемных и передающих трактах наземной станции «Смальта-Н» были использованы такие же ЛБВ, как и в станции «Сирень-Д». Решающим вопросом в этой станции был уровень боковых лепестков приемной и передающей антенн. Специальными методами уровень боковых лепестков удалось понизить во много раз.

Эффективность создаваемого подавления РЛС «Хок» наземной станцией «Смальта» была опробована в октябре 1973 года при атаке сирийскими ВВС израильских войск в районе Голанских высот. Под прикрытием станции «Смальта» было совершено более 120 налетов сирийскими самолетами на позиции израильских частей. Эти позиции защищались американскими ЗРК «ХОК». За всю операцию был потерян только один самолет.

Развитие средств борьбы с авиацией шло не только по линии создания все более совершенных зенитных ракетных комплексов. На вооружении зарубежных средств ПВО появились ракетные системы, в которых наведение ракет осуществлялось тепловыми головками (ИК) и головками с лазерным



Рис. 3.4.11. Наземная станция «Смальта»

(оптическим) наведением. Одной из причин использования такого оружия послужило то, что авиация в целях снижения потерь от ЗУР стала широко использовать полеты на малых и предельно малых высотах. Возникла необходимость применять для защиты самолетов не только станции активных помех и дипольные отражатели, но и буксируемые ловушки и уводящие от самолета пиротехнические и оптические средства помех. На самолете появился уже целый комплекс средств обороны, которым нужно было управлять, не загружая такой задачей пилота. Это привело к разработке бортовых комплексов обороны (БКО), что требовало снижения веса и габаритов аппаратуры, входящей в состав БКО и, прежде всего, станций помех. Поскольку появились широкополосные пакетированные ЛБВ, интегральные схемы и СВЧ-транзисторы, то была разработана более совершенная станция помех «Герань». Она заменила в БКО станцию «Сирень», а весь диапазон перекрывала не тремя, а двумя литерами. Разработка станции велась на основе функционально-узлового метода проектирования с использованием плоских микромодулей, а также с применением микросхем малой степени интеграции, таких как 133 ЛАЗ, 133 ЛА6, операционных усилителей 140 УД1, 153 УД6, счетчиков 546 ИЕ 10. Базовые комплексы обороны были разработаны для фронтовой бомбардировочной авиации, дальней и военно-транспортной авиации. В состав аппаратуры БКО входило специализированное вычислительное устройство, управлявшее работой БКО, а также средства разведки и создания помех ИК- и оптического диапазонов и аппаратура создания пассивных помех в виде дипольных отражателей. Было создано семь типов БКО для разных самолетов.

Станция «Герань», помимо помех, создаваемых станцией «Сирень», могла создавать перенацеливающие помехи на облако дипольных отражателей или на подстилающую поверхность, а также мерцающие помехи при полете

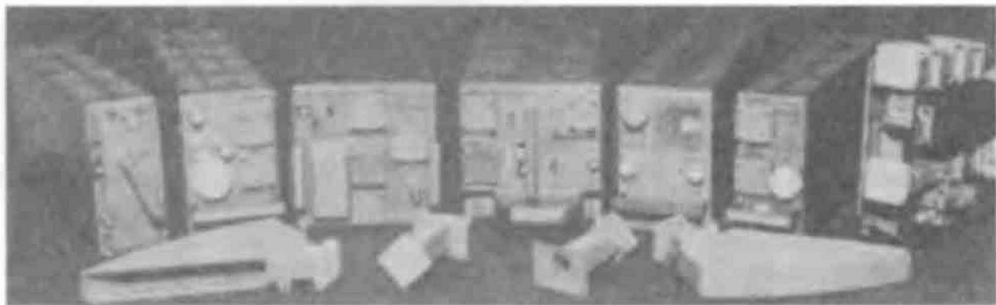


Рис. 3.4.12. Блоки станции «Гардения»

пары самолетов. Помехи такого вида необходимо было ввести в связи с тем, что для моноимпульсных РЛС, определяющих угловые координаты целей без сканирования, из одной точки пространства эффективных угловых помех создать не удавалось. В то же время, как выяснилось, головка самонаведения ракеты системы «Хок» не была моноимпульсной, а имела сканирующую антенну, но поскольку работала по отраженному от цели сигналу только на прием, то определить частоту для создания помехи не удавалось. По этой причине создавалась только уводящая по скорости скользящая помеха, эффективность которой была не велика.

Разработать способ определения частоты сканирования головки самонаведения ракеты «Хок» и создать эффективную помеху по угловым координатам удалось КНИРТИ в разработанной станции «Сорбция».

В конце 1980-х годов для замены станций «Сирень» и «Герань» была разработана более совершенная и более легкая станция ответного типа «Гардения-1 ФУЭ» (рис. 3.4.12). По видам создаваемых помех она мало отличалась от станции «Герань», однако благодаря использованию более совершенной элементной базы для создания усилителей СВЧ, транзисторов СВЧ, интегральных схем, современных технологий она стала легче, удобнее в размещении на объектах и надежнее в эксплуатации. Эта станция стала первой из числа созданных в ЦНИРТИ, лицензия на изготовление которой продана иностранному заказчику в составе самолета.

В этой станции были применены микросхемы средней и большой интеграции, такие как ОЗУ 537У9, 537 РУ13, ПЗУ М556РТ16, 541 РТ1, АЦП 1107 ПВ1, микропроцессор М1210 ВМ86 и другие микросхемы. Входные и предварительные СВЧ-усилители выполнены на твердотельных модулях, созданных в ЦНИРТИ.

В конце 1960-х годов при создании радиолокационных станций начали использоваться фазированные антенные решетки (ФАР). Это дало возможность существенно увеличить излучаемую мощность станций и позволило приступить к разработке локаторов для обнаружения таких мало отражающих целей, как головные части баллистических ракет, на расстояниях нескольких тысяч километров. Это требовалось для создания систем противоракетной обороны — ПРО. К созданию системы ПРО «Сейвгард» приступили США. Начались такие работы и в нашей стране. За счет применения ФАР возросла мощность и новых радиолокаторов для ПВО, что повышало



Рис. 3.4.13. Наземная станция ответных шумовых и многократных помех «Сапфир»

их помехоустойчивость, прежде всего, против активных помех. Складывалась ситуация, когда находящиеся на вооружении станции групповой защиты самолетов «Букет» уже не всегда могли обеспечить защиту из-за недостатка мощности создаваемых помех.

Казалось, что с применением ФАР в станциях активных помех появится возможность увеличить и мощность станций помех. Однако проведенные исследования показали, что использование в каждом канале решетки ФАР широкополосного усилителя типа ЛБВ не позволяет получить широкополосной ФАР. Нестабильность фазовых характеристик ЛБВ ограничивает диапазон работы такой решетки величиной 15–20%, что для широкополосных станций помех было неприемлемо. Для станций помех в филиале ЦНИРТИ были созданы многолучевые фазированные активные антенные решетки, обладавшие широкополосностью более одной октавы.

Не следует думать, что только станции помех для защиты авиации после 1960 года создавались как станции ответных помех. Для замены устаревших наземных станций СПБ-1, СПБ-5 в середине 1960-х годов были разработаны станции ответного типа «Сапфир» (рис. 3.4.13) и «Сапфир-2». Они были созданы на основе принципов построения макетного образца станции ответных помех «Север-1» и имели такие же режимы создаваемых помех. Станция «Сапфир» работала в 3-сантиметровом диапазоне, а «Сапфир-2» закрывала 2-сантиметровый диапазон. Мощные ЛБВ и направленные антенны обеспечивали высокий энергетический потенциал создаваемых помех, они работали в автоматическом режиме. Станции выпускались серийно.

Для защиты малоразмерных контрастных объектов типа мостов, переправ, скоплений техники и других, требующих прицеливания, был создан опытный образец станции «Огонек», на основе которого были разработаны и выпускались станции СПО-8 и СПО-10. Это станции ответного типа. Они были разработаны в НИИ-109 и выпускались серийно. Этим же институтом были созданы станции СПН-2, СПН-3, СПН-4, разработанные с использованием многолучевых антенных решеток. Они обеспечивают подавление самолетных радиолокаторов, предназначенных для обзора земной поверхности, бокового обзора и обеспечения полетов на малой высоте. Были созданы



станции помех для подрыва радиовзрывателей артиллерийских боеприпасов 1РЛ21 и 1РЛ29, а также комплекс мощных помех КМП-1 для подавления системы «Авакс» и станция помех системы «Хоккай» – «Тополь-Э».

Оценивая созданные почти за четыре десятилетия станции и системы активных помех, можно видеть, что творческая мысль разработчиков была в постоянном поиске новых технических путей и методов создания средств радиоэлектронной борьбы. К концу 1980-х годов, по существу, все то новое, что к этому времени имелось из изделий электронной техники для аппаратуры РЭБ, было востребовано. Для создания перспективной техники, более компактной и легкой, требовались широкополосные, компактные, достаточно мощные полупроводниковые усилители и генераторы СВЧ-диапазона. Приборы для таких устройств начали появляться. Это туннельные диоды, диоды Гана, лавинно-пролетные и биполярные диоды, а также полевые транзисторы. Но сами по себе эти приборы не решали задачи — требовались специальные СВЧ-устройства с использованием толстопленочной и тонкопленочной технологий монтажа для максимальной реализации возможностей новых приборов. Для этого требовалась разработка и создание компонентной базы специальной конструкции для устройств сверхвысокой частоты новых станций РЭБ — микросборок СВЧ. Для производства микросборок было необходимо специальное технологическое оборудование, однако приобрести его институтам и заводам радиопромышленности было невозможно, поскольку такое оборудование в тот период времени монопольно предназначалось только для предприятий электронной промышленности.

Институту с большими трудностями удалось построить специальный производственный корпус и оснастить его необходимым оборудованием для работы по созданию толстопленочных и тонкопленочных узлов СВЧ и с новыми интегральными схемами. Были разработаны широкополосные усилители мощности на базе новых полупроводниковых приборов в виде законченных модулей на диапазон частот 2-12 ГГц с выходными мощностями до 25 Вт. Для этого потребовались создание и освоение специфической технологии, методики и средства для измерения параметров нелинейных моделей транзисторов, методы синтеза согласующих цепей.

В совершенствовании радиотехнической аппаратуры радиопротиводействия значительную роль сыграли принципы ее построения на стандартных электронных модулях. Идея сборки создаваемых блоков аппаратуры из типовых узлов давно уже владела умами разработчиков. Многие предприятия решали эту задачу по-своему. В частности, в ЦНИРТИ были разработаны модули собственной конструкции. Это были так называемые плоские микромодули. Все они были одинаковой высоты и прямоугольной конструкции. На стандартную плату из стеклопласта или гетинакса наносилась схема соединений элементов из проводящих материалов, и по краям платы устанавливались проволочные штырьки со стандартным шагом установки. На плате методом простой пайки устанавливались миниатюрные навесные элементы, в том числе бескорпусные триоды и диоды. Собранный и проверенный схема помещалась в стандартный алюминиевый прямоугольный корпус и заливалась компаундом. Полученный таким путем плоский модуль размещался на стандартной печатной плате. Модули имели определенное функциональное назначение и выпускались требуемой номенклатуры. Модульный принцип

монтажа позволял в несколько раз увеличить его плотность и сократить количество навесных ИЭТ по сравнению с обычным навесным монтажом на печатные платы.

Развитие вычислительной техники, создание элементов и узлов, способных выполнять операции со скоростью многих миллионов операций в секунду, позволило по-новому решать задачу определения частоты и запоминания радиосигналов при создании станций помех для защиты самолета. Системы определения и запоминания частоты — СОВЧ во всех вышеназванных станциях представляли собой сложные и достаточно тяжелые конструкции. Появление устройств цифровой радиочастотной памяти позволяло существенно упростить разработку СОВЧ. Таким образом, к концу 1980-х годов появились условия для создания базовых цифровых станций активных помех, предназначенных для работы в составе комплекса радиоэлектронной борьбы — РЭБ.

Институт перешел к разработке единых цифровых систем, которые позволяли решать задачи обнаружения и анализа угрозы самолету, а также создания помех нескольким целям с временным и пространственным управлением имеющихся ресурсов противодействия. Все эти задачи предполагалось решать автоматически по определенным алгоритмам.

Была начата опытно-конструкторская работа «Анчар-42». В ходе работы должны были создать широкополосный фазовый пеленгатор, многоканальный высокочувствительный приемник, обеспечивающий прием сигналов с мгновенным определением пеленга, частоты, запоминанием и воспроизведением ее. Излучение помеховых сигналов на запомненных частотах с соответствующей модуляцией производилось с помощью передающего устройства в виде многолучевой активной антенны на полупроводниковых приборах.

В 1992 году была произведена успешная защита технического проекта, но продолжения работы не состоялось. Причина этого вполне очевидна. Именно в эти годы начался развал Советского Союза. Финансирование института сократилось в десять раз, как впрочем, и других оборонных предприятий. По этой причине было уже не до новых разработок. Финансирование заказывающих оборонную технику ведомств Министерства обороны также прекратилось. Не стало Министерства радиопромышленности, Министерства промышленности средств связи, Министерства электронной промышленности.

Ситуация с новыми разработками стала после 2002 года несколько улучшаться, однако все новое, что началось создаваться в области средств РЭБ, продается большей частью зарубежным заказчикам и не поступает на вооружение отечественных Вооруженных сил.

Работы по созданию средств самонаведения на радиолокационные станции

Во время Корейской войны (1951–1953 годы) американцы для защиты своей авиации от зенитного огня и истребителей Корейской народно-демократической республики активно применяли средства активных помех, размещенные на специальных самолетах. Однако отличить такой самолет от

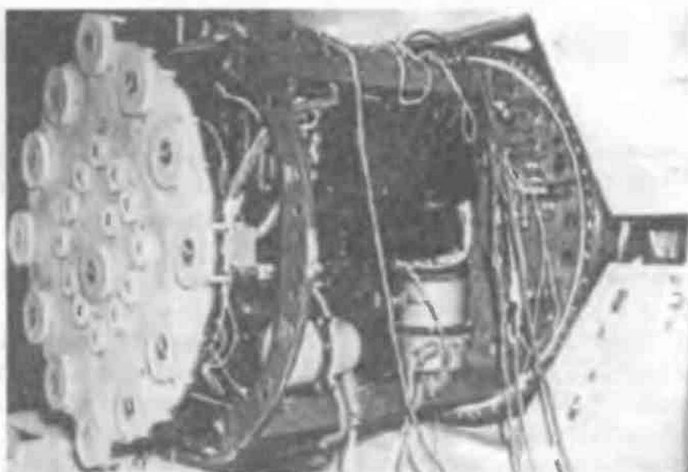


Рис. 3.4.14. Фазовый пеленгатор «Курс» для ракеты «Х-22П»

обычного бомбардировщика визуально почти невозможно, а сбивать такой самолет нужно в первую очередь. В связи с этим возникла идея вооружить самолет-истребитель специальным пеленгатором, определяющим самолет-помехоноситель. В институте был разработан специальный широкополосный пеленгатор, дающий возможность летчику по результатам пеленгации выходить на самолет-помехоноситель на дистанцию ведения обстрела. Созданная станция получила название «Встреча».

Оценив это новое направление, ВВС проявили интерес к такой технике и предложили создать специальную крылатую ракету, оснащенную высокоточным широкополосным фазовым пеленгатором для самонаведения ее на работающую РЛС и ее уничтожение.

Первой такой станцией, разработанной в институте и получившей название «Курс», была оснащена ракета «Х-22П» (рис. 3.4.14). Это была пассивная система пеленгации и самонаведения для новой скоростной ракеты класса «воздух-поверхность» «Х-22П» с дальностью пуска до 500 км, предназначенная для оснащения самолетов дальней авиации типа Ту-22Н.

Система «Курс» обеспечивала анализ радиолокационного поля по маршруту полета, его индикацию на электронно-лучевом дисплее, выбор целей (РЛС) противника, захват выбранной цели и точное наведение ракеты по азимуту и углу места для поражения и уничтожения РЛС.

Ракета подвешивалась под фюзеляжем самолета Ту-22. У летчика было устройство управления захвата ракетой выбранной РЛС и ее пуска. Система «Курс» работала в 10- и 20-сантиметровом диапазонах. Она давала возможность обнаружить и захватить для наведения на РЛС ракету на удалении до 450-500 км от нее.

Широкополосный фазовый пеленгатор этой станции точно пеленговал излучающий объект в свободном пространстве. Однако при установке его в носовую часть ракеты под диэлектрический обтекатель последний серьезно искажал фронт принимаемой волны, внося большие ошибки пеленгации. Потребовались серьезные теоретические изыскания для «просветления» об-

Рис. 3.4.15. Конечный этап полета ракеты, поражающей радиолокатор



текателя, который бы не искажал фазовый фронт принимаемых сигналов в диапазоне 10- и 20-сантиметровых волн.

Второй системой для управления полетом крылатой ракеты и наведения ее на излучение РЛС явилась станция «Плот». Она управляла полетом крылатой ракеты «КСР-5П», имевшей дальность полета до 300 км. Носителем ее был бомбардировщик Ту-16. Под крыльями подвешивалось две ракеты. На рис. 3.4.15 показан конечный этап полета ракеты, поражающей радиолокатор.

Достоинство созданных систем — большая дальность действия, что позволяло самолетам-носителям не заходить в зону ПВО объекта, который подлежал атаке. Кроме того, небольшая величина отражающей поверхности крылатых ракет заметно уменьшала дальность их обнаружения, а также то, что ракета, летящая на цель, не излучала никаких радиосигналов, что не позволяло ее обнаружить средствами радиотехнической разведки.

Систем с такой дальностью действия в США в те годы не было. Когда уже были созданы эти отечественные системы, то появилась информация о том, что над созданием таких систем начались работы в США. Известные системы такого рода «Шрайк» и «Харм» обладают дальностью не более 50–80 км.

Разработка неизлучающих (пассивных) систем самонаведения заложила основы создания систем такого рода и привлекла большое внимание командования ВВС. Для продолжения и развития таких работ было подключено ЦКБ «Автоматика» (ЦКБА), которое специализировалось на разработках пассивных радиолокационных головок самонаведения. Пассивные радиолокационные головки самонаведения предназначались для создания оружия, способного эффективно бороться с РЛС. В ЦКБА в 1960-х годах начались работы по созданию пассивной радиолокационной головки самонаведения ПРГС-28 (рис. 3.4.16) для противорадиолокационной ракеты Х-28.

При создании ракет такого класса для фронтовой авиации предъявлялись жесткие требования к массогабаритным характеристикам пассивных головок самонаведения и аналогичные требования к элементной базе. Очевидно, что электровакуумные лампы для этих целей не пригодны. Благодаря появлению достаточной номенклатуры полупроводниковых приборов, в том числе модулей и микромодулей, являющихся прототипами первых интегральных микросхем, но собранными на дискретных радиоэлементах, стало возможным создание первых пассивных головок самонаведения.

Хорошо видна мощная несущая металлическая «корзина», в которую вертикально вставлены блоки, также имеющие свою несущую металлическую основу. Такое конструктивное решение потребовалось для обеспечения надежной работы элементной базы ПРГС при механических нагрузках,

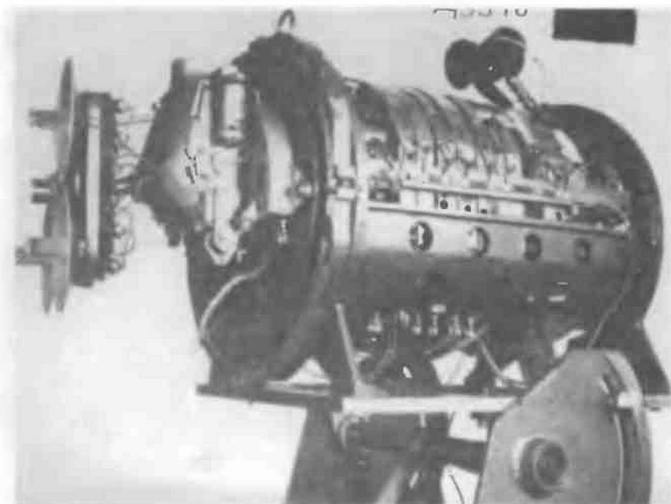


Рис. 3.4.16. Пассивная радиолокационная головка самонаведения ПРГС-28

возникающих при совместном полете под самолетом-носителем и в автономном полете ракеты.

Развитие ракетной техники для тактической авиации не стояло на месте. Комплексы ПВО в связи с появлением противорадиолокационного оружия совершенствовались, резко возросло количество РЛС, входящих в состав одного комплекса, но имеющих разное назначение. К началу 1970-х годов для ракет этого класса потребовались ПРГС с меньшими массогабаритными характеристиками, но с более высокими техническими характеристиками, способные наводить ракеты на наиболее опасные, выбранные летчиком для поражения РЛС.

Появление широкой номенклатуры аналоговых и цифровых интегральных микросхем 1-го поколения (операционные усилители, цифровые микросхемы логики «И» и «ИЛИ» и др.) положило начало развитию 2-го поколения ПРГС, которые имели, по сравнению с 1-м поколением, более высокую точность наведения ракет на РЛС, больший набор выполняемых функций: возможность получить целеуказание от аппаратуры самолета по направлению в вертикальной и горизонтальной плоскостях, несущей частоте излучения, периоду следования импульсов РЛС. Первыми головками самонаведения этого поколения стали разработанные ЦКБА ПРГС-58 для ракеты Х-58 (рис. 3.4.17).

Хорошо видны более выгодные, по сравнению с ПРГС-28, массогабаритные характеристики этих головок: более легкая несущая часть, уже не «корзина», а рама. Габариты и масса блоков также резко уменьшились.

Одновременно в этот же период времени была разработана, успешно прошла совместные испытания и передана в серийное производство ПРГС 9Н215 для оперативно-тактической ракеты 9М79-ФР класса «земля-земля». Ракета предназначалась для подавления радиолокационных систем в интересах сухопутных войск. Отличительной особенностью этой ПРГС являлось применение амплитудно-фазового метода пеленгации с широкополосным

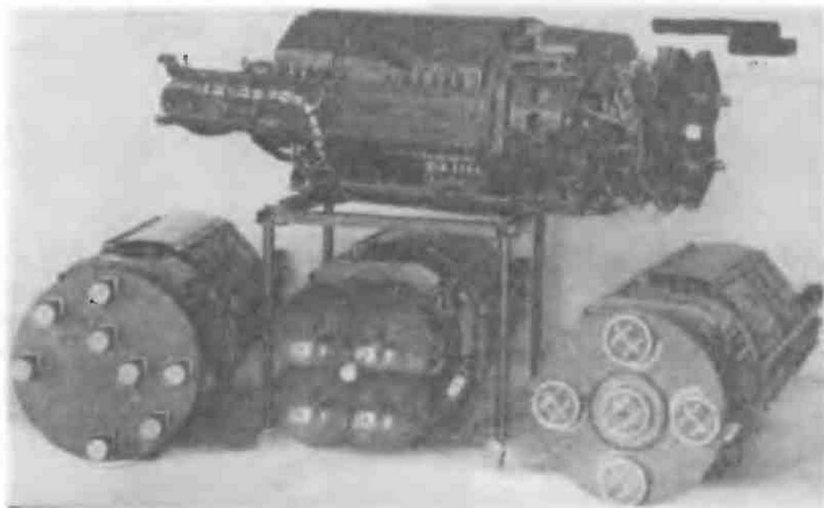


Рис. 3.4.17. ПРГС-58 (литеры «А», «В» и «С»)

приемником прямого усиления. На рис. 3.4.18 представлена головная часть ракеты в разрезе, в которой установлена пассивная головка самонаведения.

Ракеты Х-28 и Х-58 — довольно крупногабаритные летательные аппараты, что ограничивает боекомплект самолета-носителя. Поэтому в середине 1970-х годов начались работы по созданию более массовой и дешевой противорадиолокационной ракеты Х-25МП на базе тактической ракеты Х-25.

Облик аппаратуры непосредственно связан с уровнем развития радиоэлектронной промышленности в стране, с той элементной базой, которая имелаась на момент разработки изделия. Так, например, блоки изделия ПРГС-28 были разработаны на микромодулях, в состав которых входили дискретные элементы (транзисторы, конденсаторы, резисторы и другие элементы). В 1960-х годах разработанное изделие ПРГС-58 уже содержало первые отечественные интегральные микросхемы (операционные усилители, диодные сборки, логические микросхемы серий 106, 134 и др.). Разрабатываемые устройства управления, селекции и другие устройства были выполнены на этих элементах.

С развитием интегральной электроники уменьшались и габариты разрабатываемых изделий. Так, в ПРГС-2ВП были применены микросхемы более высокой степени интеграции (счетчики, коммутаторы и др.). В конце 1970-х годов были разработаны и внедрены в ПРГС микроЭВМ на базе микропроцессорного комплекта серии 585 с оригинальной системой команд. С появлением микроЭВМ расширились функциональные возможности аппаратуры, повысилась точность наведения. Эта микроЭВМ внедрена в изделие Л-150, где применяется до настоящего времени.

Во второй половине 1990-х годов начинают поступать современные вычислительные машины. Идет освоение новых технологий разработки электронных устройств, освоение импортной элементной базы. Впервые разрабатываются цифровой блок управления гиросtabilизатором, устройства обработки информации с применением импортной элементной базы. Габа-

риты этих изделий резко уменьшаются с применением программируемых логических интегральных схем.

В настоящее время разработки ведутся с применением современных программных пакетов, позволяющих моделировать разрабатываемые устройства.

Рост интеграции аналоговых и цифровых микросхем позволил создать для ракеты Х-25МП более легкую и с меньшими габаритами головку самонаведения ПРГС-2ВП (рис. 3.4.19), которая по своим характеристикам не уступала ПРГС-58. Разработка была успешно выполнена сотрудниками ЦКБА, и в конце 1970-х годов ракета Х-25МП была принята на вооружение ВВС. В конструкции отсутствуют несущие элементы изделия и почти всех блоков, за исключением блока питания, требующих установки управляющих элементов на радиаторы, и блока подвижной антенной системы, включающей в себя гиростабилизатор. ПРГС-2ВП, разработанная на этом этапе эволюции элементной базы, положила начало разработкам ПРГС 3-го поколения.

Компоновка ПРГС 3-го поколения и компонентная база строились на концепции, испытанной в изделии ПРГС-2ВП. В частности, узел соединения, электрически объединяющий все составные части, базировался на печатной плате, в которую монтировались разъемы, обеспечивающие соединения. Принципы построения приемно-пеленгационного устройства были сохранены. В системе наведения впервые для такого класса ракет использовалась инерциальная система, для обмена информацией с которой тоже впервые использовался цифровой интерфейс.

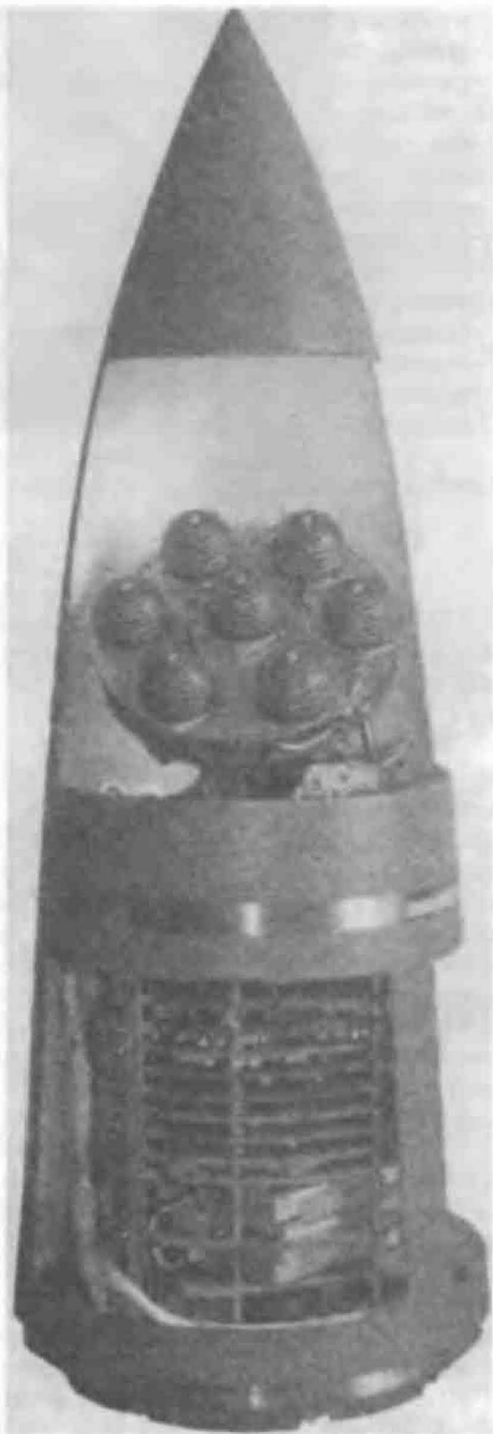


Рис. 3.4.18. Головная часть ракеты с головкой самонаведения

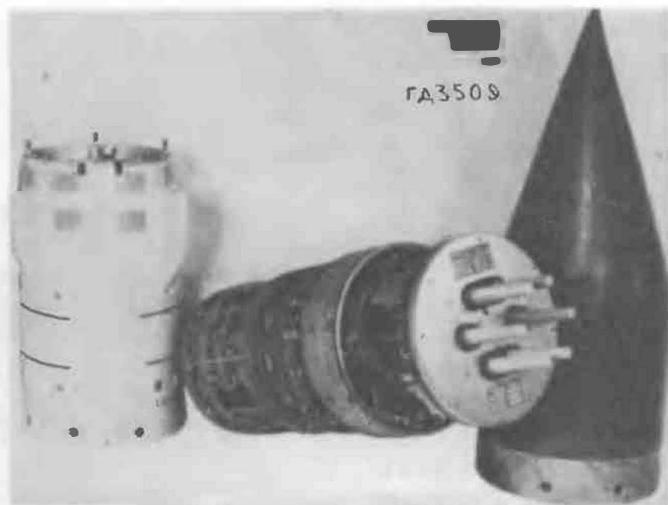


Рис. 3.4.19. Головка самонаведения ПРГС-2ВП

Основной недостаток ПРГС 1–3-го поколений — возможность работы только в относительно узких диапазонах несущих частот. В конце 1980-х годов перед ЦКБА была поставлена задача по созданию головки самонаведения, работающей в широком диапазоне несущих частот (ШПРГС).

В этот период обозначилась еще одна проблема — РЛС комплексов ПВО претерпели резкий качественный скачок по своим тактическим характеристикам: использование фазированных антенных решеток привело к резкому увеличению скорости сканирования пространства по гибкой логике управления диаграммой направленности антенн. Почти все РЛС стали отвечать концепции малозаметной РЛС, что выражается в использовании ими широкополосных сигналов, уменьшении на один-два порядка импульсной излучаемой мощности, в адаптации излучаемой мощности к текущим условиям, уменьшении на один-два порядка уровня боковых лепестков. РЛС наряду с этим стали оснащаться средствами обнаружения атакующих ракет, обеспечивающих выключение излучения при достижении противорадиолокационной ракеты критического рубежа. Также получила развитие техника отвлекающих устройств маскирующего типа.

Реализация требований, предъявляемых в этих условиях к головкам самонаведения, потребовала принципиально новых системных и схемотехнических решений, цифровой обработки сигналов и управления, зачастую сопряженных с серьезным техническим риском. В связи с этим по комплексу схемотехнических, конструктивных и технологических характеристик ШПРГС стала изделием следующего, 4-го, поколения головок самонаведения. Для реализации технических требований в эти изделия была заложена новейшая по тем временам элементная база, в развитии которой к концу 1980-х годов наметилось серьезное отставание от требований реального времени. В результате в перечень применяемых комплектующих элементов были включены элементы, находящиеся в завершающей стадии разработки или в стадии освоения в серийном производстве.

Тем не менее, ЦКБА разработало ШПРГС с необходимыми характеристиками. В ШПРГС применен многоканальный широкополосный супергетеродинный приемник с высокой и достаточно широкой полосой промежуточной частоты (ПЧ). Полученная информация обрабатывалась с помощью мощных вычислительных устройств, в результате чего формировались сигналы наведения противорадиолокационной ракеты на РЛС. В настоящее время высокими темпами развивается направление цифровой обработки радиосигналов, непрерывно растут на качественном уровне возможности цифровой элементной базы. Появились проработки нового 5-го поколения ПРГС (ШПРГС), приемный тракт которых состоит из антенной системы, узла смесителей, гетеродина и каналов ПЧ (с высоким значением промежуточной частоты). Усиленный до необходимого уровня радиосигнал оцифровывается и обрабатывается мощными вычислительными устройствами. Можно предположить, что в недалеком будущем появятся приемники информации (наверное, их так можно будет назвать), состоящие только из антенной системы, радиосигналы с выходов антенн после соответствующего усиления будут сразу поступать в устройства цифровой обработки.

Защита головных частей (ГЧ) баллистических ракет от средств противоракетной обороны (ПРО)

В 1960-х годах ракетная техника достигла такого совершенства, что баллистические ракеты, да еще оснащенные ядерными боеголовками, превратились в главное оружие XX века как для СССР, так и для США. Начались поиски средств борьбы с таким грозным оружием. Американцы развернули поиски в рамках работы «Сентинел», а потом приступили к созданию системы противоракетной обороны «Сейвгард». В СССР тоже начались поисковые работы по созданию системы противоракетной обороны.

Правительство СССР поставило перед институтом задачу создать для головных частей ракет такие средства защиты, чтобы заданное число головных частей ракет достигало намеченного объекта поражения, несмотря на наличие ПРО.

Для этого нужно было прежде всего уменьшить отражающую поверхность ГЧ.

Были созданы специальные пленочные поглощающие СВЧ-энергию материалы, которые могли монтироваться в теплозащитных покрытиях ГЧ. Из подобных материалов были разработаны специальные раскрываемые на внеатмосферном участке полета конструкции, которые во много раз уменьшали отражающую поверхность при нестабилизированном полете ГЧ. Поглощающие материалы успешно работали в широком диапазоне радиочастот.

Разработанные поглощающие покрытия уменьшали отражающие поверхности ГЧ (рис. 3.4.20) в несколько сот раз. Это сокращало дальность обнаружения ГЧ в несколько раз и ограничивало возможность запуска антиракет для перехвата ГЧ.

Поскольку значительная часть траектории полета ракеты проходит вне атмосферы, в рамках работы «Верба» были разработаны легкие ложные цели (рис. 3.4.21) с отражающей поверхностью, соизмеримой с защищенной поверхностью ГЧ или превосходящей ее. Легкие ложные цели представляют со-

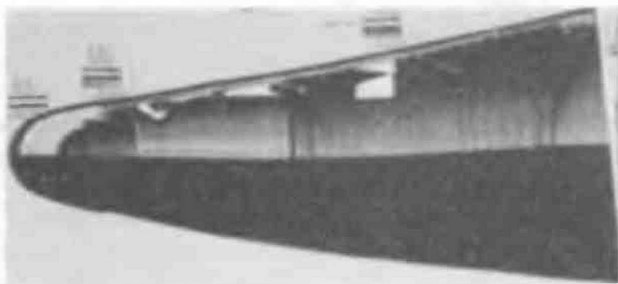


Рис. 3.4.20. Головная часть ракеты с поглощающими электромагнитную энергию слоями

бой диэлектрические конусообразные стержни, которые снабжены специальными отражателями из металлизированной пленки. В ходе полета ракеты ложные цели отстреливаются от ракеты, создавая отраженные сигналы, имитирующие ГЧ. Среди многих таких целей обнаружить ГЧ весьма сложно. Помимо этого, отсутствие атмосферы на высотах более 100–120 км позволило применить широко известные дипольные отражатели. Отстреливаемые на трассе полета такие отражатели создают области пространства, где невозможно обнаружить любые другие цели. Дипольные отражатели на больших высотах движутся с такой же скоростью, как и ГЧ и легкие ложные цели.

Отечественные разработчики противоракетной обороны при пусках испытательных ракет с вышеназванными средствами защиты не могли надежно выделить ГЧ среди ложных целей и дипольных отражателей. В связи с этим они обратили свои усилия на создание антиракет, которые бы могли поразить ГЧ на высотах, когда сопротивление воздуха затормозит ложные цели и дипольные отражатели и головная часть не будет защищена.

Чтобы лишить их такой возможности, были разработаны ложные цели, которые не только не отставали от ГЧ при вхождении в атмосферу, но при этом содержали пиротехнические составы, полностью повторявшие состав плазмы, которая образуется за ГЧ при вхождении ее в атмосферу. Это так



Рис. 3.4.21. Внешний вид ложной цели

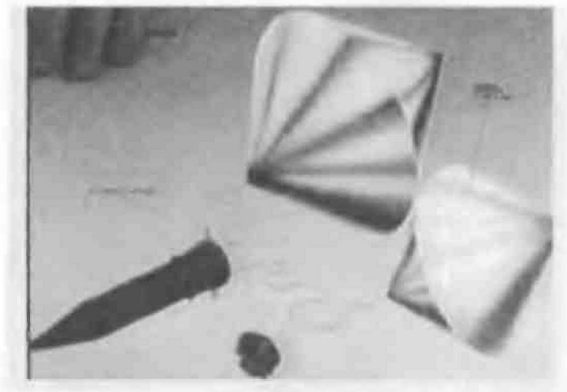


Рис. 3.4.22. Плазменная ложная цель (рисунок)

называемые плазменные ложные цели (ПЛЦ) (рис. 3.4.22). Они работоспособны до высот 50 км и задача поражения ГЧ делается и в этом случае неразрешимой!

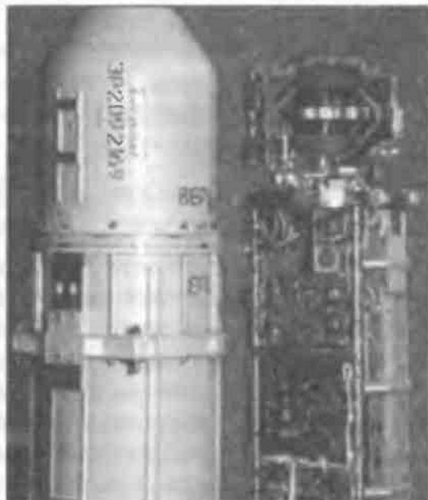
Чтобы гарантировано исключить возможность перехвата ГЧ антиракетными ПРО, в рамках работы «Крот» (рис. 3.4.23) были разработаны станции активных помех. Такие станции создавали мощные помехи шумового типа и следовали в составе боевого порядка по траектории полета защищаемой ракеты. Станция помех представляла собой стабилизированный в полете небольшой спутник. Он имел автономную систему стабилизации и электропитания. Антенна была направлена в сторону сигналов РЛС. Передатчик станции был выполнен на лампе обратной волны и по сигналам приемного устройства излучал частотно-модулируемую шумовую помеху. Для питания станции был разработан ампулизованный сухой литиевый аккумулятор.

Схема защиты головных частей от системы ПРО с помощью указанных выше средств КСП, приведена на рис. 3.4.24.

Проверка разработанных средств при пусках ракет показала высокую степень защиты головных частей от возможного наведения на них антиракет.

При существовавшем в 1970 годы уровне радиолокационных средств и вычислительной техники создать эффективную систему противоракетной обороны оказалось невозможно. К такому выводу пришли разработчики системы ПРО в СССР. Видимо, к такому же выводу пришли разработчики системы «Сейвгард» в США.

Рис. 3.4.23. Станция активных помех типа «Крот»



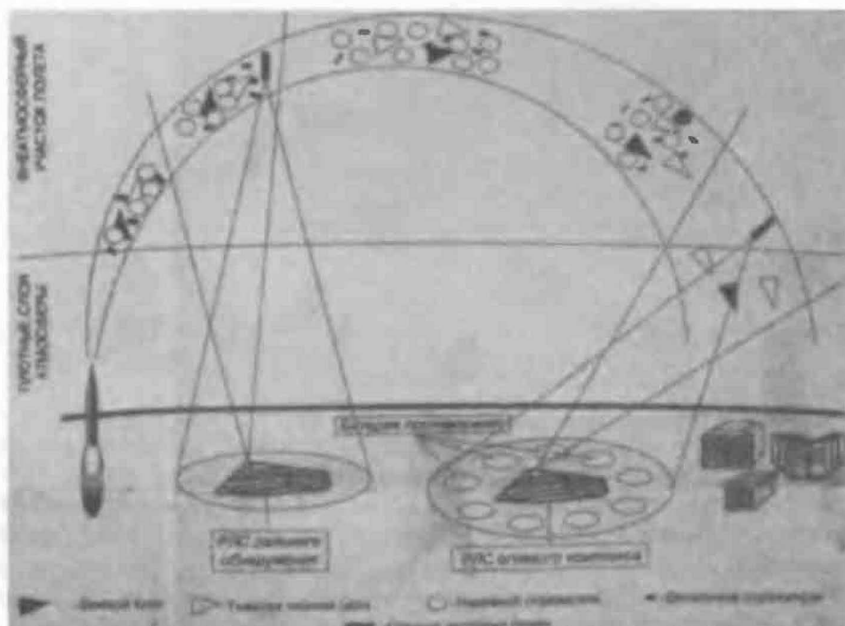


Рис. 3.4.24. Схема защиты головных частей от системы ПРО

Отечественные ракеты СС-20 (по американской терминологии — «САТАНА») имели до 10 головных частей и комплекс средств преодоления ПРО — КСП, что позволяет считать ракеты этого типа надежным средством преодоления не только существующих в мире противоракетных средств обороны, но и перспективных систем ПРО.

Руководство США и СССР заключили договор о неразвертывании систем ПРО, который действовал в течение 30 лет. В 2002 году США в одностороннем порядке вышли из этого договора и приступили к созданию системы ПРО. По имеющейся информации принципиально новых технических решений по созданию эффективных систем ПРО не появилось.

К началу 1970-х годов все отечественные баллистические ракеты, стоящие на боевом дежурстве, были оснащены комплексами средств преодоления противоракетной обороны — КСП.

Радиотехническая разведка в системе средств радиозлектронной борьбы

В СССР первые приемники (станции) радиотехнической разведки были разработаны в конце 1940—начале 1950 годов в ЦНИРТИ. Наземные станции такой разведки имели название «Пост».

В фокусе параболического зеркала, размер которого зависел от диапазона станции, был помещен рупор, нагруженный на полосовой фильтр с детекторной высокочастотной головкой. Приемники такого типа принято называть приемниками прямого усиления и чувствительность их не превышает величины 10^{-7} Вт. Сигнал усиливался видеоусилителем и принимался голов-

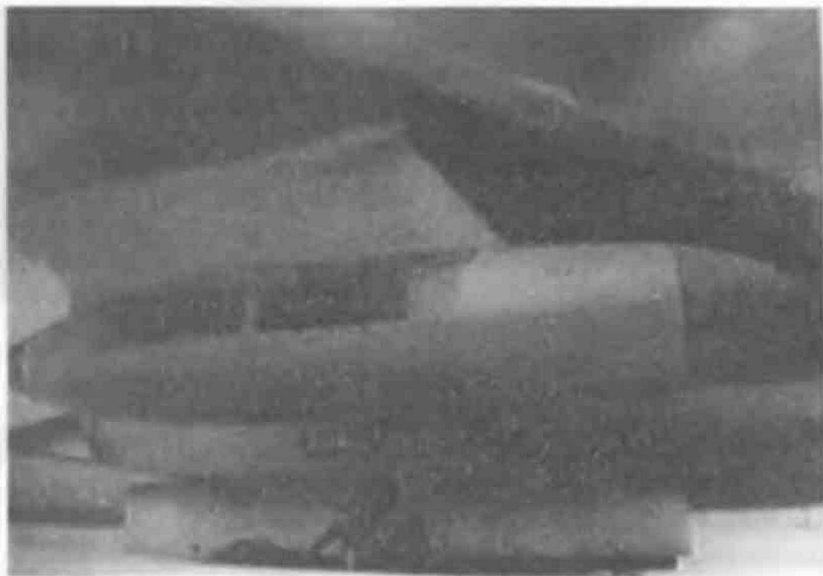


Рис. 3.4.25. Подвесной контейнер самолета со станцией «Ромб-1»

ными телефонами. Частота принимаемого сигнала определялась полосой работы фильтра. Можно было определять тональность сигнала, наличие модуляции, а вращением антенны по интенсивности сигнала — направление. Серия таких простейших приемников перекрывала весь известный в те годы диапазон частот.

В середине 1950-х годов была разработана наземная станция радиотехнической разведки «Пирамида». Она размещалась в автофургоне и по тому времени была вполне современной. Приемники супергетеродинного типа могли работать как в панорамном режиме, так и перестраиваться вручную для определения частоты и параметров принимаемого сигнала. Перестраиваемые гетеродины были выполнены на металлокерамических триодах и отражательных клистронах. Станция позволяла достаточно точно определять частоту РЛС и все основные параметры излучения. Информация воспроизводилась осциллографическими индикаторами. Разведка могла вестись в 3-, 10- и 20-сантиметровом диапазонах, а также в метровом диапазоне. Станция выпускалась серийно и состояла на вооружении.

Первой самолетной станцией радиотехнической разведки была станция «Ромб». В отличие от приемников наведения по частоте в первых станциях прицельных помех, о чем говорилось ранее, это была специальная станция радиотехнической разведки. Станция работала в диапазонах, аналогичных «Пирамиде», но работала она полностью автоматически и вся развединформация регистрировалась и записывалась магнитофонами. Приемники станции были приемниками прямого усиления. На рис. 3.4.25 показан подвесной контейнер самолета, на котором была размещена станция «Ромб-1».

Информация таких станций была необходима для выявления диапазонов частот зарубежных РЛС, определения основных параметров и режимов их



Рис. 3.4.26. Блоки аппаратуры станции «Куст-12»

работы. Данные разведки были использованы при создании станций заградительных помех метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Необходимо, однако, подчеркнуть, что в станциях прицельных шумовых помех, создававшихся до 1960 года, приемники радиотехнической разведки являлись необходимой частью станции, так как наведение генератора помехи по частоте без них невозможно. Кроме того, следует учесть, что все такие станции помех для выполнения своих задач требовали специально подготовленных операторов.

После проведения научно-исследовательских работ «Север» и «Север-1», заложивших основные принципы и технические пути создания станций ответных помех, с 1960 года почти все станции помех разрабатывались на этих принципах как автоматически работающие системы. Для них не требовался специальный приемник разведки, так же как и специальный оператор. Тем не менее, поскольку станции помех конструируются в виде литеров, перекрывающих определенный диапазон, то для их правильного применения необходимо располагать данными о диапазонах частот радиотехнических систем, которым должно создаваться противодействие.

С началом космической эры, после запуска в 1967 году первого искусственного спутника Земли, для радиотехнической разведки открылись новые горизонты. Ведь спутник пролетал почти над всеми материками и океанами Земли.

Установив на спутнике аппаратуру приема радиотехнических сигналов, можно вести разведку всех радиотехнических систем мира. В ходе проведения исследований в работе «Куст-Р» были обоснованы требования к аппаратуре разведки, рассмотрены вопросы пеленгации сигналов РЛС из космоса, пути и способы доставки развединформации на Землю, вопросы управления работой аппаратуры, программирования задач, обработки информации на борту спутника и способы представления ее заказчику и многие другие. Однако необходима была практическая проверка возможности ведения космической разведки, ведь никакого опыта создания и работы таких средств еще не было.

Для создаваемого спутника «Зенит» институтом была разработана станция «Куст-12» (рис. 3.4.26) с целью проверки возможностей и особенностей приема из космоса. Это был 12-канальный приемник прямого усиления. Принятые сигналы после их обработки на борту записывались специальным магнитофоном. Записанные кассеты сбрасывались на землю в спускаемом аппарате. Привязка информации к месту приема определялась по времени

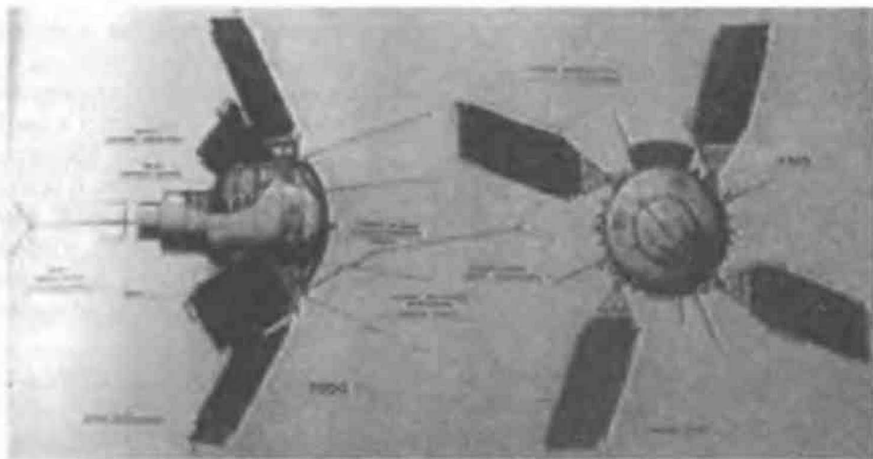


Рис. 3.4.27. Спутник «Целина-О» (рисунок)

нахождения спутника над конкретным районом Земли. Проведенные эксперименты показали устойчивый прием сигналов наземных радиолокаторов в различных точках Земли. Однако диапазон частот разведки был достаточно ограничен.

Учитывая первые положительные результаты, показавшие возможность ведения радиотехнической разведки из космоса, было решено продолжить создание аппаратуры в более широком диапазоне частот. Для этого была разработана станция радиотехнической разведки «Куст-40». Эта станция имела уже 40 приемных каналов прямого усиления, в ней был предусмотрен специальный вычислительный комплекс для обработки и уплотнения полезной информации. Сброс информации производился уже по радиоканалу. Однако, как и «Куст-12», определять место установки радиолокационных систем на Земле она не могла.

Обобщив опыт разработки станций «Куст-12» и «Куст-40», институт приступил к созданию системы космической глобальной радиотехнической разведки «Целина». В работе участвовало более 140 предприятий. Головным разработчиком разведывательного комплекса был ЦНИРТИ, а ракетно-космический комплекс создавался под руководством ОКБ М.К. Янгеля. В состав системы «Целина» входило два комплекса радиотехнической разведки: «Целина-О» и «Целина-Д».

Спутник системы «Целина-О» (рис. 3.4.27) имел приемную аппаратуру разведки супергетеродинного типа во всех диапазонах возможной работы радиотехнических средств, осуществлял анализ и запоминание принятых излучений и полученную информацию через станцию «Трал» сбрасывал на наземную станцию приема. Эта станция размещалась в глубине страны, в месте, недоступном для иностранных технических разведок.

Принятая информация после обработки ее специальным вычислительным комплексом кодировалась и передавалась в Московский центр управления системой. Здесь она анализировалась и приводилась к виду, удобному для практического использования. За сутки такая информация обновлялась неоднократно и практически была оперативной. На этом спутнике не было радио-

технических средств определения местоположения источников излучений. Район их приближенно определялся, как и в аппаратуре «Куст-40», по сопоставлению координат спутника по времени со временем приема информации.

Спутник «Целина-О» не имел системы стабилизации и работал в свободном полете. Система «Целина-О» имела две задачи. Во-первых, убедиться в наличии излучающих средств по всем континентам и определить с большой точностью диапазоны их работы. Во-вторых, добиться устойчивой работы системы, включая наземные пункты связи, управления, приема информации, ее обработки и поступления в центр управления. После выполнения этих задач дальнейшая роль этой системы зависела от функционирования системы «Целина-Д».

Для спутника системы «Целина-Д», поскольку он на орбите имел стабилизацию положения, институтом был разработан широкополосный супергетеродинный многобазовый фазовый пеленгатор. Помимо обычной разведывательной радиотехнической информации он определял точное направление на принимаемые сигналы в двух перпендикулярных плоскостях. Это позволяло определять координаты источника излучений с высокой точностью. В зависимости от диапазона частот ошибка составляла не более одного-двух километров. Частотный диапазон практически не отличался от диапазона разведки «Целина-О». В состав бортовой аппаратуры входила станция радиотехнической разведки, включающая систему пеленгации принятых сигналов «Корвет», вычислительный комплекс для обработки информации.



Рис. 3.4.28. Наземная станция приема информации со спутников



Информация через «Трал» передавалась на пункт приема и управления полетом спутника, а после обработки наземным вычислительным комплексом — в Московский центр через спутник-ретранслятор, где проводилась работа по отображению и анализу полученных данных разведки. Практически каждые два часа определялась радиотехническая обстановка на всем земном шаре. На орбиту спутник выводился ракетным комплексом 8К65.

Еще во время первых испытаний комплекса «Целина-Д» нами было зафиксировано перемещение американского авианосца «Генерал Арнольд» из США в Европу. Во время перехода на авианосце работал радиолокатор и по определению координат со спутника был проложен четкий курс его перемещения через Атлантический океан до порта назначения. Этот эпизод сыграл определенную положительную роль в разработке филиалом института аппаратуры космической радиотехнической разведки и целеуказания для задач Военно-морского флота. Это была аппаратура «Кортик» для спутника УС-П, комплекс средств для которого создавало объединение «Комета». Дело в том, что некоторые руководители штаба ВМФ считали, что в походах корабли не должны пользоваться радиолокаторами. На деле оказалось не так. Даже сейчас, когда спутниковая система «Навстар» позволяет определять точные координаты корабля в акватории, без оценки с помощью РЛС окружающей обстановки суда обходиться не могут. Аппаратура «Кортик» создавалась с учетом опыта создания разведывательной и пеленгующей аппаратуры «Целина-Д». На рис 3.4.28 представлена наземная станция приема информации со спутников. В конце 1980-х и начале 1990-х годов «Целина-Д» подверглась модернизации и под наименованием «Целина-2» продолжает функционировать.

Средства радиоэлектронной борьбы, созданные в КНИРТИ

Этапы развития авиационных средств радиоэлектронной борьбы

Можно выделить примерно четыре основных этапа, в течение которых существенно изменялись структура и алгоритмы как РЛС, так и авиационных средств РЭБ.

Первый этап. Периоду 1950-х годов соответствуют наземные некогерентные РЛС с быстрой перестройкой несущей частоты и устройствами защиты от помех, построенными по схеме череспериодной компенсации (ЧПК).

Второй этап. В 1960 годы и в первой половине 1970-х годов появляются импульсно-когерентные РЛС, осуществляющие фильтрацию пассивных помех и позволяющие обнаруживать низколетящие летательные аппараты на фоне отражений от земной поверхности. Защита от активных помех в них обеспечивается увеличением примерно на порядок удельного энергетического потенциала. Появляются первые РЛС с быстрой перестройкой несущей частоты. В это время разрабатываются бортовые вертолетные станции активных помех (САП) типа «Смальта-В», «Смальта-ВМ», базовый приемопередатчик для самолетной аппаратуры РЭП «Клен» и комплекс аппаратуры

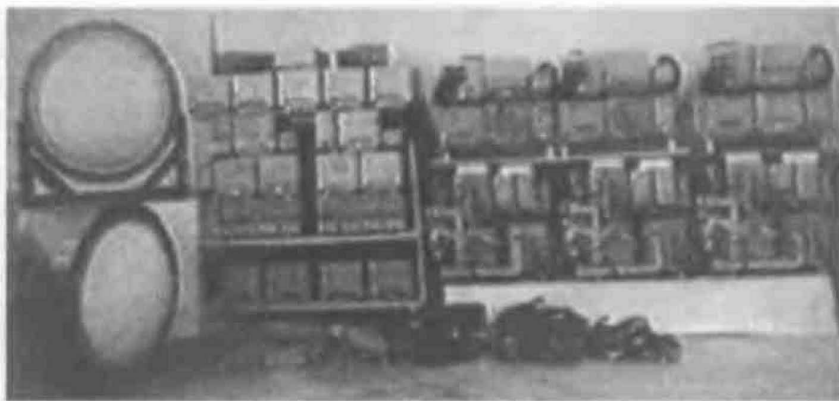


Рис. 3.4.29. Блочный состав аппаратуры станции «Рычаг»

радиотехнической разведки. В аппаратуре РЭП применяются гетеродинные устройства на электровакуумных приборах СВЧ, в том числе с электромеханической перестройкой частоты, печатные антенны, разрабатываются малоэлементные фазированные антенные решетки. Используются элементы цифровой обработки.

Третий этап. Во второй половине 1970-х и начале 1980-х годов появляются РЛС, работающие в двух режимах: импульсно-когерентном с узкополосными сигналами и с широкополосными сигналами, имеющими большую базу. Увеличение базы позволяет соответственно увеличить энергетический потенциал РЛС. Применение двух режимов затрудняет возможность постановки эффективных как активных, так и пассивных помех. В узкополосном режиме ослабляется воздействие широкополосных шумовых помех и значительно подавляется эффект пассивных помех; а широкополосный режим, в сочетании с быстрой перестройкой частоты от импульса к импульсу, позволяет значительно снижать эффективность немобильных узкополосных помех. Соответственно появляется необходимость очередной модификации средств и способов РЭБ.

В это время разрабатываются вертолетные САП типа «Смальта», САП для самолета Су-27 — «Сорбция-С». В аппаратуре РЭП широко используются твердотельные активные СВЧ-устройства в гибридном исполнении. Различные типы печатных линий передачи СВЧ-колебаний, в том числе микрополосковые СВЧ-линии. В КНИРТИ разрабатываются также многоканальные ФАР с электронным сканированием. В институте были изобретены и разработаны многолучевые активные антенны — МЛАА, в которых диапазонность решеток ограничивалась только полосой пропускания усилителей, устанавливаемых в каждом канале решетки. Нестабильность фазовых характеристик ЛБВ в каждом канале решетки, так же как и усилителей СВЧ на транзисторах, уже не оказывала заметного влияния. Полоса пропускания в одну октаву была вполне достижима.

Именно антенны типа МЛАА позволили создать мощную станцию групповой защиты «Рычаг» (рис. 3.4.29). Она перекрывала весь требуемый 10-сантиметровый диапазон и создавала все известные к тому времени виды



ответных помех, включая шумовую помеху. Станция создавалась кооперацией нескольких институтов и КБ.

Конструкции выполнены преимущественно на основе функциональных блоков базовых конструкций. Для всей аппаратуры характерна развитая цифровая обработка, преимущественно на основе аппаратной логики с использованием ИС низкого и среднего уровня интеграции. Применение новых схемотехнических решений, изделий электронной техники, технологии монтажа позволило создать аппаратуру с большими функциональными возможностями и с улучшенными массогабаритными характеристиками.

Четвертый этап — с 1980 года и до настоящего времени. Наряду с появлением систем высокоточного оружия (ВТО) отмечен применением РЛС с фазированными антенными решетками, адаптирующимися к помеховой обстановке, частичным переходом к многопозиционным схемам обработки сигналов. В различных странах проводится ряд НИР по повышению скрытности излучений РЛС путем перехода к сверхширокополосным шумоподобным сигналам (ШПС), радиоэлектронная борьба с которыми станет одной из составляющих пятого этапа РЭБ.

Одновременно разрабатываются средства РЭБ 4-го поколения. Характерной чертой этой аппаратуры, к типичным представителям которой можно отнести американскую САП AN/ALQ-165 и отечественный комплекс средств РЭП «Хибины», явилось использование цифрового синтеза помеховых сигналов из запоненных цифровых копий зондирующих сигналов подавляемых РЛС (впервые реализованного несколько ранее в САП истребителей Су-27 — «Сорбция-С»).

Наличие цифрового управления синтезом помеховых сигналов в аппаратуре активных помех позволило значительно увеличить количество реализуемых способов РЭБ и поднять результирующую эффективность РЭП при противодействии РЛС всех типов. При реализации цифровых методов управления применялись полупроводниковые аналого-цифровые и цифро-аналоговые микросхемы. Как видим, произошедшее в последние 15 лет развитие бортовых средств РЭП, связанное в первую очередь с достижениями в разработке ИЭТ, внедрением цифровых методов формирования помеховых сигналов, позволило, с одной стороны, резко увеличить возможности аппаратуры по реализации описанных в работах способов РЭБ, с другой стороны, значительно сократить их требуемую номенклатуру.

Современное состояние и перспективы развития техники РЭБ

Как было отмечено выше, в процессе развития методологии РЭБ, значительно менялся и подход к разработке самой техники РЭБ. В 1980-х годах большинство разработчиков и заказчиков в своих концептуальных подходах основывались на опыте создания техники РЭП в предыдущие периоды (1950–1970 годы). Основным показателем эффективности РЭП для таких САП служила величина дальности подавления. Эффективность САП была тем выше, чем на меньших дальностях обеспечивалось подавление различных РЛС. Тенденция достижения минимальных значений дальности подав-

ления на долгие годы определила доминирующий интенсивный путь развития техники РЭП.

Внедрение в САП цифровых методов обработки принимаемых сигналов и особенно формирования помех из запомненных цифровых копий зондирующих сигналов, подавляемых РЛС, в 1980-е годы дало дополнительные возможности по увеличению степени коррелированности помехи с сигналом, концентрации мощности помех в полосе частот, согласованной с полосой пропускания подавляемой РЛС. Основным способом РЭП при этом считалось создание ответных помех (имитационных, имитационно-шумовых, маскирующих или уведящих — в зависимости от режима работы РЛС) по главному лепестку ДНА облучающей РЛС. Вместе с тем, появление на вооружении зарубежных стран радиолокационных систем (РЛС ЗРК, БРЛС, РГС управляемых ракет) с моноимпульсными методами пеленгации, с возможностью пеленгации цели по излучению бортового источника активных помех требовали дальнейшего развития способов РЭП из вынесенной точки пространства. К таким способам РЭП, как было указано выше, относятся:

- создание мерцающих помех с бортов нескольких самолетов;
- создание помех подсвета подстилающей поверхности (низковысотный антипод);
- создание помех подсвета облаков дипольных отражателей.

Одной из наиболее оригинальных и перспективных разработок 1980-х годов явилась САП самолета Су-27 «Сорбция-С». Как уже отмечалось, в САП «Сорбция-С» впервые была использована цифровая память для формирования высокоприцельных помеховых сигналов. Кроме того, чрезвычайно выгодным по конструктивно-техническим параметрам аппаратуры оказался выбранный тип размещения САП — в контейнерах на законцовках крыльев самолета, что позволило реализовать режим независимого приема излучения радиосигналов (рис. 3.4.30).

На сегодняшний день частично модифицированная САП «Сорбция-С» является по-прежнему одним из эффективных средств РЭП отечественных ВВС. В частности, САП «Сорбция-С» позволяет обеспечивать высокую боевую готовность всего семейства самолетов типа Су-27 (включая Су-30, Су-33, Су-35, Су-37).

Удачная совокупность общей структуры станции и технических характеристик отдельных ее компонент позволили САП «Сорбция-С»:

- подавлять бортовые РЛС самолетов, РЛС управления оружием ракетных и артиллерийских зенитных комплексов, радиолокационных головок самонаведения управляемых ракет класса «воздух-воздух» и «поверхность-воздух»;
- работать в автономном автоматическом режиме с возможностью подавлять несколько опасных радиоэлектронных средств противника в переднюю и заднюю полусферы одновременно;
- одновременно принимать с высокой чувствительностью радиосигналы и излучать мощные радиопомехи.

Во многом реализация таких уникальных возможностей обеспечивается применением многолучевых приемных и передающих антенн, а также раз-



Рис. 3.4.30. Самолет Су-27 с контейнерами САП «Сорбция-С» на законцовках крыла

мещением аппаратуры станции «Сорбция-С» в двух приемопередающих контейнерах на законцовках крыла.

Высокая чувствительность приемной аппаратуры и высокая мощность излучения активных помех станции «Сорбция-С» позволяют:

- обнаруживать излучение угрожающих РЛС и подавлять их помехами еще до взятия ими самолета на сопровождение, своевременно препятствуя последнему;
- обеспечивать эскортную защиту группы самолетов, не оснащенных станциями активных помех.

В последующих разработках отечественных предприятий создавались комплексы средств РЭП самолетов поколения 4+, включающие в свой состав, в том числе, средства разведки и противодействия оптического диапазона длин волн. При этом максимальное внимание было сосредоточено на повышении «интеллектуальных» возможностей аппаратуры РТР и РЭП и расширении диапазона их рабочих частот. В процессе выполнения этих работ осуществлялось также проведение НИР по наиболее перспективным направлениям создания средств радио- и оптоэлектронного противодействия. Так был создан новый вид сверхширокополосных антенных решеток, обеспечивающих относительную стабильность диаграмм направленности за счет сильных электромагнитных связей между отдельными элементами решетки.

Тесное взаимодействие с предприятиями электронной промышленности в части разработки сверхширокополосной интегрированной элементной базы позволило создать действительно малогабаритные СВЧ-модули, снизив их массогабариты за последние 15 лет ориентировочно в 4–6 раз.

К основным техническим решениям в этом направлении можно отнести разработку:

- широкополосных бескорпусных усилителей с увеличенным перекрытием по диапазону частот;
- монолитных однокристалльных на GaAs многофункциональных СВЧ-приборов, например, выполняющих одновременно функции усиления, выключения и регулировки мощности, а при необходимости и преобразования частоты;
- миниатюрных квазимонолитных высокостабильных диэлектрических резонаторов (ДР) генераторов СВЧ;
- высоконадежных керамических СВЧ конденсаторов, заменяющих МОП и МПД конденсаторы, применяемые ранее;
- диэлектрических подложек с высокой диэлектрической проницаемостью и высокой температурной стабильностью, позволяющих проектировать на них пассивные СВЧ-приборы, в том числе фильтры, которые не реализуются по монолитной технологии, но имеют габариты и массу, сравнимые с монолитными приборами;
- технических процессов и методов проектирования фильтров, линий задержек и других устройств на поверхностных акустических волнах, позволяющих получать рекордные характеристики по габаритам, потерям, избирательности;
- новых конструкций и технологических процессов с максимальным использованием возможности перечисленных элементов, что позволяет проектировать многофункциональные герметичные, функционально законченные модули. При монтаже таких сложных модулей используются техпроцессы, применяющиеся в электронной промышленности для изготовления микросхем, что резко повышает надежность аппаратуры в целом;
- новых конструкций многофункциональных матричных быстродействующих коммутирующих устройств СВЧ, которые позволяют существенно увеличить пропускную способность радиотехнических систем.

В этом поколении средств, кроме перечисленных изделий, широко применялись микросхемы средней и большой степени интеграции.

Таким образом, ныне разрабатываемое поколение аппаратуры РЭП характеризуется:

- повышенной интеллектуальностью;
- существенно меньшими массой и габаритами (в 4-6 раз);
- меньшей трудоемкостью изготовления и стоимостью;
- повышенной надежностью;
- модульностью построения;
- функциональной интеграцией с другими подсистемами БРЭО.

Другим основным направлением усилий специалистов в области РЭП во всех странах на сегодняшний день является модернизация бортового оборудования самолетов строя, в первую очередь, в части модернизации аппаратуры обработки радиотехнической информации за счет перевода многих процессов обработки из аналоговой области в цифровую. Так, в США большое внимание уделяется модернизации именно средств РЭБ. Прошедшая

модернизацию бортовой аппаратуры РЭБ, как правило, имеет прежнее обозначение, но с цифровым индексом в скобках. Модернизация включает в себя усовершенствование отдельных элементов и узлов аппаратуры, обновление средств обработки данных. В состав аппаратуры вводятся блоки автоматического управления ресурсами подавления, цифровая память радиочастот и ряд других достижений в области РЭБ.

На предприятии разработаны контейнерные станции активных помех, предназначенные для повышения боевой живучести самолетов типа Су-20, Су-22, Су-25, Су-24, МиГ-21, МиГ-23, МиГ-25, МиГ-27, МиГ-29, которые не имеют средств РЭП или оснащены устаревшими, которые не могут эффективно противодействовать современным комплексам ПВО.

Оснащение указанными контейнерными станциями помех индивидуальной защиты позволит снизить потери самолетов в 2,5-3 раза. Для защиты группы самолетов, не имеющих самозащиты, используются контейнерные станции помех групповой защиты (эскорта), размещаемые на одном или нескольких самолетах группы.

Так как разработанные контейнеры подвешиваются на стандартную точку внешней подвески, то оборудование самолетов контейнерными станциями помех проводится непосредственно на месте базирования. Указанные контейнерные станции помех работают в автономном автоматическом режиме и обеспечивают одновременное подавление нескольких, наиболее опасных РЭС.

Высокая эффективность контейнерных станций помех достигается за счет следующих факторов:

- широкого частотного диапазона, перекрывающего большинство радиолокационных средств управления оружием за счет применения широкополосных твердотельных устройств,
- большой мощности активных радиопомех за счет многолучевых активных решеток — АФАР;
- высокой прицельности создания помех и возможности создания интеллектуальных имитационных помех, неотличимых от «своих» сигналов в подавляемых РЛС, за счет цифровой обработки сигналов и современного математического обеспечения, позволяющих осуществлять анализ текущей тактической обстановки и производить выбор оптимального вида помех.

На предприятии продолжают создаваться и совершенствоваться вертолетные постановщики активных помех, эффективность которых в первую очередь достигается существенно большей энергетикой излучаемых помеховых сигналов. В качестве примера на рис. 3.4.31 изображен вертолет — постановщик помех Ми-17ПГЭ, предназначенный для групповой защиты летательных аппаратов и наземных объектов от средств воздушного нападения и ПВО противника путем подавления мощными радиопомехами радиоэлектронных средств (РЭС) противника из зон барражирования вертолета (вне досягаемости ракет).

Вертолет Ми-17ПГЭ (рис. 3.4.32) обеспечивает ведение радиотехнической разведки и одновременно радиоподавление нескольких РЭС различного назначения, в том числе:



Рис. 3.4.31. Вертолет — постановщик помех Ми-17ПГЭ

- самолетных бортовых РЛС;
- РЛС управления зенитно-ракетных комплексов;
- радиолокационных головок самонаведения ракет (класса «поверхность-воздух», «воздух-воздух»).

Для иллюстрации необходимых затрат вычислительных мощностей достаточно обратить внимание на задачи обработки входного потока данных в аппаратуре РТР, получаемого на выходе первичных измерителей радиотехнических параметров сигналов. Как следует из проработок американских специалистов (в рамках программы JSF), величина этого потока в среднена-



Рис. 3.4.32. Вертолет, оснащенный станцией активных помех, с мощной твердотельной АФАР

сыщенных районах боевых действий (при участии авиации) может достигать 1 Гбит/с. Однако для современной (и тем более перспективной) аппаратуры РТР такая величина информационных потоков не является предельно высокой. Одним из направлений дальнейшего развития аппаратуры РТР является переход на непосредственно цифровую обработку радиосигналов, позволяющий более чем на порядок повысить точность измерений как радиотехнических характеристик принимаемых сигналов, так и координат источников излучений, с соответствующим дальнейшим повышением требований к аппаратуре обработки радиотехнической информации. Для реализации специализированных вычислителей необходимо создание более широкополосных и более быстродействующих микросхем типа DRFM.

Таким образом, современная аппаратура РЭП и решаемые с ее помощью задачи защиты выходят на одно из первых мест в комплексах бортового оборудования самолетов по требованиям к вычислительным ресурсам. Впрочем, последнее становится достаточно очевидным, если принять во внимание, что каждый бортовой комплекс средств РЭП осуществляет радиотехническую разведку с определением режимов работы, координат и степени опасности всех наблюдаемых источников излучений, каждый из которых является сложной системой со своей «манерой поведения».

Опыт показывает, что создание современной сложной радиотехнической системы просто невозможно без детального математического моделирования функционирования этой системы в условиях, максимально приближенных к ожидаемым. Аналогичные мысли выражают специалисты многих фирм, в частности, как утверждают представители фирмы Lockheed, создание современного сложного комплекса бортового оборудования самолета F-22 (с интегрированной аппаратурой РЭП) было бы невозможно выполнить без детального математического моделирования функционирования БРЭО на всех этапах его разработки.

В настоящее время объем работ по математическому моделированию средств РЭП составляет еще незначительную (менее 20%) долю общей трудоемкости разработки аппаратуры РЭП, но по темпам его роста в ближайшее время объем этих работ, возможно, превысит 50% общего объема работ.

Математическое моделирование представляет собой необходимый и эффективный инструмент оптимизации аппаратной структуры и алгоритмов функционирования комплексов бортового радиоэлектронного оборудования самолетов. Математическое (компьютерное) моделирование позволяет синтезировать структуру и параметры аппаратуры «от поставленной задачи», закладывать алгоритмы ее функционирования, получать численные оценки оптимальности параметров разрабатываемого комплекса, сравнивать эффективность предлагаемых инженерных решений на всех стадиях разработки.

Создание единой модифицируемой математической модели, полностью отражающей информационный обмен в информационно-управляющей системе бортового оборудования, размещенной на стендах математического моделирования основных разработчиков этого оборудования, позволит:

— создать единую понятийную базу предметной области, единое информационное пространство, обеспечивающее преемственность разработок;

- «увидеть» и скорректировать будущую систему до того, как она будет реализована физически;
- добиться согласованности точек зрения и конструктивного взаимодействия между всеми участниками работы;
- в конечном счете уменьшить затраты на разработку системы и улучшить ее качество.

Дальнейшее развитие аппаратуры РЭП в «физическом» плане будет, по всей видимости, сопряжено с очередным резким скачком, определяемым 5-м этапом развития РЭБ, когда появятся серийные многопозиционные РЭС УО и БРЛС со сверхширокополосными шумоподобными сигналами прямого синтеза (без несущей частоты), что повлечет переход радиотехнической аппаратуры РЭБ на сверхширокополосную цифровую обработку радиосигналов, в пределе — непосредственно по СВЧ входным сигналам. При этом роль оптического диапазона длин волн в теории и практике РЭП будет продолжать увеличиваться. Для обеспечения разработок потребуется создание ИЭТ, способных решать такую задачу.

Другим побудительным мотивом изменений в аппаратуре РЭП, без сомнений, будет являться задача интеграции бортовой аппаратуры перспективных авиационных комплексов. Указанный интеграционный процесс затрагивает как функциональную, так и физическую интеграцию аппаратуры. Несомненно, что (с точки зрения РЭБ) физическая интеграция, в первую очередь, должна коснуться антенных систем, чей вклад в величину эффективной поверхности рассеяния самолетов является определяющим, а также и приемопередающих устройств в целом, с целью снижения заметности их излучений.

Средства радиозлектронной борьбы, созданные НИИ «ЭКРАН»

Станции активных помех и радиотехнической разведки

Одной из первых разработок предприятия является создание в 1956 году самолетной автоматической станции ответных помех СПС-3М («Роза-М»), предназначенной для индивидуальной защиты самолетов. Станция создает для РЛС с коническим сканированием помехи, уводящие по угловым координатам. Станция выполнена на пальчиковых электронных лампах: 6НЗП, 6Ж2П, 6Ж5П, 6Х2П, СПП, ГУ-50.

В качестве СВЧ-усилителей применены лампы бегущей волны: входные УВ-1МБ, предварительные УВ-201, выходные УВ-202. Коэффициент перекрытия их по частоте 1,26, выходная мощность УВ-202 не менее 6 Вт.

В 1957 году начата, а в 1960 году завершена разработка станций общей радиотехнической разведки СРС-6, СРС-7 («Ромб-4А», «Ромб-4Б»). Они явились первыми изделиями предприятия, выполненными полностью на германиевых полупроводниковых приборах: транзисторах П4, МП10Б, П14Б, МП26, П416, выпускаемых предприятием МЭП «Светлана». Станции работают в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах.

В 1963–1966 годах выполнена разработка значительно более совершенного, чем станция «Роза-М», семейства станций «Сирень»: «Сирень-2И»,

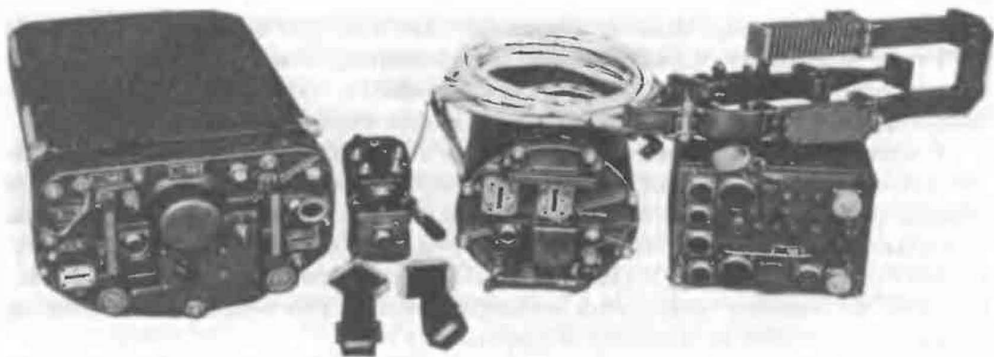


Рис. 3.4.33. Станция «Сирень-2Ф»

«Сирень-3И», «Сирень-2Ф» (рис. 3.4.33), «Сирень-3Ф», «Сирень-2Д», «Сирень-3Д», предназначенных для индивидуальной и взаимной защиты истребителей, фронтовой авиации и стратегических бомбардировщиков. Базовые станции «Сирень-1И», «Сирень-1Ф» и «Сирень-1Д» создавались в ЦНИРТИ.

В станциях реализованы помехи: уводящая по дальности, уводящая по скорости, уводящая по угловым координатам, мерцающая и в станции «Сирень-3Д» — ответно-шумовая, для создания которой разработана матричная система длительной памяти.

Все функциональные логические узлы станций выполнены на полупроводниковых приборах: германиевых транзисторах МП101, МП103, П306, П309, П416, 1Т308, 1Т311 и только появившихся кремниевых транзисторах 2Т203, 2Т312 (они более устойчивые, чем германиевые, к воздействию климатических и специальных факторов). На электронных лампах 6Н16, СГ202, 6Э5П, 6С19П и др. выполнены высоковольтные источники питания.

В 1966–1968 годах разработана станция общей радиотехнической разведки СРС-9 «Вираз-1», позволяющая не только определять тип РЛС и их количество, но и ориентировочное местоположение. Станция работает в миллиметровом, сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин волн, выполнена на германиевых полупроводниках: транзисторы МП26, П308, П701, П702, 1Т308, 1Т313.

Дальнейшим развитием станций общей радиотехнической разведки явилась разработанная в 1977 году станция СРС-13 («Тангаж»). В ней существенно увеличена номенклатура определяемых типов РЛС, повышена надежность определения типа, улучшена точность определения местоположения РЛС.

В станции, кроме кремниевых транзисторов — 2Т312, 2Т602, 2Т903, 2Т908 и др., нашли применение появившиеся к тому времени микросхемы малой степени интеграции: триггеры (130ТВ-1), стабилизаторы напряжения (142ЕН1, 142ЕН2), логические микросхемы (134ЛА8, 134ЛР1, 134ЛБ1), что позволило снизить массу станции до 95 кг вместо 134 кг у станции «Вираз-1».

В связи с постоянным требованием ВВС расширения функциональных возможностей (видов формируемых помех) самолетных станций помех, частотного диапазона, увеличения энергетического потенциала, повышения на-

дежности при одновременном снижении массогабаритных характеристик в 1974 году завершена разработка унифицированных самолетных станций ответных помех СПС-162, СПС-172 («Герань-2ФУ», «Герань-2ДУ»), предназначенных для защиты самолетов от поражения управляемыми ракетами.

В станциях кроме помех, создаваемых станциями «Сирень», реализованы дополнительно следующие виды: доплеровские шумы, поляризационная помеха, помеха НК (некогерентные колебания), помехи, перенацеливающие на облако дипольных отражателей и на подстилающую поверхность, импульсные помехи цепям АРУ (ИП-И, ИП-Н), наводимые скользящие по частоте (НСЧ), помехи прикрытия маневра. Количество видов и комбинаций видов помех — 108, в станциях «Сирень» — 15.

В функциональных логических узлах станций, кроме кремниевых диодов и транзисторов, применена широкая номенклатура микросхем малой степени интеграции: логические микросхемы (133ЛА3, 133ЛА6 и др.), операционные усилители (140УД1, 153УД6), стабилизаторы напряжения (142ЕН, 275ЕН), компараторы (521СА3), триггеры (564ТМ2), регистры (564ИР2), счетчики (564ИЕ10).

На электронных лампах 6П30Б, 6Н30П, 6Э15П и других выполнены высоковольтные источники питания. В качестве СВЧ-усилителей применены разработанные по ТЗ «НИИ «Экран», предприятиями МЭП «Алмаз», «Плутон» следующие ЛБВ:

- входной усилитель УВ-72 («Шандал»);
- предварительный усилитель УВ261 («Ширма»);
- выходной усилитель УВ-265 («Шасла-II).

Коэффициент перекрытия их по частоте составил 1,62, выходная мощность УВ-265 не менее 100 Вт. Для защиты самолета в заданном диапазоне частот необходимо две литерных станции общей массой 640 кг.

Дальнейшим развитием станций активных помех явились разработанные в 2004 году станции Л303, Л304 («Метеор-НМ2-К»), предназначенные для защиты самолетов от управляемых ракет классов «воздух-воздух» и «земля-воздух». В этих станциях впервые были применены цифровые устройства запоминания сигналов и цифрового формирования на их основе помеховых сигналов. Это позволило в дополнение к помехам, реализованным в станциях «Герань», создавать имитационные помехи по дальности и скорости и производить комплексирование создаваемых ими помех во всех сочетаниях. При этом параметры помех могут гибко изменяться.

В функциональных узлах станций применены, кроме микросхем малой степени интеграции, микросхемы средней и большой степени интеграции: ОЗУ 537РУ9, 537РУ13; ПЗУ М556РТ16, 541РТ1; АЦП 1107ПВ1; микропроцессор М1210 ВМ86; микроЭВМ М1816ВЕ39.

Входные СВЧ-усилители выполнены на твердотельных модулях М42151 («Одиссея»), предварительные — на М421131 («Овин»), разработанных предприятием «Исток» по ТЗ «НИИ «Экран». В качестве выходных усилителей использованы моноблоки У52125, У52139, разработанные предприятием «Алмаз» по ТЗ «НИИ «Экран».

В 2006 году завершена разработка станции активных помех Л380 («Торн-252»), предназначенной для защиты вертолетов от управляемых ра-



кет с РГС. В станции реализован цифровой метод формирования помех, позволивший создавать все известные имитационные и маскирующие помехи и в любых сочетаниях.

В функциональных узлах станции применены микросхемы средней и большой степени интеграции: ОЗУ 537РУ16А; ПЗУ 541РТ1; 556РТ161, контроллер 588ВГ6, микропроцессорный комплект 585ИК01, 585ИК02, 585ИК03, 585ИК014. Входные и предварительные СВЧ-усилители выполнены на твердотельных модулях М421227-5-1 «Отвес», М421227-11-1 «Отвес», М421135-6 («Одиссея»), М42174-1 («Олимпик»), М42174-2 («Олимпик»), разработанных предприятием «Исток» по ТЗ «НИИ «Экран». Выходной усилитель выполнен на ЛБВ «Шуя-1», разработанной предприятием «Плутон» по ТЗ «НИИ «Экран». Выходная мощность усилителя не менее 100 Вт.

Применение указанных ИЭТ и прогрессивных методов монтажа позволило создать станцию с коэффициентом перекрытия по частоте 3 и массой 75 кг.

Станции активных помех для защиты головных частей баллистических ракет

В 1978 году перед предприятием была поставлена новая задача — разработать для дециметрового диапазона частот передатчики для разделяющихся станций активных помех с целью защиты головных частей баллистических ракет от радиоэлектронных средств обнаружения системы ПРО противника.

Хотя в целом весь производственный процесс на предприятии был хорошо отлажен, разработчики станций сразу же столкнулись с некоторыми проблемами: необходимо было провести ряд организационных мероприятий, немало было и чисто технических задач по созданию отдельных узлов для передатчиков.

Во-первых, в стране отсутствовали мощные (на несколько десятков ватт) генераторы широкополосного шумового СВЧ-сигнала в заданных диапазонах частот. В связи с этим потребовалась постановка на предприятиях электронной промышленности ряда НИР и ОКР по созданию специальных высокошумовых модулей («Ива», «Ива-2», «Ива-4», «Ива-7»).

Для мощных СВЧ-модулей, вакуумных или полупроводниковых, одним из главных всегда был вопрос обеспечения необходимого охлаждения. В качестве рабочего тела для охладителя остановились на парафине, как наиболее подходящем по температуре плавления, теплоемкости, агрессивности и сроку сохраняемости. Принцип работы такого способа заключается в том, что съем тепла происходит в процессе плавления за счет перехода вещества из одного агрегатного состояния (твердого) в другое (жидкое). Расчеты показали, что такое охлаждение позволит обеспечить нужную температуру модуля в течение всего заданного времени работы.

Следующей проблемой, с которой столкнулись разработчики, были антенные системы передатчиков. Рассмотрев различные варианты исполнения и учитывая эксплуатационные условия работы аппаратуры (невесомость и безвоздушное пространство), разработчики антенн совместно с конструкторами пришли к выводу, что конструкция в нерабочем состоянии должна быть складывающейся, а для этого наиболее всего пригодны спиральные антенны, обладающие к тому же требуемой широкополосностью.

Большая работа была проведена по выбору первичного источника питания. После изучения эксплуатационных характеристик различных источников и консультаций с разработчиками первоначально был выбран сухозаряженный аккумулятор литиевой системы с ампульной системой всprыскивания электролита и пиротехнической системой задеЙствования. Достоинства аккумулятора — в сохранении его параметров после продолжительного срока хранения (свыше 15 лет), отсутствии необходимости проведения регламентных работ.

В результате выполнения ОКР «Бамбук-К» и «Пчела-2» к 1985 году были разработаны опытные образцы станций, проведены наземные и летные испытания и рабочая документация передана на завод «Экран» для подготовки к серийному производству.

Дальнейшее развитие данное направление получило в НИР «Чернотал» и «Сажены». Однако с наступлением периода перестройки в стране произошли изменения и в международных отношениях между СССР и США. В результате подписания международного договора об ограничении стратегических вооружений ОСВ-2 появился запрет на применение баллистических ракет с разделяющимися головными частями. В связи с этим дальнейшие работы на предприятии по данному направлению были прекращены.

Передачики помех одноразового использования¹

С начала 1990-х годов в информационных источниках появились сведения о разработке за рубежом отстреливаемых передатчиков помех одноразового использования (ППОИ) для защиты истребителей. В связи с этим на предприятии была выполнена НИР «Передача» по оценке возможности создания таких передатчиков на отечественной элементной базе. Созданию этого направления способствовала разработка в стране широкополосных монолитных СВЧ-усилителей. По результатам НИР в 1996 году было утверждено ТТЗ на ОКР «Передача-У».

При создании ППОИ разработчикам НИИ впервые в истории предприятия пришлось решать в комплексе радиотехнические, аэродинамические и конструктивные вопросы.

Главная проблема, которую предстояло решить разработчикам ППОИ: создать сердце передатчика — приемопередающий модуль. Было решено подключить к разработке специализированное предприятие электронной промышленности. После анализа достигнутого уровня разработок полупроводниковых СВЧ-узлов на разных предприятиях к работе было привлечено ОАО «Октава» (г. Новосибирск) и открыта составная часть ОКР «Поток». Последующий ход работ показал, что, несмотря на встреченные организационные и технические трудности по созданию модуля, решение было правильное.

Другая проблема, которую пришлось решать разработчикам, — это обеспечение необходимых летных качеств передатчика: ведь после отстрела из самолетных устройств выброса передатчик в свободном полете должен излучать сигнал в строго заданном секторе пространства в течение всего задан-

¹ Материал подготовлен Э. Седуновым

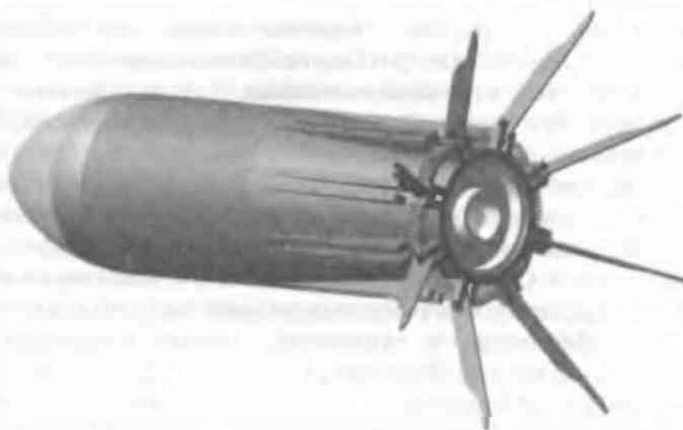


Рис. 3.4.34. Передатчик помех одноразового использования (ППОИ)

ного времени работы. Для исследования аэродинамических характеристик передатчика к работе были подключены специалисты из Самарского государственного аэрокосмического университета и Центрального аэрогидродинамического института им. Жуковского (г. Москва). После проведения теоретических исследований и многократных продувок и отстрелов АДЭ оптимальная форма передатчика была найдена и воплощена в конструкцию.

Составной частью разработки любого средства РЭП является оценка эффективности его применения. Эффективность применения ППОИ есть результат его взаимодействия с главным объектом воздействия помех — с радиолокационной головкой самонаведения управляемой ракеты. В связи с этим разработчикам ППОИ пришлось создавать свою математическую модель наведения ракеты с РГС на ППОИ. В модели должно было быть учтено большое количество составных частей, влияющих на взаимодействие ППОИ и РГС. Такая модель была создана и многократно применялась для предварительной оценки эффективности применения ППОИ и выбора оптимальных параметров помеховых сигналов.

Решение всех перечисленных выше задач и проблем позволило, несмотря на все технические, организационные и экономические трудности, создать к 2005 году первые в стране опытные образцы ППОИ (рис. 3.4.34) и выйти с ними на государственные испытания.

Наземные средства радиоэлектронной борьбы, созданные ВНИИ «ГРАНИТ»

Совершенствование наземных средств РЭБ

Среди широкой номенклатуры военной техники особое положение занимают наземные средства, комплексы и системы радиоэлектронного подавления интегральных радиоэлектронных информационно-управляющих систем (ИРИУС) воздушного и космического базирования, способные подавлять и функционально поражать радиосистемы средств воздушно-космического и

воздушно-наземного нападения. Первоначальное поколение наземных средств РЭП использовало избирательное радиоподавление, как правило, автономно используемых передатчиков помех с целеуказанием от радиолокационных средств, что затрудняло управление группировкой станций помех. В этом поколении станций помех использовались однолучевые зеркальные антенны с низкой скоростью обзора заданного пространства. К таким станциям помех относились станции «Огонек», СПН-40, СПО-8 и др.

На смену 1-го поколения средств РЭБ институт разработал станции помех нового поколения СПН-2, СПН-3, СПН-4 с многолучевыми антенными решетками. Эффективность радиоподавления была повышена за счет использования разработанных в институте автоматизированных пунктов управления (АПУ), например «Валдай» и «Маузер». До сих пор эти станции и АПУ находятся на вооружении в России и в армиях зарубежных стран. Серьезными успехами творческого коллектива является выполнение ОКР по созданию:

- станции помех «Ртуть-Б» и ее модификации «Ртуть-БМ», являющейся первой отечественной станцией помех многофункционального назначения;
- комплекса мощных помех КМП-1, предназначенного для радиоподавления РЛС ДРЛОУ «АВАКС»;
- станции помех РЛС ДРЛОУ системы «Хокай» (станция помех «Тополь-Э»);
- станции помех «Встреча», предназначенной для радиоподавления РЛС РУК управления оружием, бокового обзора, ОПМВ и др.

С 1985 года начинается развитие работ в институте по созданию интегральных радиоэлектронных информационно-управляющих систем (ИРИУС), и по вопросам перспектив развития наземных средств и комплексов РЭБ ведутся работы по формированию научного задела, необходимого для создания перспективной наземной техники РЭП в следующих направлениях:

- интеграция средств РЭП и средств поражения;
- использование распределенных на поверхности Земли средств шумовых помех для радиоподавления GPS каналов ВТО;
- формирование облика будущих наземных комплексов и систем РЭП (станции помех радиовысотомерам крылатых ракет); станции помех «Красуха-2»; «Красуха-4»; «Красуха-1»; (система автоматизированного управления «Москва» и др.).

Специалисты предприятия создали типовую структуру перспективной станции помех, включающую в себя три основных звена: средство радиотехнической разведки, формирователь помехового сигнала и систему автоматизированного управления процессами (технологиями) радиоподавления (определение пространственно-временных параметров объекта подавления; выбор формы и типа помехи, обеспечивающей эффективное подавление заданного объекта; оптимальное управление технологиями подавления).

Средства и комплексы ИРИУС постоянно совершенствуются и проходят испытания в реальных боевых операциях (Югославия, Ирак и др.), в которых используются как средства воздушно-космического, так и воздушного



нападения, обеспечивающие высокоточное поражение наземных целей (объекты и вооружение). Особое место в ИРИУС отводится спутниковым системам навигации и радиосистемам различного назначения, установленным на летательных аппаратах, при реализации всех этапов воздушно-наземной операции. Это прежде всего средства радио, радиотехнической и радиолокационной разведок. В подготовительный период конфликта при помощи радиосредств, расположенных на крылатых ракетах и беспилотных летательных аппаратах, которые могут быть не только средствами получения и передачи информации о состоянии наземных объектов на наземные центры обработки развединформации, но и средствами доставки поражающего оружия. Эта информация затем используется для нанесения огневых ударов по точечным объектам при массированных налетах, главная угроза которых состоит в использовании высокоточного оружия (управляемые бомбы, снаряды, ракеты). Это кардинально изменяет и усложняет оборонительные мероприятия по защите радиолокационных объектов и объектов с источниками излучения. Так возникла проблема защиты наземных объектов и вооружения от воздействия высокоточного оружия (ВТО). Отечественные РЛС (в том числе ПВО) и излучения передатчиков станций помех являются излучающими целями для головок самонаведения (ГСН) ВТО. Для борьбы с такими ГСН уже разработаны радиотехнические комплексы защиты с использованием отвлекающих источников излучения для защиты собственных объектов с источниками радиоизлучений. Однако в вооруженной борьбе используются и другие ГСН с активными или полуактивными системами наведения. Для защиты от них применяются средства, способствующие уменьшению ЭПР (различные покрытия). В общем случае для защиты излучаемых целей эффективны комбинированные способы защиты (покрытия и отвлекающие излучения).

В типовой структуре станции помех получают стремительное развитие цифровые методы и средства обработки (приема и формирования) радиосигналов. Используется цифровизация во всех трактах приема и формирования: создаются цифровые станции помех, цифровые модули формирования помех, цифровые фильтры, различные преобразовательные устройства и др. Цифровизация становится генеральным направлением в развитии наземных станций помех, а также комплексов и систем высокоточного определения пространственно-временных параметров радиосигналов ИРИУС. Полный переход на цифровые методы обработки сигналов займет предстоящие 15-20 лет. В XX веке радиоэлектронное подавление радиосистем ограничивалось только подавлением в радиодиапазоне. Это связано с тем, что в ИРИУС главную роль играли радиосистемы различного назначения и, кроме того, имелись задержки в освоении элементной базы оптического диапазона волн. Однако облик ИРИУС стал изменяться в сторону освоения ИЭТ оптического диапазона, что потребовало их разработки и создания для средств не только оптоэлектронного подавления, но и функционального поражения. Разработаны мощные импульсные генераторы (источники) оптических волн, способные выводить из строя элементы оптоэлектронной аппаратуры, применяемой в схмотехнических и конструктивных частях головок самонаведения оптического диапазона. Это достигается путем использования сверхмощных импульсных некогерентных источников излучения в широком

спектре оптического диапазона. К ним относятся боеприпасы оптического действия (БОД) и станции функционального подавления (СФП) в стационарном, мобильном или бортовом исполнении.

В связи с широким использованием в воздушно-наземных операциях ВТО (до нескольких сотен самолетов при массированных налетах, каждый самолет может иметь 2-6 управляемых средств поражения), в котором могут быть применены ГСН как оптического, так и радиодиапазона, актуализирована проблема функционального поражения электронных схем оптико-электронной радиоаппаратуры ГСН. Кроме того, реализация технологий функционального поражения схемотехнических элементов радиоаппаратуры, используемой в различных составляющих ИРИУС, потребовала развития соответствующей элементной базы средств и комплексов функционального поражения. Основой таких средств функционального поражения радиосредств являются сверхмощные генераторы. В настоящее время осваиваются и готовятся к серийному производству источники СВЧ-излучения, способные работать как в импульсном (длительность импульса 1 нс), так и в непрерывном режимах в диапазоне рабочих частот от 0,5 до десятков гигагерц. Максимальная мощность в импульсном режиме достигает десятков гигаватт (пучково-плазменные приборы, виркаторы и др.).

Наземные комплексы и системы РЭП играют важнейшую роль в повышении эффективности оборонительных мероприятий, так как заметно снижают эффективность наступательного вооружения, использующего как составные элементы, так и в целом ИРИУС. Это достигается путем парализации и дезорганизации функционирования информационно-управляющих средств воздушно-космического и воздушного нападения.

Таким образом, развитие элементной базы для комплексов функционального поражения радиотехнических и оптоэлектронных составляющих ИРИУС обеспечивает разработку, создание и внедрение высокоэффективного оборонительного вооружения, способного снижать эффективность средств воздушно-космического и воздушного нападения, в том числе и при их массированном применении.

Радиопротиводействие продолжает динамично развиваться в таких направлениях, как создание средств и комплексов для массового заградительного радиопротиводействия и многопозиционных наземных комплексов и систем технологий радиопротиводействия.

Технологии радиопротиводействия прошли многолетний путь развития: от традиционного избирательного до нового массового заградительного подавления. В 2000 году предложен новый способ и условия выполнения этого вида радиопротиводействия в широком спектре радиоволн и в значительных пространственных секторах. Установлен принцип распределения мощности — с повышением частоты должна увеличиваться мощность радиопомехи. Это потребует определенной корректировки характеристик основной элементной базы — генераторов СВЧ. Способ может быть использован для массового радиопротиводействия радиосистем различного назначения, распродоточенных как в пространстве, так и по частоте излучения.

Традиционные комплексы радиопротиводействия выполняются обычно в однопозиционном варианте. Однако в последнее время создаются и используются многопозиционные комплексы разведки и радиопротиводействия.



Так, например, многопозиционные системы радио- и радиотехнической разведки обеспечивают высокую точность определения пространственно-временных параметров (в том числе и дальности до излучаемых объектов). Еще в 1980-е годы институт провел исследования по созданию многопозиционной триангуляционной системы РТР. В настоящее время продолжают исследования по созданию многопозиционной высокоточной системы РТР. Для реализации схмотехнических решений требуется создание таких отечественных ИЭТ, как малошумящие усилители с коэффициентом усиления до 45–50 дБ и коэффициентом шума 3–4 дБ.

Создаются и используются также многопозиционные комплексы станций помех. Институт имеет опыт разработки многопозиционных комплексов радиопротиводействия. Еще в 1980-е годы был создан комплекс малогабаритных станций помех «ТУМАН» для подавления самолетных РЛС систем ДРЛОУ «АВАКС». В 2002–2003 годах выполнена НИР, связанная с созданием многопозиционных комплексов малогабаритных станций помех (в виде парциальных модулей — ПМ), работающих в диапазонах 3,4–6,2; 1,227 и 1,575 ГГц и предназначенных для радиопротиводействия РЛС ДРЛОУ «АВАКС» и приемной аппаратуры GPS. Отличительная черта создания помех: в диапазоне РЛС «АВАКС» — распределенное на земной поверхности поле шумовых источников; в диапазоне GPS — гармоническая помеха.

Изделия электронной техники для наземных средств РЭБ

Первоначальные поколения техники радиопротиводействия использовали избирательное подавление и потребовали разработки и внедрения таких ИЭТ, как СВЧ-усилители, преобразователи, генераторы СВЧ-сигналов, устройств обработки сигналов и др. Первое поколение средств РПД представляло собой станции помех автономного применения («Огонек», СПН-40, СПО-8 и др.) с внешним целеуказанием и с зеркальными однолучевыми антеннами.

Второе поколение — это станции помех нового типа (СПН-2, СПН-3, СПН-4 и др.) с многолучевыми антенными решетками, использующие усилители СВЧ-сигналов нового поколения, имеющие все (три) составляющие для реализации технологий радиопротиводействия (разведка, формирование помехового сигнала и управление технологическими процессами радиопротиводействия). Главное достоинство этого поколения средств РЭБ состоит в возможности управлять работой группировок станций помех. Для этого разработаны и внедрены в войска автоматизированные пункты управления, например «Валдай» и «Маузер», а также комплекс радиотехнической разведки «Автобаза».

На предварительном (подготовительном) этапе агрессии средства воздушно-космического и воздушного нападения (при подготовке воздушно-наземной операции) обычно не заходят в пространство над территорией захвата. Поэтому дальность действия их радиотехнических систем может составлять 400–500 км и выше (для спутников, космических аппаратов). Чтобы обеспечить дальность действия комплексов и систем радиоподавления и физического подавления (ФП) устройства (вместе с антеннами), их эквивалент-

тная чувствительность должна быть 140–150 дБ/Вт, что обеспечит прием самых слабых сигналов или от самых дальних источников радиоизлучений. Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что основные радиосредства нападения используют специальные сигналы сложной формы, обладающие энергетической скрытностью, что обостряет развивающийся конфликт в электромагнитном спектре волн. Для создания высокочувствительных приемных устройств используются маломощные СВЧ-усилители (МШУ), при этом заметный успех в сантиметровом диапазоне достигается только при коэффициенте усиления МШУ порядка 45–50 дБ и коэффициенте шума 3–4 дБ.

Традиционно приемные устройства применяют аналоговые способы и средства обработки сигналов (фильтрация, преобразование, запоминание, усиление и др.). Однако целый ряд процессов в приемнике связан с запоминанием, сдвигом во времени и другими преобразованиями, которые значительно проще реализуются при использовании цифровых способов и схем. Так возникла проблема использования цифровой обработки и формирования сигналов. В настоящее время весь приемный тракт (от антенны до выходных устройств) подвергнут «цифровизации». Это делает актуальной проблему разработки и серийного выпуска АЦП и ПАП, сигнальных процессоров антенн, устройств цифрового запоминания, цифровой фильтрации и др. «Цифровизация» аппаратуры РЭБ — генеральное направление в развитии станций помех, а также комплексов и систем высокоточного определения пространственно-временных параметров радиосистем воздушно-космических и воздушных средств нападения.

В конце XX столетия в связи с применением в воздушно-наземных операциях высокоточного оружия и массированных налетов авиации потребовалось дополнительно к радиоподавлению разрабатывать и применять средства физического подавления (ФП) радиоэлектронных средств, устанавливаемых на воздушно-космических и воздушных средствах нападения. Это стимулировало появление и развитие новых поколений ИЭТ в виде:

- сверхмощных генераторов СВЧ-диапазона;
- плазменно-оптических технологий и технических средств функционального подавления оптико-электронных систем наблюдения, разведки, прицеливания и высокоточного оружия (средства оптико-электронного противодействия).

Указанные новые виды ИЭТ принято относить к электромагнитному оружию (ЭМО), которое относится к средствам информационной войны.

Приборы ЭМО способны создавать кратковременные электромагнитные излучения (импульсы) большой мощности до 10 ГВт в диапазоне от сотен мегагерц до десятков гигагерц, которые могут выжечь полупроводниковые переходы полупроводниковых приборов полностью или частично (диоды, транзисторы, МОП-структуры логических элементов и др.) без восстановления работоспособности (необратимый процесс) или с возможностью восстановления.

В настоящее время осваиваются и готовятся к серийному производству источники СВЧ-излучения, способные работать как в импульсном (длительность импульса до 1 нс), так и в непрерывном режимах. К таким ИЭТ со



сверхмощным излучением относятся пучково-плазменные приборы, виркаторы, гиротроны, магнетроны, клистроны и др. Все эти приборы позволяют преобразовывать кинетическую энергию электронного пучка в электромагнитную энергию СВЧ-диапазона.

В средствах ФП оптико-электронных схем используются узконаправленные генераторы импульсного некогерентного оптического излучения, созданные на базе мощных плазменных электроразрядных источников света или в результате ударного сжатия и нагрева ксенона продуктами детонации конденсированного взрывчатого вещества, например, 30-мм боеприпасы оптического действия (БОД), позволяющие производить до 6000 выстрелов в 1 мин. Средства ФП оптико-электронных схем могут иметь следующие характеристики:

- сплошной спектр излучения в диапазоне длин волн от 0,186 до 14 мкм;
- спектральную яркость и температуру (10000-40000К) генерируемого оптического излучения;
- широкий диапазон временных параметров (1-10000 мкс).

Приборы ФП могут использоваться для поражения приборов ночного видения, оптических и оптико-электронных схем прицеливания, лазерных, телевизионных и тепловых головок самонаведения.

Таким образом, наземные средства РП, РЭП и ФП играют важнейшую роль в повышении эффективности оборонительных мероприятий, так как заметно снижают эффективность наступательного вооружения. Это достигается путем парализации и дезорганизации функционирования информационно-управляющих средств воздушно-космического и воздушного нападения. Такие потребительские требования определили необходимость разработки новых поколений ИЭТ, обладающих повышенными характеристиками — надежностью, широкополосностью, требуемыми коэффициентами усиления, выходной мощностью, малым уровнем собственных шумов, способностью генерировать мощные излучения радио- и оптического диапазонов волн и др.

Отечественные средства противодействия ИРИУС динамично развиваются не только для обеспечения традиционного избирательного РП и ФП, но и массового заградительного подавления. В 2000 году был предложен новый способ и условия выполнения этого вида радиоподавления. Установлен принцип распределения мощности помехового сигнала — с повышением частоты должна увеличиваться мощность помехового воздействия. Это потребует определенной корректировки характеристик основной элементной базы — генераторов СВЧ. Способ может быть использован для массового радиоподавления радиосистем различного назначения, рассредоточенных как в пространстве, так и по частоте подавляемых радиосистем (например, для подавления наземных радиосистем или бортовых воздушного базирования при массированном налете).

Традиционные наземные комплексы РП (средства радио- и радиотехнической разведки (РТР), создания помех и управления технологиями РП) выполняют, как правило, в однопозиционном варианте. Однако в последнее время создаются и используются многопозиционные комплексы РТР и РП. Так, например, многопозиционные системы радио- и радиотехнической

разведки обеспечивают высокую точность определения пространственно-временных параметров (в том числе и дальности до излучаемого объекта). Еще в 1980 годы ВНИИ «Градиент» провел исследования по созданию многопозиционной (триангуляционной) системы РТР. В настоящее время продолжают исследования по созданию многопозиционной высокоточной системы РТР. Для реализации схмотехнических решений требуется создание таких отечественных ИЭТ как малошумящие СВЧ-усилители с коэффициентом усиления 45-50 дБ и коэффициентом шума 3-4 дБ.

Таким образом, динамика развития средств воздушного и воздушно-космического нападения определила основные направления использования радиоэлектроники, предназначенной для повышения эффективности наступательного вооружения. Это в свою очередь потребовало развития средств и комплексов, позволяющих значительно снизить эффективность применяемого радиоэлектронного вооружения, в том числе и ИРИУС, путем использования военной техники РЭБ, разрушающей информационные сигналы и функционально поражающей каналы их формирования и обработки.

Так возникла и развивается диалектика борьбы, проявляющаяся в спектре электромагнитных волн. Здесь, в спектре электромагнитных волн, разветвляются конфликтные ситуации, в которых противодействующие стороны используют эффективные технологии РП и ФП:

- сложные сигналы, обладающие энергетической скрытностью, а в противовес им — помеховые сигналы, парализующие полезные сигналы, или сигналы ФП;
- противодействующая сторона в наступательных операциях пользуется информацией от ИРИУС, сторона защиты использует комплексы и системы радио-, оптоэлектронного и функционального поражения.

Используемые в наступательных операциях средства, комплексы и системы постоянно развиваются и стимулируют появление и развитие новых поколений систем противодействия, что в свою очередь требует развития и создания новых поколений ИЭТ.

Объективно существующая динамика развития средств нападения и защиты может быть учтена только при упреждающем финансировании развития ИЭТ.

Средства радиоэлектронной борьбы, созданные Таганрогским НИИсвязи

Динамика изменения облика схмотехнических и конструктивно-технологических решений аппаратуры радиоэлектронных средств и комплексов, создаваемых ТНИИС в интересах Военно-морского флота, во многом определялась, начиная с 1960-х годов, и продолжает определяться состоянием и развитием элементной базы.

В первых разработках института 1960–1970-х годов (изделия «Флейта», МРР, МП-150, МП-152, МП-264, МП-401) в качестве элементной базы применялись миниатюрные (пальчиковые) и сверхминиатюрные электрон-



ные лампы, которые по мере развития электронной промышленности заменялись полупроводниковыми приборами.

В аппаратуре оценки радиотехнической обстановки в 1960-е годы (МП-401) широко использовались видеоусилители на электронных лампах 6Ж5Б, 6Н16Б и логические устройства на основе транзисторов П401, П403, П416 и др., а также унифицированные функциональные узлы (УФУ) «Элемент-2».

Позднее начался переход к использованию микромодулей этажерочной конструкции. В изделии МРП-3 вместо микромодулей этажерочной конструкции использовались интегральные микросхемы «Логика», а затем «Логика-2». В разработках 1970-1980-х годов уже широко применялись ППЗУ (изделия «Кантата-М», ТК-25).

Во второй половине 1990-х и в 2000-х годах в аппаратуре широко используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). В качестве СВЧ-усилителей и генераторов в первых разработках применялись стеклянные ЛБВ с соленоидами, ЛОВ и клистроны. Первые образцы ЛБВ были сравнительно узкополосными, поэтому аппаратура состояла из нескольких (до 7) частотных литеров. По мере развития элементной базы повышалась широкополосность ЛБВ и СВЧ-транзисторов. Происходила замена усилителей на ЛБВ полупроводниковыми СВЧ усилительными модулями. Соответственно достигалось расширение полосы частот создаваемых средств и комплексов (табл. 3.4.1).

Таблица 3.4.1. Динамика повышения широкополосности разрабатываемых средств радиотехнической обстановки по годам (1960–2000)

Год разработок	Соотношение полосы частот
1960	1,0
1970	1,6
1980	3,2
1990, 2000	7,5

Примечание. Здесь за единицу принята ширина полосы частот разрабатываемой аппаратуры 1960-х годов.

Соответственно происходило уменьшение числа частотных литеров аппаратуры, снижение ее объемов и массы при повышении потребительских показателей (чувствительности, точности измеряемых параметров, надежности, снижения потребляемой мощности).

В качестве примера, иллюстрирующего повышение потребительских свойств аппаратуры в связи с совершенствованием элементной базы, может служить сравнение характеристик аппаратуры радиотехнической обстановки изделий МП-503 (1980-е годы) и ТК-25 (2004 год). Если аппаратура изделия МП-503 состояла из трех приборных шкафов (электронные модули III уровня), то аналогичная аппаратура изделия ТК-25 в том же диапазоне частот состояла уже из четырех модулей I уровня (ячеек), при этом обеспечивалось повышение точности измерения несущих частот в 3–4 раза.

Первые поколения радиоэлектронных средств активных помех содержали устройства определения и воспроизведения частоты на базе клистронов,

волноводных или коаксиальных фильтров и усилители мощности на базе стеклянных ЛБВ с соленоидами (изделие МП-150).

В дальнейшем стеклянные ЛБВ заменялись пакетированными (изделие МП-401, МП-407), а затем в 1990—2000-е годы начали широко применяться широкополосные комбинированные приборы, содержащие транзисторный усилитель, высоковольтный источник питания и усилитель на ЛБВ (изделие ТК-25, 5П-28), а в устройствах определения и воспроизведения частоты начали широко использоваться микросборки и сверхбольшие интегральные схемы.

Совершенствование элементной базы позволило сократить количество частотных литеров аппаратуры с трех (изделия МП-401, МП-407) до одного (изделия ТК-25, 5П-28). При этом соответственно уменьшились объемы и масса аппаратуры с повышением энергетического потенциала.

Развитие элементной базы позволило перейти от разработки отдельных средств радиотехнической обстановки и средств активных помех, обслуживаемых операторами, к созданию интегрированных автоматизированных многофункциональных комплексов, в которых за счет исключения дублирования функций обеспечивалось дальнейшее снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления при повышении основных тактико-технических характеристик.

Повышение потребительских свойств комплексов, устанавливаемых на объекте 1164, иллюстрируется таблицей 3.4.2.

Таблица 3.4.2. Повышение тактико-технических характеристик

Варианты средств и комплексов	Соотношение основных ТТХ			
	диапазон частот	энерго-потенциал	энерго-потребление	масса
Отдельные средства разработки 1960-х, 1970-х годов	1	1	1	1
Интегрированный комплекс разработки 1980-х годов	1,2	10	0,8	0,6
Интегрированный автоматизированный многофункциональный комплекс разработки 2000-х годов	3,5	15	0,5	0,3

Примечание. Здесь за единицу приняты характеристики разработок 1960-х, 1970-х годов.

Из истории развития радиосредств борьбы и радиоразведки

Радиоборьба

Первые три десятилетия XX века ознаменовались бурным развитием радиосвязи на военно-морском флоте, широким внедрением радиовещания, началом телевидения и применением радиосредств в армиях мира. К концу этого срока военная авиация превратилась в мощное средство вооруженных сил и в случаях военных конфликтов могла наносить большой урон как во-

енным, так и гражданским объектам, прежде всего городам. Имевшиеся оптические и акустические средства обнаружения уже не могли обеспечить своевременного обнаружения самолетов и управление зенитными средствами. Возникла острая необходимость поисков новых возможностей обнаружения летающих объектов. Так перед Второй мировой войной появилась радиолокация.

Вплоть до Второй мировой войны преднамеренное нарушение радиосвязи в армиях применялось редко, в том числе и потому, что изобретение радиопеленгаторов позволяло наряду с радиоперехватом определять и местоположение работающей радиостанции методом триангуляции. Для радиоразведки это было значительно предпочтительнее, чем глушение шифрованных передач связи.

Во время Второй мировой войны положение резко изменилось. Появившиеся радиолокаторы дальнего обнаружения, радиолокаторы на самолетах, радиолокаторы для наведения зенитной артиллерии, их эффективные действия заставили по-другому относиться к возможностям нарушения работы радиоканалов этих средств. Возникла острая необходимость нарушения работы радиоканалов с помощью радиопомех. Так возникло понятие о «радиоэлектронной войне», методы которой получили название радиопротиводействия — РПД. К 1970 году за этой областью, затрудняющей или препятствующей функционированию каналов радиосвязи, прочно закрепился термин «радиоэлектронной борьбы» — РЭБ.

В Советском Союзе первый импульсный радиолокатор был создан в 1937 году, но их промышленное производство началось только после начала войны с Германией (в нашей армии более года не было радиолокаторов). Создание помех немецким сетям радиосвязи у нас началось с 1943 года, когда в армии было создано три дивизиона помех. Немецким радиолокаторам помех не создавалось, поскольку не было и аппаратуры для обнаружения их работы.

В СССР начало становления промышленности, создающей аппаратуру РЭБ, связано с именем советского ученого Акселя Ивановича Берга. В июле 1943 года постановлением ГКО был создан Совет по радиолокации, который занимался и вопросами радиопротиводействия (РПД). Заместителем председателя этого Совета и стал А.И. Берг. Постановлением был создан институт НИИ-108 (ЦНИРТИ), перед ним поставлена задача создания радиолокаторов и развития этой техники. Работая над радиолокационной техникой, институт не мог обойти вопросов помехоустойчивости радиолокаторов и методов создания помех. В институте в 1944 году были разработаны и испытаны для подавления наземных радиолокационных станций (РЛС) обнаружения станции активных помех, а также дипольные отражатели в виде станиолевых лент. Для создания пассивных помех в полках дальней авиации по 3 самолета загружались станиолевыми лентами, которые вручную выбрасывались в полете.

С 1959 года институт полностью переключился на разработку средств для задач радиоэлектронной борьбы. Вскоре ЦНИРТИ для организации подсобного хозяйства были переданы земли совхоза Протва, находящегося недалеко от одноименной реки, где в 1950-е годы, по инициативе А.И. Берга, разрабатывается проект строительства нового научно-исследо-



вательского учреждения. В 1950 году в будущем поселке Протва уже функционировала строительная площадка № 2, на которой приступили к возведению первых объектов в Протве и Тряси (испытательный полигон института). В 1957 году на основании Директивы Генерального штаба Вооруженных сил СССР от 20 августа 1957 года и Постановления от 26 сентября 1957 года в Протве был создан филиал института (ныне КНИРТИ), который в дальнейшем станет ведущим предприятием по разработке средств РЭП для ВВС.

До 1959 года институт находился в составе Министерства обороны СССР, а затем был переведен в Министерство радиотехнической промышленности (МРТП) и включен в состав 5-го Главного управления. В этом управлении были сосредоточены институты и ОКБ, занимавшиеся созданием средств РЭБ, включая средства радиоразведки, радиотехнической разведки, средств помех для подавления радиосвязи и средств борьбы с радиолокационными средствами и системами. Поскольку круг задач в этой области постоянно расширялся, возникла необходимость привлечения и создания новых институтов и ОКБ для решения возникающих проблем.

Большую роль в развитии и решении вопросов разработки и создании средств РЭБ сыграло решение Правительства о разделении МРТП на два Министерства — Министерство радиопромышленности (МРП) и Министерство производства средств связи (МПСС). Это позволило разделить вопросы создания и разработки средств РЭБ. На МРП были возложены задачи создания и производства средств РЭБ для противодействия радиолокационным и радиотехническим средствам и системам вероятного противника.

Для удовлетворения потребностей Вооруженных сил страны были созданы (переориентированы) научно-исследовательские учреждения, конструкторские бюро и заводы по тематике работ в области радиоэлектронной борьбы, результаты работ которых кратко рассмотрены в данной статье.

- ЦНИРТИ — головная организация по разработке проблем РЭБ и создания новых видов средств РЭБ;
- ВНИИ «Гранит» — головной разработчик средств защиты сухопутных войск от радиоуправляемого оружия;
- ТНИИС — разработчик средств защиты объектов ВМФ от радиолокационных средств;
- ЦКБ «Автоматика» — разработчик самонаводящихся на объект излучения средств для авиационных ракет;
- НИИ «Экран» — институт для совместной с ЦНИРТИ разработки средств РЭБ;
- КНИРТИ — институт по созданию средств РЭБ для ВВС.

Радио- и радиотехническая разведки

Радиоразведка как вид военной деятельности возникла в начале XX века, когда после изобретения радиосвязи и оснащения радиостанциями кораблей Военно-морского флота появилась возможность принимать сообщения по радио не только конкретному адресату, но и любому стороннему лицу, обладавшему необходимым приемным устройством. Во время Русско-япон-

ской войны (1904—1905 гг.) неоднократно имели место перехваты японских сообщений радистами русских радиостанций.

К началу Первой мировой войны в армиях уже существовали специальные подразделения для перехвата радиообмена неприятеля. Роль радиоразведки существенно возросла после того, как в 1915 году были изобретены радиопеленгаторы, способные определять направление на источник радиосигнала. Появилась возможность методами триангуляции определять место, где располагалась радиостанция, а значит и пункт управления военного подразделения противника. Так, в русской армии появились роты радиоразведки. Их задачей стал перехват радиogramм противника и определение местоположения крупных неприятельских штабов. Радиообмен в большинстве армий мира осуществлялся с помощью азбуки Морзе, с соответствующим кодированием передач для сокрытия их содержания от неприятельской радиоразведки.

В СССР была создана специальная служба радиоразведки — радиодивизионы, которые были оснащены разведывательной приемной и пеленгаторной аппаратурой, работавшей в диапазоне коротких, средних и длинных волн. В годы Великой Отечественной войны фронтовые радиодивизионы обеспечивали Ставку Верховного Главного командования, руководство фронтов ценнейшей развединформацией о расположении, намерениях и передислокациях немецких войск, помогавшей раскрывать и противостоять замыслам врага.

В конце 1930-х годов появились радиолокационные станции — новый вид радиотехники, созданный для задач противовоздушной обороны. К началу Второй мировой войны восточное побережье Англии уже было оборудовано цепочкой РЛС для предупреждения о налетах самолетов Германии. В свою очередь, немцы имели не только наземные РЛС, но и радиолокаторы на самолетах. Возникла необходимость противодействия этому новому направлению радиотехники. Для создания помех англичане впервые применили дипольные отражатели — «виндоу», а затем и передатчики шумовых помех. В те годы все РЛС работали на фиксированных частотах метрового и дециметрового диапазонов длин волн, не имели возможностей для ее изменения. Однако эффективность создаваемых помех зависела от знания значения частоты, на которой работала РЛС. В то время это были метровый и дециметровый диапазоны волн. Для определения частоты радиолокатора, на которой нужно создавать помехи, были разработаны специальные разведывательные радиоприемники, которые получили название «приемники радиотехнической разведки». В отличие от радиоразведки, где главная задача заключалась в перехвате передаваемой информации (семантическая информация) и определении места, где находится источник излучения, радиотехническую разведку интересует другая информация.

Для создания помех работе РЛС нужно определить частоту ее излучения, вид излучения (непрерывный или импульсный сигнал), частоту повторения импульсов, их длительность, период обзора пространства, способ определения угловых координат цели и другое.

3.5. Электроника на службе телекоммуникаций

К.И. Кукк, доктор технических наук, профессор

Занимаясь разработкой различной аппаратуры радиосвязи, телевидения и радиовещания в течение более 50 лет, мне пришлось на собственном опыте оценить влияние прогресса электронной техники на качественные и количественные показатели средств связи.

С другой стороны, следует отметить, что требования разработчиков телекоммуникационной аппаратуры к элементной базе прямо или косвенно стимулировали ее непрерывное совершенствование. В течение всех этих лет мы искренне радовались успехам наших коллег из электронпрома, огорчались, если среди широкой номенклатуры изделий электронной техники не находили подходящих. Поднимался вопрос о разработке необходимых приборов. В спорах согласовывали их будущие параметры, находили решения, визировали, утверждали, разрабатывали, испытывали, и ... получалось.

На электронных предприятиях СССР трудилось много талантливых ученых и инженеров, благодаря которым созданы уникальные электровакуумные приборы, полупроводниковые устройства, изделия микроэлектроники и другая элементная база, которая позволила создать военные и гражданские средства и системы связи. Это — директор Физико-технологического института АН СССР академик Камиль Ахметович Валиев, академик Николай Дмитриевич Девятков, генеральный директор НПО «Элас» — директор НИИ микроприборов Геннадий Яковлевич Гуськов, директор НИИ «Научный центр» Юрий Николаевич Дьяков, министр электронной промышленности СССР Владислав Григорьевич Колесников, заместители министра Сергей Васильевич Ильюшин, Алексей Федорович Казаков, Юрий Александрович Козлов, начальник ГНТУ МЭП СССР Валентин Михайлович Пролейко, главный инженер ГНТУ МЭП СССР Анатолий Сергеевич Андреев, сотрудники НПП «Торий» Александр Владимирович Иванов, Александр Казымич Михалев, Сергей Антонович Абанович, генеральный конструктор НПП «Исток» Сергей Иванович Ребров, ведущий специалист НПП «Исток» Лариса Анатольевна Парышкуро и многие, многие другие.

Электровакуумные приборы в передатчиках связи

Первые годы моей инженерной деятельности после окончания института, начиная с 1956 года, были связаны с созданием передатчиков для радиорелейных линий, в основном, военного назначения с импульсной фазовой (ИФМ) и частотной модуляцией.

Передатчики ИФМ, построенные по однокаскадной схеме, должны были обеспечивать работу в диапазоне 1500–2000 МГц при импульсной мощности 50 Вт (средняя мощность ~ 5 Вт). Наиболее подходящими для этой цели в то время оказались металлокерамические триоды типа ГИ-12Б и ГИ-11Б. Производство этих ламп в СССР было налажено после войны по немецкой технологии (аналоги LD-12 и LD-11). Первые партии ламп изготавливались с привлечением немецких специалистов. Рассказывают, что технология изготовления металлокерамических триодов требовала на тех или иных этапах ис-



пользования чистого спирта. Оператору для получения нужной дозы спирта требовалось лишь повернуть краник. По немецкой технологии на рабочие места спирт доставлялся по трубопроводу. После того, как немецкие специалисты вернулись на родину, наши хозяйственники усмотрели в спиртопроводе слишком простой доступ к алкоголю. Был осуществлен переход на фиксированную выдачу спирта согласно технологическому расчету. Самое удивительное, что фактический расход спирта при этом вырос.

В последующие годы был разработан целый ряд полностью отечественных металлокерамических триодов различного назначения и мощности, усовершенствована технология их производства, повышена долговечность ламп, улучшены свойства катода, что позволило увеличить крутизну лампы и соответственно уменьшить обужение генерируемых импульсов в однокаскадных передатчиках. У ряда СВЧ импульсных триодов оксидные катоды были заменены на импрегнированные.

В таблице 3.5.1 приведены основные данные отечественных импульсных СВЧ-триодов, выпускавшихся в 1950-1960-е годы. Лампы обладали малым разбросом параметров, устойчивостью к воздействию различных физико-климатических условий и сравнительно низкой стоимостью.

Таблица 3.5.1. Параметры отечественных СВЧ-триодов

Тип	Предельная частота, ГГц	Мощность рассеяния, Вт	Крутизна, мА/В	Предельное анодное напряжение, кВ	Максимальный ток катода в импульсе, А	Напряжение накала, В	Ток накала, А
ГИ-22	6,0	10	18	1,0	2,0	6,3	0,57
ГИ-25	5,5	12	24	3,0	2,8	6,3	1,17
ГИ-12Б	3,5	80	8...12	2,0	1,5	12,6	0,815
ГИ-21Б	2,0	110	23...30	5,0	5,0	12,6	0,85
ГИ-14Б	1,0	500	25...35	21,0	15,0	12,6	0,85

Радиорелейные станции военного назначения с ФИМ типа Р-404, начиная с 1961 года, выпускались в течение нескольких десятков лет и эксплуатируются до настоящего времени без каких-либо нареканий на работу металлокерамических триодов. Выпускалась также аналогичная станция для гражданского применения типа УРЛ-24.

На рис. 3.5.1. приведена схема построения однокаскадного передатчика на триоде ГИ-12Б.

По мере повышения требований к стабильности частоты передающих устройств однокаскадные автогенераторные уже не могли удовлетворять новым нормам и в 1970-х годах были разработаны модификации радиорелейных станций с ФИМ. Передатчики были построены по многокаскадной схеме, в которых стабильность определялась задающим генератором. В качестве выходного усилительного каскада была использована импульсная лампа бегущей волны (ЛБВ). Кроме повышения стабильности частоты многокаскадные передатчики имеют меньший уровень вносимых флуктуационных шумов, обеспечивают повышенную оперативность смены рабочих волн и

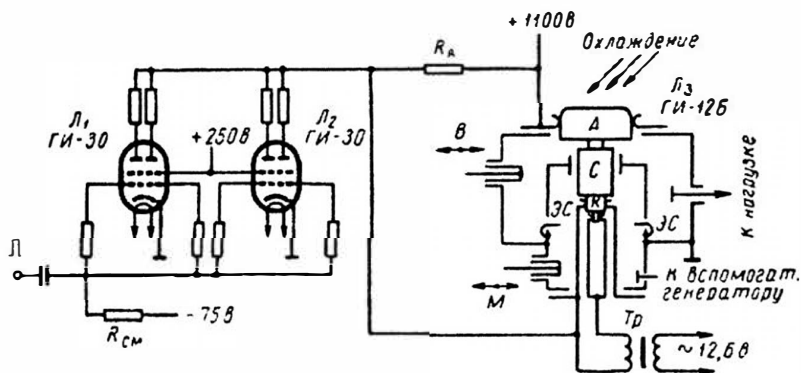


Рис. 3.5.1. Построение однокаскадного передатчика на триоде 6Д12Б

возможность формирования радиоимпульсов заданной формы. В свою очередь ЛБВ принципиально обладают широкополосностью, высоким коэффициентом усиления и могут работать в области весьма коротких волн.

Для импульсных передатчиков были необходимы специальные импульсные ЛБВ, рассчитанные на определенную минимальную скважность, т.е. отношение импульсной мощности к средней. Такие ЛБВ для радиолокационных целей в то время уже существовали. Но они были способны работать при скважности более 100. В радиорелейных линиях связи скважность обычно не превышает 10. Обязательным атрибутом такой ЛБВ является специальный управляющий электрод, располагаемый в районе электронной пушки лампы. Управляющий электрод является бестоковым, что резко снижает мощность импульсного модулятора, а его КПД в этом случае может составить более 99%. По заданию Московского НИРТИ (ведущее предприятие по разработке военных радиорелейных и тропосферных линий связи) ЛБВ с необходимыми характеристиками была разработана. В ходе разработки такой лампы был преодолен ряд трудностей, связанных с увеличением затухания между СВЧ-входом и выходом в режиме запирания лампы, с уменьшением термоэмиссии управляющего электрода и т.д. Успешная разработка и производство таких ЛБВ позволили создать новый ряд радиорелейных линий с ФИМ (Р-414, Р-414-03 и др.) с улучшенными характеристиками. Они были приняты на вооружение в 1978 году.

На рис. 3.5.2 приведена схема включения импульсной ЛБВ с манипуляцией по управляющей сетке.

Наиболее широкое распространение ЛБВ получили в радиорелейных линиях с частотной модуляцией благодаря своим широкополосным свойствам и высокому коэффициенту усиления.

Основной перечень требований, который предъявляется к усилительной электронной компонентной базе для использования в телекоммуникационной радиоаппаратуре, практически не меняется. Это освоение все более и более высоких частот, широкополосность (ширина мгновенной полосы усиления), высокий КПД, пониженный уровень собственных шумов, линейность амплитудной характеристики, работа с относительно низкими питающими напряжениями, малые габариты и вес, высокая надежность.

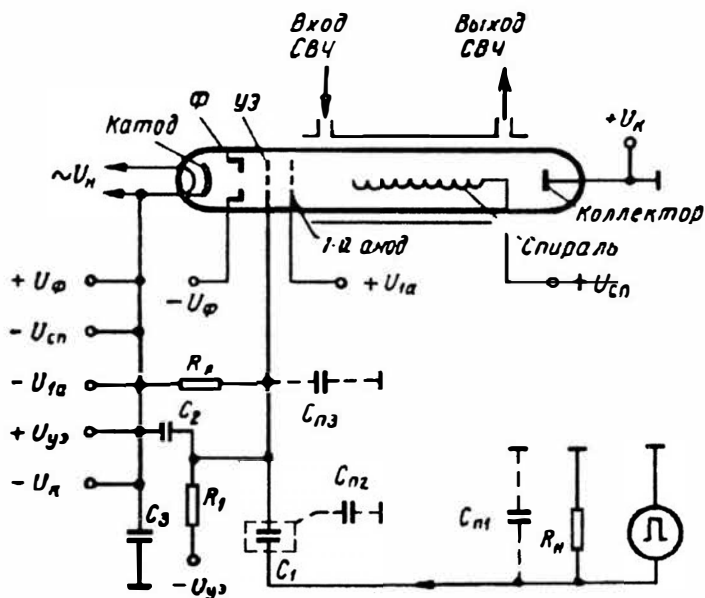


Рис. 3.5.2. Схема включения импульсной ЛБВ

В передающих устройствах радиорелейных линий ЛБВ используются в каскадах предварительного усиления и оконечных каскадах, а также в схемах частотных и фазовых модуляторов и СВЧ-гетеродинов. Обычно ЛБВ имеют коэффициент усиления 30-40 дБ. Препятствием к увеличению усиления является возможность самовозбуждения лампы из-за чрезмерного усиления отраженных волн. Для борьбы с этим явлением были применены несколько локальных поглотителей, что позволило получить коэффициент усиления, равный 60 дБ. Повышение КПД было достигнуто за счет рекуперации и ряда конструктивных усовершенствований внутри лампы. В отечественных ЛБВ для РРЛ с частотной модуляцией достигнуто высокое значение линейности амплитудной характеристики, и минимизирован сдвиг фазы от амплитуды входного сигнала.

На базе ЛБВ были разработаны в интересах Министерства обороны широко известные РРЛ типа Р-406 (на вооружении с 1962 г.) и Р-416 (на вооружении с 1978 г.).

Уже в начале 1960-х годов передовые страны стали готовиться к освоению спутниковых систем связи. По расчетам передатчики земных станций должны были иметь выходную мощность в сантиметровом диапазоне от нескольких киловатт до десятков киловатт. Такая мощность в то время могла быть получена с помощью многорезонаторных клистронов и то в достаточно узкой полосе частот. Задача работы в широкой полосе частот (до 500 МГц) могла быть решена только с помощью ламп бегущей волны. Существовавшие отечественные ЛБВ в необходимом диапазоне частот (5-6 ГГц) по мощности не превышали 80 Вт. Как выход из положения был предложен метод сложения СВЧ-мощностей отдельных приборов с помощью пассивных мостовых схем.

В 1960 году в Московском НИРТИ была проведена НИР «Космос» по созданию действующего образца устройства сложения восьми ЛБВ с выходной мощностью 80 Вт каждая. В результате получили усилительное устройство в 5-сантиметровом диапазоне с мгновенной полосой усиления 500 МГц. Это был своеобразный мировой рекорд, который, естественно, продержался очень недолго.

В виду секретного характера работы, она проводилась в хорошо экранированном помещении. Публикации были только в закрытой печати. Но наши коллеги из Министерства электронной промышленности, естественно, были в курсе событий, тем более, что цели поставки ЛБВ были им известны.

В 1 Главном Управлении МЭП результаты этой НИР были подробно проанализированы. Даже был поставлен вопрос, а следует ли по нашему мнению продолжать работу над дальнейшим повышением мощности отдельных приборов. Авторы НИР «Космос» категорически выступили против такой постановки вопроса. Конечно, надо продолжать! Но я больше чем уверен, что мудрое руководство МЭП, и без нашего ответа, не предполагало тормозить дальнейшие работы по созданию более мощных электровакуумных приборов. Что же касается метода сложения мощностей отдельных электронных приборов, то эта практика используется и до настоящего времени при использовании СВЧ-транзисторов в различного рода передатчиках большой мощности. А в то же самое время мощность единичных приборов продолжает увеличиваться с каждым годом. И это закономерный ход событий.

Для ряда мощных наземных станций спутниковой связи нет необходимости использовать широкополосные приборы, вполне достаточно иметь полосу пропускания 36-50 МГц. При этом, как правило, используются мощные СВЧ многорезонаторные клистроны, которые имеют более высокий КПД по сравнению с ЛБВ. В начале 1970-х годов такие клистроны с выходной мощностью 5 кВт были заказаны Московским НИРТИ в НИИ «Титан» (ныне ФГУП «НПП «Торий») для наземных станций спутниковой связи в Гусь-Хрустальный («Азимут-М») и Комсомольске-на-Амуре («Азимут-К»), а также для наземных командно-измерительных пунктов контроля и управления орбитальными группировками спутников. Были сформулированы достаточно жесткие требования к параметрам и конструкции клистрона. Это — равномерность амплитудно-частотной характеристики, линейность фазовой характеристики, линейность амплитудной характеристики, большой КПД, высокий коэффициент усиления, простота системы электропитания, удобство подключения системы охлаждения, большая наработка на отказ и т. д. Главным конструктором многорезонаторного клистрона «Волхов» (так называли эту разработку) был талантливый инженер, начальник лаборатории НИИ «Титан» Александр Владимирович Иванов.

При разработке и изготовлении первых клистронов был решен ряд технических проблем. Совместно с сотрудниками НИИ «Титан» был исследован и теоретически объяснен так называемый «эффект неустойчивости». Этот эффект проявлялся при увеличении входной мощности до некоторого значения, после чего происходило резкое падение выходной мощности клистрона. Была выдвинута гипотеза о температурной расстройке контуров за счет перехвата части электронов пучка конусами (концами резонаторов).

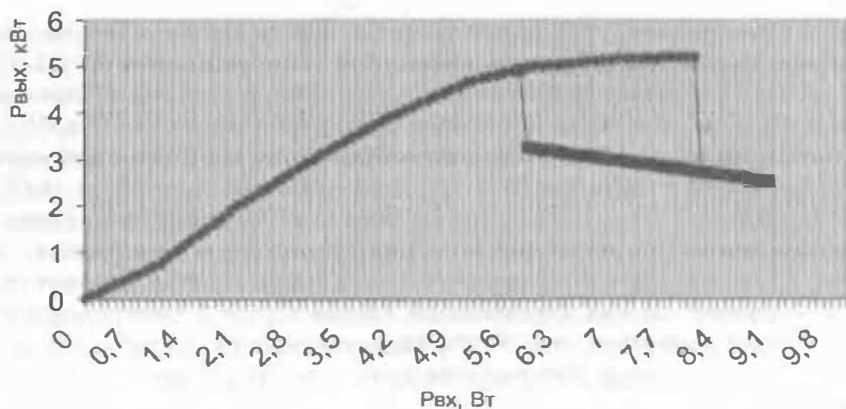


Рис. 3.5.3. Амплитудная характеристика многорезонаторного клистрона с «эффектом неустойчивости»

В режиме большой мощности электронный луч, благодаря росту сил пространственного заряда, увеличивается в диаметре. При этом происходит осаждение части электронов на конусах резонаторов, их нагрев и последующая расстройка, приводящая к резким скачкам мощности (рис. 3.5.3). Математический анализ, проведенный автором, подтвердил эту гипотезу и позволил за счет изменения конструкции клистрона устранить наблюдаемый эффект.

Специалистами НИИ «Титан» был создан стенд для проведения испытаний клистронов. МНИРТИ снабдило стенд специфично эталонной радиоизмерительной аппаратурой для измерения заданных тонких параметров. Тщательная проверка на стенде в НИИ «Титан» первого опытного образца клистрона подтвердила соответствие прибора всем заданным требованиям. Мы с нетерпением ожидали поступление первого клистрона в МНИРТИ для проверки его в составе передающего устройства. И вот, наконец, долгожданный момент наступил. Клистрон устанавливается в фокусирующий соленоид, и с соблюдением всех правил включения питающих напряжений, медленно увеличивая мощность, на вход подается СВЧ-сигнал. Все внимание обращено на стрелку измерителя выходной мощности. Вдруг раздается щелчок, и стрелка ваттметра падает на нулевую отметку. Клистрон вышел из строя. После выключения всех напряжений и изъятия клистрона обнаружили, что лопнуло выходное окно. Это обычно случается, когда в выходном фидерном тракте в результате пробоя возникает дуга, которая движется в сторону источника мощности, то есть к выходному окну. А причиной пробоя в данном случае явился бумажный листок паспорта клистрона, который был уложен в его выходной волновод. По нашей вине пришлось еще на месяц отложить испытания передатчика, пока не был изготовлен второй опытный образец клистрона.

После этого случая было принято решение срочно разработать и включить в состав схемы мощных передатчиков устройство дуговой защиты. Впоследствии такие устройства обезопасили работу многих мощных электроракумных приборов.



Многорезонаторные клистроны нашли широкое применение также в передатчиках тропосферных линий связи. Так, например, для ТРПЛ «Багет» (Р-417, Р-417С) в 1975 году был заказан и разработан в НИИ «Титан» клистрон типа «Виола». Прибор обеспечивал работу в диапазоне 4435–4750 МГц с выходной мощностью 1,2 кВт. Несколько позже в целях более оперативного перехода с частоты на частоту в пределах рабочего диапазона (4435–4750 МГц), клистроны было предложено снабдить электромеханическими переключателями, которые перестраивали каждый контур в отдельности. Таким образом, впервые удалось осуществить полную перестройку по частоте станции, включающей восемь клистронных передатчиков в течение нескольких секунд. Следует отметить, что ТРПЛ «Багет» является уникальной, единственной в мире системой, обеспечивающей 16-кратный разнос по частоте и пространству.

Для тропосферных станций, работающих в дециметровом диапазоне частот и предназначенных для работы в режиме сверхдальнего приема (250–400 км), необходимы были передатчики с выходной мощностью до 5 кВт. Наиболее целесообразно было для этих целей использовать мощные СВЧ-тетроды, разработанные на ленинградском заводе «Светлана» для телевизионных передатчиков УКВ-диапазона типа ГС-17Б. Благодаря оригинальной конструкции колебательных контуров усилителя мощности и выбранному динамическому режиму работы был разработан ряд современных передатчиков для тропосферных линий связи, в том числе, для сверхдальних тропосферных линий «Атлет-Д» (Р-420, Р-420М) и «Эшелон» (Р-444, Р-444М). В передатчике ТРПЛ «Атлет-Д» с выходной мощностью в УКВ-диапазоне 5 кВт удалось получить высокий КПД и найти эффективный способ теплоотвода, что позволило заменить систему водяного охлаждения электродов лампы на систему воздушного охлаждения, тем самым существенно упростив условия эксплуатации тропосферной станции «Атлет-Д».

Производство мощных электровакуумных приборов в нашей стране традиционно находилось на достаточно высоком уровне. Это в первую очередь относится к мощным СВЧ-триодам, тетродам, клистроном, ЛБВ и другим разновидностям вакуумных приборов.

В настоящее время время электровакуумные приборы все больше и больше вытесняются мощными СВЧ-транзисторами. При этом широко используются схемы сложения мощностей отдельных полупроводниковых триодов. Полностью исключено использование вакуумных приборов в технике радиорелейной связи. Об использовании мощных транзисторов в передающей телевизионной технике подробнее говорится ниже.

Микроэлектроника в изделиях связи

Развитие техники связи определяется достижениями в области электроники и степенью взаимодействия между создателями аппаратуры и разработчиками электронной техники. Главным направлением развития элементной базы за последние десятилетия является микроэлектроника с ее возрастающей по закону Мура степенью интеграции.

До середины 1970-х годов потребности аппаратуры военной связи в элементной базе, производимой на предприятиях электронной промышленно-

сти (полупроводники, СБИС, резисторы, конденсаторы, линии задержки, электровакуумные приборы и др.), более или менее удовлетворялись. Хотя уже начинал сказываться не столько количественный дефицит, сколько качественный. Необходимо отметить, что 30% изделий электронной техники потреблялось предприятиями, производящими средства связи (для справки: предприятия радиопромышленности потребляли 40%). Электронная промышленность не успевала производить не только изделия широкого применения, соответствующие мировому уровню, но и не могла обеспечить поставки соответствующих изделий. Поэтому на правительственном уровне было принято решение о развитии специализированной электроники в каждой отрасли оборонной промышленности, в том числе в промышленности средств связи. Такое решение не противоречит мировой практике, и казалось, должно было бы улучшить положение с обеспечением современной электроникой. Поэтому на многих предприятиях промышленности средств связи появились участки, цеха и центры по производству специализированных изделий электронной техники, в основном, по производству микросборок. Одновременно перед всеми отраслями оборонной промышленности были поставлены задачи освоения специального технологического оборудования, разработки и производства чистых материалов для электронной промышленности. В определенной степени были решены задачи по акустоэлектронике, производству микросхем с невысоким уровнем интеграции и микросборок. По-прежнему не было микросхем с высоким уровнем интеграции, радиоэлементов для поверхностного монтажа, мощных линейных СВЧ-транзисторов и т.д.

Бурное развитие техники связи, вычислительной техники в середине 1980-х годов ставило все новые задачи перед электронной промышленностью. Предпринимаемые правительством меры по увеличению производства ЭРИ при пятилетнем и годовом планировании или специальными постановлениями не смогли достичь цели. Что-то было упущено.

Отечественная промышленность высоких технологий сильно пострадала после развала Советского Союза. Но электронная промышленность заложила свое отставание от зарубежного уровня еще в советское время. В чем же причины этого? Причин много, но, на мой взгляд, важнейшие из них:

- неоправданное и поголовное копирование зарубежных образцов, что предопределило привычку “плестись в хвосте”, но этому процессу наступил естественный конец. Высокоразрядная электроника не поддавалась копированию, а навыки к новым разработкам оказались атрофированными;
- отвлечение мощностей электронной промышленности на изготовление «конечного» продукта в виде бытовых приборов, поступающих непосредственно в торговую сеть (товары народного потребления). Объем роста этих товаров вырос в 1970 году по отношению к 1960 году в 7,2 раза, а в 1990 году в 293,7 раза!;
- недостаточное внимание современным технологиям и технологическому оборудованию, а также производству чистых материалов;
- отсутствие жесткой требовательности к увеличению выхода годных изделий. В газете «Правда» в середине 1980-х годов один из руководите-

лей электронной промышленности в ответ на критику качества транзисторов выразился примерно так: «Мы вас научим, как из плохих транзисторов делать хорошие усилители».

Выпускавшиеся в 1970–1980 годы микроэлектронные схемы обладали неплохим качеством, что подтверждалось практикой их применения. Тем не менее, выпускаемые микросхемы зачастую имели по техническим условиям заниженные показатели по λ -характеристикам, иногда на 1,5–2 порядка ниже зарубежных аналогов. При расчете характеристик надежности аппаратуры, содержащей большое количество микросхем по ТУ на эти схемы, результаты получались ниже заданных в требованиях на аппаратуру. Разработчики были вынуждены вводить излишнее резервирование, завышать комплектность ЗИП, что отрицательно сказывалось на стоимости конечных изделий.

В конце 1970-х годов по инициативе автора совместно с сотрудниками ЦНИИ-22 МО были теоретически обоснованы более жесткие характеристики (на 1,5 порядка) для массовых серийных микросхем (серии 133, 155, 564 и др.), использованных при разработке Централных узлов спутниковой связи Министерства обороны (ЦУСС), что позволило при заданной для объекта надежности в два раза уменьшить объем резервного оборудования и сэкономить на поставке оборудования при строительстве каждого ЦУСС ~ 20 млн. руб. (в ценах 1978 г.). Следует заметить, что положительные результаты этих исследований подтвердились безотказной работой блоков, насыщенных микроэлектроникой, двух Централных узлов спутниковой связи в течение более 25 лет.

Современный рынок микроэлектроники определяется следующими основными направлениями:

- телекоммуникационная техника;
- цифровая бытовая электроника;
- персональные компьютеры;
- специальная техника.

В области телекоммуникационной техники это — цифровые АТС, цифровые системы передачи и уплотнения каналов, цифровая радиорелейная связь, спутниковая связь, мобильная сотовая связь, включая абонентские терминалы («трубки»), транкинговая связь, включая абонентские терминалы, средства доступа в Интернет, видеоконференцсвязь, системы широкополосного доступа (Wi-Fi, WiMAX), средства защиты информации, измерительная техника и др. Для этих целей, в основном, используется следующая элементная база:

- микропроцессоры (DSP);
- микроконтроллеры;
- заказные схемы (ASIC);
- «система на кристалле» (SoC);
- стандартно-заказные (ASSP);
- схемы памяти (ЭСППЗУ, ПЗУ, СОЗУ, Flash-память);
- ДОЗУ.

В области телевидения и радиовещания это — студийное телевизионное оборудование аналоговое, студийное телевизионное оборудование цифровое, передатчики телевизионные цифровые, студийное радиовещательное оборудование цифровое, передатчики радиовещательные цифровые, оборудование передачи цифровых телевизионных и радиопрограмм по кабельным, волоконно-оптическим, радиорелейным и спутниковым линиям связи, аналоговые, гибридные и цифровые телевизоры, цифровые приставки, аналоговые и цифровые радиоприемники, DVD-проигрыватели, кассетные и CD аудиопроигрыватели, музыкальные центры, видеоигровые системы, цифровые видеокамеры, видео- и аудиосерверы, телерадиовещательная измерительная техника и т. д.

О компонентной электронной базе для телерадиовещания

Очевидно, что требуемые электрические характеристики аппаратуры, КПД, массогабаритные параметры, надежность, и в конечном счете стоимость и операционные затраты в основном определяются электронной компонентной базой и технологией производства. По мере обновления электронной компонентной базы происходит и непрерывное совершенствование аппаратуры. Это наглядно можно проиллюстрировать на примере телевизионной вещательной профессиональной и бытовой аппаратуры, которая в настоящее время переживает новый виток обновления в связи с переходом на цифровой формат телевидения.

Современное телевидение является одним из важнейших средств массовой информации. По своему положению оно занимает достойное место между техникой и культурой. Телевидение настолько прочно вошло в быт современного человека, что без него невозможно представить существование последующих поколений человечества. Телевидение способствует улучшению образования и здравоохранения, положительно влияет на экономический рост и занятость населения. По мере совершенствования техники формирования, передачи и приема телевизионных программ, совмещения с передачей других видов информации и переходу к интерактивному режиму работы ожидается, что интерес к телевидению будет расти и в будущем.

В 2006 году телевизионное вещание в России отметило свое 75-летие. За это время телевизионная техника в нашей стране прошла большой путь. Об этом необходимо упомянуть, так как все технологические достижения на этом пути были тесно связаны с работой отечественной электронной промышленности.

В довоенное время на Московском телецентре в основном использовалась американская аппаратура фирмы RCA. Однако уже тогда были разработаны первые отечественные телевизоры типа «ВРК», «ТК-1», «17ТН-1», которые выпускались на ленинградских заводах им. Козицкого и «Радист».

Разработка и широкое производство телевизионных передатчиков началась сразу после войны в Центральном конструкторском бюро мощного радиостроения при заводе им. Коминтерна (г. Ленинград). Задачи ускоренной телефикации страны решались за счет создания семейства типовых телевизионных передатчиков мощностью от 1 до 15 кВт, работавших в метровом

диапазоне волн (1-5 телевизионные каналы). В конце 1950-х годов осваиваются более высокие диапазоны (6-12 телевизионные каналы). Была повышена мощность передатчиков. Наиболее распространенные передатчики тех времен — «Лен», «Ураган», «Якорь», «Игла», «Ладога». Все они были построены с использованием в выходных усилительных каскадах мощных тетродов.

При переходе на цветное телевизионное вещание ряд упомянутых передатчиков было модернизировано, так как они имели несовершенные видео-корректирующие устройства и соответственно не обеспечивали требуемого качества цветного изображения.

В 1970 годы в НПО им. Коминтерна были разработаны передатчики для работы на 1-12 телевизионных каналах серии АТРС (АТРС 5/0,5; АТРС 50/5), которые получили широкое распространение на телевизионных сетях Советского Союза. В качестве выходных каскадов использовались мощные тетроды с воздушным охлаждением типа ГУ-92Б и ГУ-90Б, которые изготавливались на ленинградском заводе «Светлана». Промышленный КПД передатчиков типа АТРС 5/0,5 составлял 32%, а передатчиков АТРС 50/5 — 38%. По техническим требованиям эти передатчики соответствовали общесоюзным стандартам. К серийному производству передатчиков было подключено Омское ПО «Иртыш».

В эти же годы для телевизионного вещания начинается освоение дециметрового диапазона волн (21-69 телевизионные каналы). Понадобилась и новая элементная база для мощных передатчиков. В первых передатчиках ДЦВ-диапазона типа «Ильмень» с выходной мощностью 25/2,5 кВт были применены клистроды типа А-148, которые были специально для этого разработаны в московском НИИ «Титан». В последующем была разработана новая модификация мощных передатчиков «Ильмень-2». Для них в НИИ «Титан» (в это время он был переименован в «НПП «Торий») разработан клистрод КУ-352 (шифр «Великан»).

Дальнейшее совершенствование телевизионных передающих устройств шло по пути внедрения транзисторов в предварительных каскадах усиления, широкого применения микроэлектроники и акустоэлектроники в возбуждателях и модуляторах, использования микропроцессорных блоков для контроля параметров и их регулировки и создания условий для дистанционного мониторинга и управления. Все это существенно упрощало эксплуатацию передающих устройств и приводило к снижению операционных расходов.

Таким образом, действующая система распространения телерадиопрограмм в России была заложена в 1960–1980-х годах, когда были построены мощные телевизионные и радиовещательные центры с соответствующей инфраструктурой, установлены тысячи ретрансляторов. Для подачи программ на передатчики и ретрансляторы построены радиорелейные линии связи, создана система спутниковой связи. Практически все передающие и распределительные системы были построены на отечественном оборудовании и отечественной элементной базе.

Естественно, что на сегодняшний день телерадиовещательная сеть Российской Федерации, эксплуатировавшаяся в течение длительного времени без кардинального технологического обновления, почти полностью выработала свой ресурс, физически и морально устарела. Однако 30–40-летняя экс-

плуатация оборудования положительно характеризует разработки того времени. Уже к концу 1980-х годов созрели планы модернизации и замены действующего телевизионного оборудования. Однако им не суждено было сбыться.

После 1991 года в промышленности наступила глубокая стагнация. Начался распад крупных научно-производственных и производственных объединений. Резко сократился выпуск бытовой телевизионной и радиоаппаратуры. Если в 1989 году производство телевизоров в нашей стране на предприятиях ВПК («девятки») приблизилось к 11 млн. штук, то в 1997 году российская промышленность выпускала всего только несколько сотен тысяч телевизоров. Этим обстоятельством немедленно воспользовались зарубежные поставщики.

Сложившаяся в 1990-е годы ориентация операторов связи на импортное оборудование привела к чрезмерной зависимости развития связной инфраструктуры страны от зарубежных поставщиков и внешнеполитической конъюнктуры, к снижению информационной безопасности, а также прогрессирующему отставанию российских предприятий в разработке и производстве перспективного оборудования, дальнейшему сокращению числа рабочих мест в такой высокотехнологичной области, каковой является производство электронных компонентов, средств связи и телерадиовещания.

Полученный навык операторов к приобретению зарубежной техники иногда приобретает уродливые формы. Покупается оборудование, которое производится в России, причем приобретается по ценам, значительно превышающим российские, а иногда и с сомнительным качеством. При этом не учитываются расходы на последующее послегарантийное обслуживание.

Разработка в 1980-х годах высоковольтных полевых транзисторов позволила резко изменить облик телевизионных передающих устройств. Особенностью полевых транзисторов является то, что проходящий через них ток снижается по мере увеличения температуры. Это позволяет упростить вопросы тепловой защиты. Как правило, в передатчиках мощности отдельных транзисторов складываются на мостовых схемах, что позволяет во всем диапазоне частот работы современных телевизионных передатчиков от 470 до 862 МГц создавать полностью транзисторные передатчики с выходной пиковой мощностью до 50 кВт. Промышленный КПД таких передатчиков на 20 и более процентов выше, чем у ламповых. В настоящее время в мире транзисторы в вещательной технике занимают 3% от общего числа СВЧ-компонентов мощностью более 20 Вт. Основными типами твердотельных устройств для телевизионных передающих устройств являются полевые транзисторы с затвором Шоттки (MESFET), полевые транзисторы с гетеропереходом (HEMT), а также биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT). В качестве полупроводниковых материалов используется арсенид галлия, а в ряде случаев и более дешевый — кремний (LDMOS-транзисторы). Уже в начале этого столетия был разработан ряд аналого-цифровых (гибридных) передатчиков, способных поддерживать как аналоговый режим вещания, так и цифровой при соответствующей смене модулятора. Идея создания гибридных передатчиков принадлежит российским специалистам, что зафиксировано в соответствующих документах МСЭ. Важнейшим требованием к транзисторам для цифровых передатчиков является линейность амплитудной характеристики.

Отечественные производители цифровых и аналого-цифровых телевизионных передатчиков, как правило, используют транзисторы фирмы Philips с выходной мощностью 150 Вт и более, поскольку отечественная промышленность их не выпускает. Для предварительных каскадов годятся отечественные транзисторы типа КТ9152А, КТ9150А.

Однако вернемся еще раз в историческое прошлое и проследим развитие бытового оборудования для телевидения — к телевизорам. Накануне Дня Победы 7 мая 1945 года возобновил работу Московский телецентр на Шаболовке. Срочно потребовались телевизоры для населения. И уже на следующий год начинается производство первых отечественных серийных ламповых телевизоров типа «Москвич Т-1» и «Ленинград Т-1».

В 1949 году В.К. Кенингсоном, Н.М. Варшавским и И.А. Николаевским разработан ламповый телевизор КВН-49, который долгие годы был символом развивающейся в стране телевизионной техники. Этот телевизор обеспечивал прием пяти телевизионных каналов в метровом диапазоне частот. В 1955 году появился первый телевизор, рассчитанный на работу в 12 телевизионных каналах. Одновременно решаются вопросы унификации основных узлов отечественных телевизоров. На Запрудненском электровакуумном заводе был налажен выпуск черно-белых кинескопов для телевизоров «КВН» и «Ленинград Т-2», а несколько позже кинескопов 32ЛК2Б (телевизоры «Рекорд», «Старт» и др.) и 61ПК1Б. Нарботка на отказ у телевизоров тех лет была невысока — в среднем 600 часов.

Учитывая возросшие потребности населения в телевизорах, Постановлением Совета Министров СССР № 121 от 29 ноября 1963 г. определены головные организации и предприятия, отвечающие за развитие телевизоростроения в нашей стране. В Постановлении были отмечены не только предприятия, отвечающие за конечный выпуск, но и поставщики унифицированных узлов, а также электронных компонентов с предприятий электронной промышленности. В соответствии с Постановлением ряд заводов по производству комплектующих было построено вновь, а многие действующие предприятия были расширены. Образованный в 1963 году на базе филиала-лаборатории Ленинградского НИИ-380 Московский научно-исследовательский телевизионный институт (МНИТИ) стал головным в области построения телевизоров. Институтом вместе с заводами отрасли созданы унифицированные черно-белые телевизоры УНТ-35, УНТ-47/59 и организовано их массовое производство более чем на 20 заводах. Научными руководителями телевизионного направления техники в течение многих лет были д-р техн. наук С.В. Новаковский, В.Е. Немцов, д-р техн. наук И.К. Ануфриев. Благодаря совместной работе электронной промышленности и изготовителей конечной продукции, производство телевизоров стало крупносерийным. Значительно возросла наработка телевизоров на отказ, которая уже к концу 1970-х годов была не ниже 5000 часов.

С 1964 года началась интенсивная разработка цветных телевизоров. На основе базовых моделей разработаны и серийно освоены цветные телевизоры I-III поколений. Александровский радиозавод начинает выпуск телевизоров с размером экрана 40 см («Рекорд-101» и «Рекорд-102»), а ПО «Рубин» и ПО им. Козицкого — с размером экрана 59 см («Рубин-401», «Радуга-5»). В основу построения телевизоров были положены трехлучевые ме-



таллостеклянные кинескопы (типа 53 ЛК 4Ц) с трехцветным экраном и теневой маской. Учитывая большие потребности в цветных кинескопах, в Москве был построен и в 1971 году введен в эксплуатацию специализированный завод по их производству «Хроматрон».

С конца 1970 года начался период интенсивного внедрения в приемную телевизионную технику полупроводниковых приборов, интегральных схем, более совершенных кинескопов. Это позволило улучшить качество изображения, снизить потребление энергии, улучшить массогабаритные характеристики. В качестве элементной базы использовались новейшие для того времени линейные микросхемы, высоковольтные транзисторы, высокочастотные транзисторы, ПАВ-фильтры, кинескопы с планарным расположением прожекторов и самосведением лучей и др.

В 1980 году разработан телевизор УСЦТ нового поколения. В нем использована новейшая элементная база, в том числе интегральные схемы повышенной интеграции. Предприятия электронной промышленности разработали и освоили в производстве более 100 новых ИЭТ, в том числе микросхемы для радиоканала, канала цветности и кадровой развертки, а также фильтры ПАВ. Это позволило по сравнению с ламповым телевизором уменьшить количество элементов с 1200 до 750-800, снизить материалоемкость и энергопотребление с 250 до 60-75 Вт. Нарботка выросла с 3500 до 12000 часов (телевизоры 2УСЦТ и 3УСЦТ). В 1980-х годах разработаны модели 4УСЦТ с расширенными функциональными возможностями.

В 1987 году вышло Постановление Правительства о разработке отечественных аналого-цифровых телевизоров со встроенными микропроцессорами ТЦИ (телевизор цветной интегральный). Для этого надо было разработать 74 новых электронных компонента, в том числе 16 БИС и семь СБИС. Разработка телевизора ТЦИ проводилась Московским НИТИ совместно с Симферопольским ПО «Фотон» с 1987 по 1991 год.

Общий годовой объем выпуска телевизоров в стране в 1990 году составил 10,6 млн. штук. Около четверти телевизоров в этом объеме производилось на предприятиях МЭП.

Современное бытовое телевидение по своему существу является аналоговым, со всеми вытекающими отсюда ограничениями и недостатками. Аналоговые сигналы чрезвычайно чувствительны к помехам различного рода, как природным, так и техногенным. Передача сигналов аналогового телевидения требует достаточно широкой полосы частот. Уже более 30 лет назад было признано, что необходим только цифровой метод передачи и приема телевизионных сигналов. Цифровое телевизионное вещание, а также цифровое радиовещание по стандарту DAB (Digital Audio Broadcasting) внедрено уже во многих передовых странах мира. Рожденное более 80 лет назад аналоговое радиовещание в диапазоне длинных, средних и коротких волн также уступает место цифровому. С июня 2003 года многие коротковолновые станции мира, в том числе Россия (коротковолновая радиовещательная станция в г. Талдом, Российская государственная радиовещательная компания «Голос России») перешли на регулярное вещание в цифровом формате по стандарту DRM.

Переход на цифровые методы передачи стал возможным благодаря трем основным составляющим в развитии радиоэлектроники. Во-первых, и это

главное — поразительные успехи в области микроэлектроники. Во-вторых, это разработка в 1993 году методов сжатия видеосигналов и звуковой информации до 40-60 раз (MPEG — Moving (Motion) Picture Experts Group), что позволило эффективно доставлять потребителям видео- и звуковую информацию в сетях телерадиовещания. В-третьих, это возрождение достаточно давно известного метода ортогональной модуляции с частотным уплотнением (OFDM-Orthogonal Division Frequency Multiplexing). Поскольку при использовании OFDM одновременно применяются методы помехоустойчивого кодирования, то этот метод чаще встречается под аббревиатурой COFDM (Coded Orthogonal Division Frequency Multiplexing). Применение быстрого обратного преобразования Фурье (БПФ) позволяет на передаче сформировать необходимое количество ортогональных несущих (6817 — «8К», 1705 — «2К» для режима DVB), а на приеме за счет прямого БПФ произвести свертку принимаемого сигнала. Это решается с помощью относительно дешевых микропроцессоров, что собственно и позволило перейти к фединго-устойчивому режиму модуляции типа COFDM.

Внедрение цифрового телевизионного вещания в спутниковых, эфирных и кабельных сетях позволяет:

- повысить эффективность использования частотного спектра от 4 до 9 раз;
- обеспечить передачу сигналов в едином цифровом стандарте, независимо от функционального назначения сигналов и за счет этого повысить эффективность использования любых линий связи;
- предоставить новые пользовательские свойства: многопрограммность, интерактивность, доступ в мировые и национальные компьютерные сети, повышенное качество изображения и звука;
- снизить потребление энергии эфирными передатчиками от 6 до 10 раз;
- обеспечить прием телевизионных программ в движущемся транспорте (скорость до 250 км/ч);
- создать новые системы хранения, обработки, доступа и передачи контента.

Начиная с 1999 года по теме «Мультиканал» в России началась разработка технических средств цифрового телевизионного вещания. Был разработан целый ряд изделий, на основе которых в 2000 году создана экспериментальная зона цифрового телевизионного вещания в Нижнем Новгороде.

О производительности микросхем можно судить по параметрам следующих изделий:

- кодер MPEG-2 AT-43, который осуществляет компрессию аналоговых видео- и аудиоданных и формирует однопрограммный транспортный цифровой поток. Формат преобразования — 4:2:2, разрешение — 720x576 пикселей. Выходная скорость цифрового потока может меняться от 4 до 40 Мбит/с;
- декодер MPEG-2 AT-39, который обеспечивает прием транспортного или программного мультиплексного потоков MPEG-2 со скоростью до 60 Мбит/с и декодирует их, обеспечивая на выходе полные (SECAM, PAL) или компонентные сигналы;

- мультиплексор транспортных потоков MPEG-2 AT-55, который служит для объединения цифровых данных нескольких телевизионных программ в единый транспортный поток MPEG-2, приема транспортных потоков по 6 независимым каналам со скоростью до 40 Мбит/с в каждом, селекции и ремultipлексирования, изменения пакетных идентификаторов (PID). Мультиплексор также обеспечивает регулировку скорости выходного потока.

При разработке этих и других изделий для цифрового телевидения использовалась зарубежная элементная база, выпускаемая фирмами Philips, Texas Instruments, SpASe, XILINX и др. Современные зарубежные СБИС выполнены на уровне хорошо освоенных технологических возможностей с применением проектных норм 0,25–0,18 мкм и ниже.

Как только в России начались разработки профессионального и бытового оборудования для цифрового вещания, проблема возрождения отечественной микроэлектроники стала еще острее. Создание отечественной микроэлектронной базы для высокотехнологичной аппаратуры приема, передачи и обработки цифровой информации как для социально значимых технологий (цифровое телерадиовещание, гражданская связь), так и для оборонных нужд (военная связь, разведка, высокоточное оружие) не только экономически оправдано, но и существенно повышает информационную безопасность страны.

Для ее возрождения необходимо в первую очередь укрепить и, возможно, создать новые дизайн-центры, полагая, что на первых порах производство по отечественной документации может осуществляться на зарубежных фабриках. При этом необходимо ориентироваться на последние достижения микроэлектроники, с тем, чтобы жизненный цикл производства без изменения технологических норм можно было сохранить в течение нескольких лет.

Поэтому разработку надо вести по технологии с проектными нормами 0,13–0,05 мкм, с использованием медной металлизации и диэлектриков с низким коэффициентом диэлектрической проницаемости. Предполагается, что производство будет вестись с использованием кремниевых пластин с диаметром 200–300 мм. Ожидается, что число фабрик в мире по обработке 300-мм пластин уже в ближайшие год-два достигнет 40. Для дизайн-центров требуется соответствующая САПР, библиотеки элементов, банки интеллектуальной собственности др.

Разрабатываемые в составе СБИС для цифрового телерадиовещания отдельные узлы (синтезаторы частот, сигнальные процессоры, контроллеры, процессоры быстрого преобразования Фурье, декодеры Витерби, Рида-Соломона и др.) являются основными IP-блоками современной мультимедийной аппаратуры, они будут включаться в отраслевой фонд блоков интеллектуальной собственности и могут быть использованы как самостоятельные СБИС двойного применения, так и в составе СБИС типа «система в кристалле», для других направлений современной техники информатизации (радиотелефонная связь 3-го поколения, локальные сети с радиодоступом, космическая связь, цифровое радиовещание, радиолокация и др.).

Начиная с 2002 года ФГУП НИИМА «Прогресс» совместно с ОАО «Телеком» и его основными соисполнителями ведет разработку технологии создания радиоэлектронных модулей для интеллектуальных мультимедийных

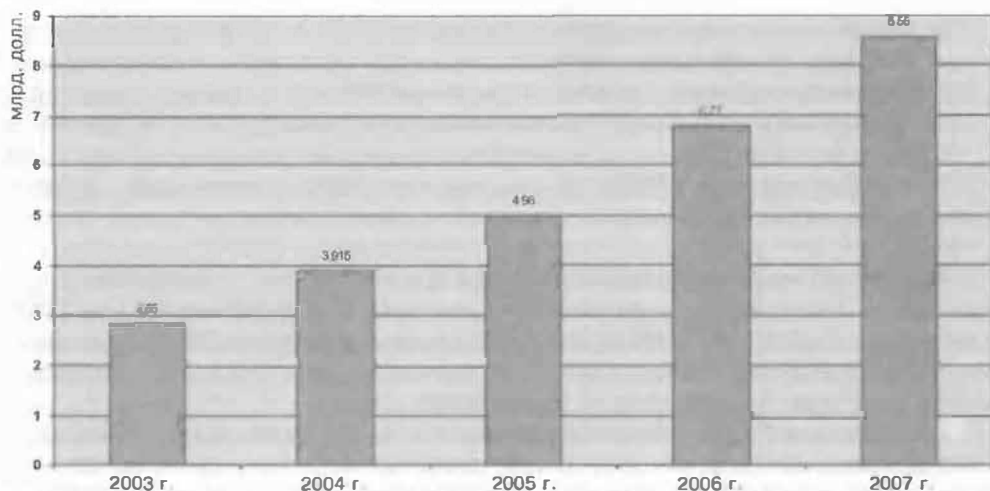


Рис. 3.5.4. Объем мирового рынка микросхем для бытовой аппаратуры цифрового телевизионного вещания

терминалов цифрового телевидения на основе субмикронной технологии. Наиболее критичными электронными компонентами являются: 3 типа аналоговых и аналого-цифровых СБИС для тюнера по биполярной технологии 1 мкм, 4 типа цифровых СБИС для демодулятора по КМОП-технологии менее 0,5 мкм, 2-3 типа цифровых СБИС для декодера MPEG по КМОП-технологии менее 0,5 мкм. По самым скромным подсчетам это позволит сэкономить стране в течение 10 лет около 1 млрд. долл. Элементная база для тюнера практически разработана, а более сложные цифровые микросхемы находятся в стадии окончания разработки.

В настоящее время в мире насчитывается около 1,5 млрд. аналоговых телевизоров и 2,5 млрд. радиоприемников. Для обеспечения приема цифровых телевизионных передач на аналоговый телевизор необходима цифровая приставка (set-top box). Разработаны и выпускаются аналого-цифровые и цифровые телевизоры. В переходной период от аналогового к цифровому вещанию наибольшим спросом будут пользоваться цифровые приставки и гибридные телевизоры. В 2003 году в мире было выпущено 42,5 млн. цифровых приставок. В 2007 году ожидается выпуск 103,5 млн. приставок. Рост в среднем по 25% в год. Производство аналого-цифровых и цифровых телевизоров, начиная с 2005 года будет расти до 66% в год. Ускоренное развитие бытовой электроники (12% в год) в последнее время в первую очередь связано с внедрением цифрового формата в системы телевизионного вещания и радиовещания, а также с продолжающимся ростом числа мобильных телефонов.

Только для цифрового телевизионного вещания таблица роста продаж имеет следующий вид (рис.3.5.4).

Примечательно, что если среднегодовые темпы роста для бытовой техники составляют 12%, то только для цифрового телевизионного вещания они в среднем составляют 32%. В то же самое время в этих расчетах не учтены объемы продаж цифровых радиовещательных приемных устройств по

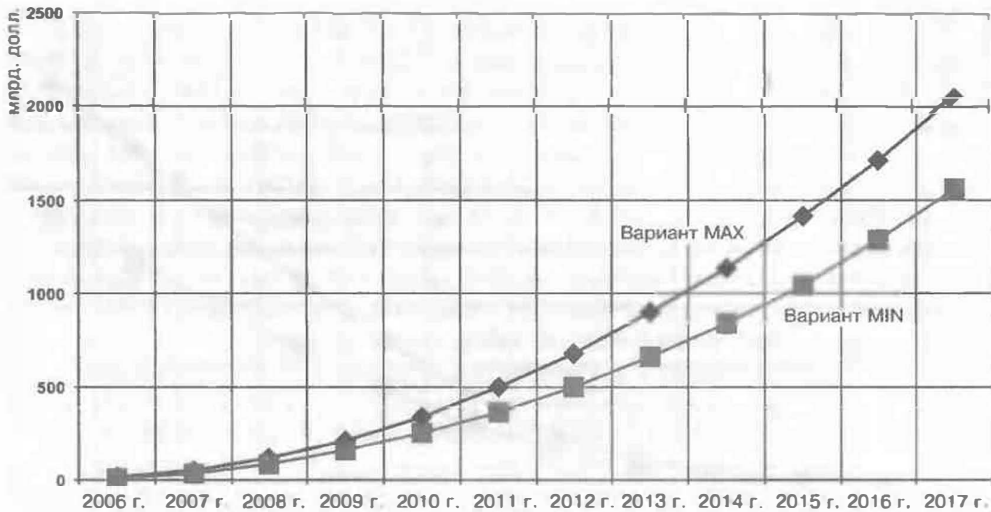


Рис. 3.5.5. Объем поставок микросхем для цифрового телевизионного вещания в России

стандартам DAB и DRM. Приемников DAB уже продано в мире более 300 млн. штук.

Стоимость абонентских устройств цифрового телевизионного вещания определяется стоимостью элементной базы и уровнем ее интеграции. По мере разработки сигнальных процессоров и СБИС повышенной интеграции созданы условия для появления микросхем «система в кристалле», объединяющих такие функциональные СБИС как демодулятор COFDM, модулятор QAM, декодер MPEG-2, декодер H-264 и т.д.

Основными функциональными электронными компонентами для обеспечения цифрового приема являются универсальный тюнер, демодулятор, декодер MPEG-2 (MPEG-4). Эти компоненты могут иметь как отдельное исполнение, так и интегрированное.

Расчет объема дополнительных поставок микросхем в России в денежном выражении (млн. долл.), связанных только с переходом на выпуск цифровых приставок, аналого-цифровых и цифровых телевизоров приведен на рис. 3.5.5.

Расчет объема поставок микросхем в России в денежном выражении (млн. долл.), связанных с переходом на выпуск цифровых радиоприемников, приведен на рис. 3.5.6.

Акустоэлектроника в системах связи и телерадиовещания

Ни одна область электросвязи или радиотехники не обходится без процессов фильтрации сигналов. Ведущие ученые мира посвятили вопросам построения фильтров огромное количество работ, благодаря чему стало возможным успешное развитие электро- и радиосвязи, радиолокации и других направлений радиотехники. Электрический фильтр в большинстве случаев

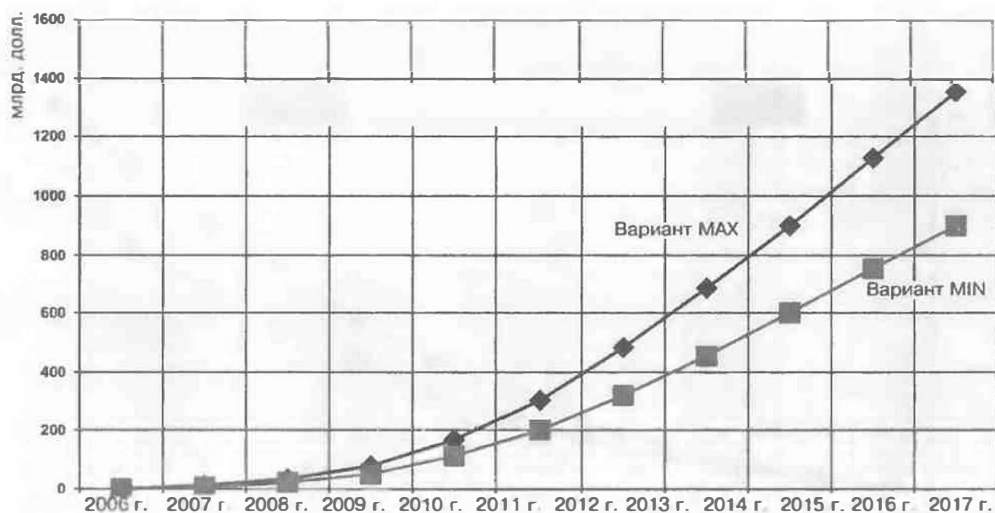


Рис. 3.5.6. Объем поставок микросхем для цифрового радиовещания в России

является пассивным четырехполюсником, обладающим малыми потерями в определенной полосе частот, и большим затуханием вне этой полосы. Уже более полутора веков в электросвязи используются фильтры на реактивных (L,C) элементах. Вопросы их построения практически доведены до совершенства. Узкополосные фильтры реализуются с использованием кварцевых резонаторов.

В середине прошлого столетия широкое распространение получил новый класс фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Огромную роль в широком распространении фильтров на ПАВ сыграли российские ученые. Во главе работ по акустоэлектронике и акустооптике в течение нескольких десятков лет стоит выдающийся ученый современности академик Юрий Васильевич Гуляев. В 1964 году им совместно с В.И. Пустовым была выдвинута идея использования поверхностных акустических волн (ПАВ) в электронике и предложена слоистая структура пьезоэлектрик–полупроводник в качестве базовой конструкции акустоэлектронных приборов. В 1977 году Ю.В. Гуляев совместно с А.М. Кмитой и А.С. Багдасаряном предложил новый тип преобразователя для возбуждения и приема ПАВ, основанный на «емкостном взвешивании электродов» и позволяющий получить наилучшие характеристики фильтров, линий задержки и других устройств на ПАВ. В 1968 году Ю.В. Гуляевым независимо и одновременно с американским физиком Дж. Блюстейном был предсказан и изучен новый фундаментальный тип ПАВ, известный в мировой литературе под названием «волн Блюстейна-Гуляева» или БГ-волн. За работы в области акустоэлектроники и микроволновой акустики Ю.В. Гуляев был дважды удостоен Государственной премии СССР (1974 г., 1984 г.), премии Совета Министров СССР (1989 г.), Государственной премии России (1993 г.), Государственной премии Российской Федерации (2007 г.) и премии Европейского физического общества (1979 г.).



Благодаря созданной Ю.В. Гуляевым научной школе фильтры на ПАВ, а также другие устройства, использующие пьезоэлектрики, получили широкое распространение в самых различных системах, в том числе в массовой бытовой аппаратуре (телевизоры, телефоны мобильной связи и др.). Следует отметить, что важнейшим элементом функциональной электроники с использованием ПАВ являются линии задержки.

Одним из новых направлений ПАВ является разработка импедансных фильтров, которые позволяют существенно повысить практически все характеристики фильтров. Вносимые потери снижаются ниже 2 дБ на частотах выше 800 МГц, пульсации группового времени запаздывания не превышают 2 нс. Такие ПАВ-фильтры пропускают до нескольких ватт мощности, что является важным для применения в телефонных трубках сотовой и транкинговой связи. Они обладают высокой технологичностью и малыми габаритами. Частотный диапазон таких фильтров может быть расширен до 10 ГГц.

В настоящее время в мире происходит процесс бурного перехода от аналоговых методов телевизионного и радиовещания к цифровым. Перед российской промышленностью стоит серьезная задача освоения в серийном производстве разработанной аппаратуры радиотелевизионного вещания, создания и своевременного наполнения отечественного конкурентоспособного рынка цифровым радиотелевизионным оборудованием с целью обеспечения наиболее полного удовлетворения спроса населения в высококачественных услугах связи, информации и вещания.

Важнейшей составной частью абонентского приемного устройства является модуль входного интерфейса, который выполняет функции выделения и демодуляции принимаемого сигнала. Собственно выделение входного сигнала осуществляется в селекторе. Сигнал с выхода смесителя на промежуточной частоте фильтруется высокоизбирательным фильтром на ПАВ и далее поступает на вход демодулятора. Таким образом, в каждом абонентском устройстве присутствует ПАВ-фильтр. Заметим, что в гибридных (аналого-цифровых) телевизорах, как правило, будет два селектора — отдельно для аналогового приема и отдельно для цифрового. Удвоенное количество селекторов — это задержки переходного периода. При укомплектовании цифровой приставкой аналогового телевизора в общей сложности также будет два селектора — у приставки и у телевизора.

Основными требованиями, предъявляемыми к фильтрам на ПАВ, являются высокая избирательность, вносимое затухание, равномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) и амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), работа на достаточно высоких частотах (до 3 ГГц и более), относительно высокий уровень пропускаемой мощности, малые массогабаритные характеристики, технологичность изготовления, низкая стоимость.

Стоимость абонентских устройств цифрового телевизионного вещания определяется стоимостью элементной базы и уровнем ее интеграции.

В последние годы разработан универсальный аналого-цифровой селектор каналов СК-В-417.0, обеспечивающий работу как в кабельных (DVB-C), так и в эфирных (DVB-T) телевизионных сетях. Селектор осуществляет прием сигналов в диапазоне от 49,5 до 862 МГц. Важнейшим элементом, обеспечивающим частотную избирательность селектора на промежуточной частоте 35,25 МГц (номинальное значение), является ПАВ-фильтр. Такой

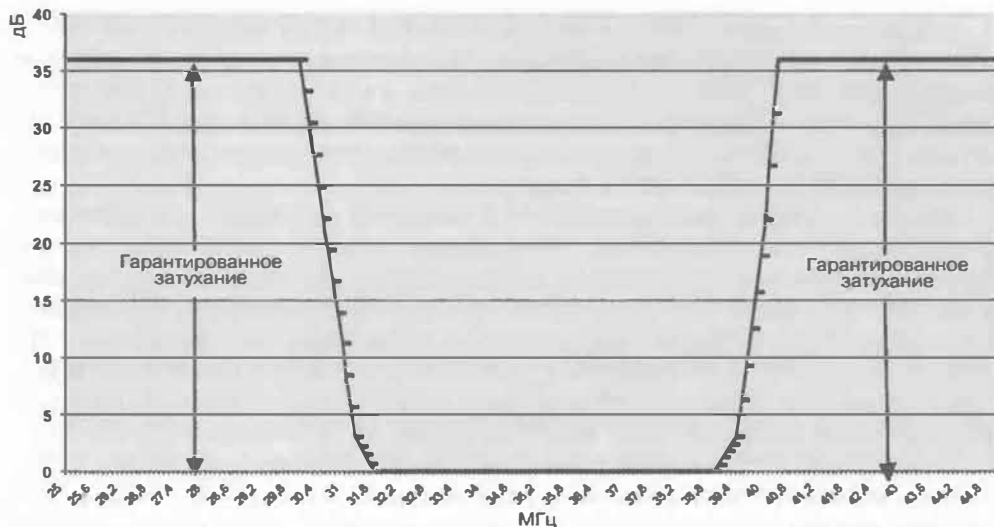


Рис. 3.5.7. Частотная характеристика ПАВ-фильтра для бытовой аппаратуры

фильтр обеспечивает в полосе рабочих частот 31,6–38,9 МГц неравномерность затухания не более 0,7 дБ, неравномерность группового времени запаздывания не более 50 нс. Вносимое затухание на частотах 30,55 и 39,95 МГц составляет не менее 22 дБ, а в диапазоне 25,0–30,25 МГц и 31,6–38,9 МГц не менее 36 дБ (рис.3.5.7).

Переход в России на цифровое телевизионное вещание по планам должен завершиться к 2015 году. Поэтому весь абонентский парк должен быть к этому времени обновлен либо путем приобретения приставок, либо приобретением аналого-цифровых телевизоров, либо цифровых телевизоров. Полагая, что отечественная промышленность займет на этом рынке не менее 60% объема, общее число абонентских устройств, содержащих ПАВ-фильтры составит 50–60 млн. изделий, т.е. в среднем только для абонентских устройств надо будет изготавливать не менее 5,5–7,0 млн. ПАВ-фильтров в год.

В последующие годы намечена разработка акустоэлектронных компонентов нового поколения на поверхностно-акустических волнах для цифровой телевизионной аппаратуры. Будут созданы импортозамещающие фильтры нового поколения на ПАВ, в том числе с малым уровнем вносимого затухания (1–6 дБ) для передающих и измерительных устройств, обеспечивающие высокую селективность (40–70 дБ) и помехозащищенность, а также фильтры с пониженным уровнем потерь для бытовой цифровой аппаратуры.

Средства отображения

Большинство существующих в мире аналоговых телевизоров, а их более 1,5 млрд., в качестве средств отображения видеoinформации используют кинескопы с различным размером по диагонали. Кинескоп составляет 52% себестоимости телевизора. Первый серийный отечественный кинескоп 18ЛК15



с диагональю экрана 18 см начал выпускаться на Московском электроламповом заводе в 1947 году. Уже на следующий год промышленность стала выпускать кинескопы 30ЛК1Б с диагональю 300 мм и углом отклонения 60°.

В 1956 году была закончена разработка трехлучевого металлостеклянного кинескопа 53ЛК4Ц для цветных телевизоров. Объем выпуска кинескопов предприятиями электронной промышленности в период с 1965 по 1990 год составлял в среднем 10% от общего объема выпуска изделий электронной техники. Кинескопы выпускались на ряде предприятий: Воронежском электроламповом заводе, Запрудненском заводе по производству кинескопов, московском заводе «Хроматрон», новосибирском заводе «Экран», Брянском электроламповом заводе, нижегородском заводе «Элкон» и др.

К 1990 году общий объем выпуска телевизоров в стране достиг 10, 6 млн. штук. Отечественных кинескопов стало не хватать. Дефицит покрывался в основном за счет приобретения кинескопов на сборочных заводах Индии, работавших по южнокорейской технологии.

С 1992 года производство отечественных телевизоров, а соответственно и кинескопов к ним резко упало. В 1996 году выпуск телевизоров составил всего 310 тыс. штук. Начиная с 1998 года, произошел рост объемов производства телевизоров в России и составил в 2005 году 6,8 млн. штук. При этом практически все средства отображения поставляются из-за рубежа. Большинство телевизоров собирается по зарубежной технологии.

Решать вопрос о восстановлении производства кинескопов в России уже поздно, многие западные фирмы уже снимают их с производства. На рубеже веков на первое место среди средств отображения вышли жидкокристаллические (ЖК) дисплеи и плазменные плоские панели для больших экранов.

Мировым лидером по производству ЖК-дисплеев является компания L.G.Philips LCD (совместное предприятие южнокорейской фирмы L.G и голландской компании Philips). Второе место у корейской компании Samsung Electronics. Следом идет японская фирма Sharp. Ежегодные инвестиции в производство ЖК-дисплеев в мире составляют около 10 млрд. долл. Цены на телевизоры с ЖК-экранами непрерывно падают.

Растет производство плазменных панелей. Доля плазменных панелей для телевизоров с диагональю 90 см и более составляет 90%. Ведущие мировые производители плазменных панелей — японская компания Matsushita Electric Industrial (бренд Panasonic) и южнокорейская LG Electronics. Ожидаемый ежегодный мировой спрос на плазменные панели в 2008 году составит 12 млн. штук.

В США разработан телевизионный экран по новой технологии (Field Emission Display). Дисплей состоит из большого числа углеродистых наноэлектронных лучевых трубок и жидкокристаллического экрана. Такие экраны по своим качественным показателям, в том числе по яркости изображения, потребляемой энергии и цене будут превосходить ЖК-дисплеи и плазменные панели. Однако на пути к серийному производству предстоит еще решить ряд технологических проблем по выращиванию миллионов одинаковых нанокристаллов на одной панели.

Отечественная промышленность не обладает ни одной из перечисленных технологий для производства телевизионных экранов. Хотя в России над этими проблемами работают в рязанском «НИИ газоразрядных приборов

«Плазма», фрязинском «НИИ «Платан», саратовском «НИИ «Волга», ЗАО НПП «Русс ПЭ» и др., до серийного производства еще далеко. И это является одной из больших проблем нашей электронной промышленности.

Необходимо иметь в виду, что экран будущего телевизора должен воспроизводить также и компьютерную информацию (VGA — Video Graphics Array, SVGA — Super Video Graphics Array, XGA — eXtended Graphics Array, от 640х480 пиксел до 1024х768 пиксел), что с увеличением экрана требования к качеству и четкости изображения возрастают (от 760х575 пиксел до 1920х1080 пиксел с прогрессивной разверткой 4:3 и 16:9, ТВЧ). Яркость должна быть не менее 350 кд/м².

В заключение еще раз хочется поблагодарить своих коллег и друзей из электронной промышленности за длительную и самоотверженную работу на благо нашего Отечества и почтить память безвременно ушедших от нас.

Выросло новое поколение специалистов в области электроники. Перед ними стоит благородная задача по восстановлению утерянного, но уже на современном технологическом уровне. Я верю в успешное решение этой трудной проблемы. Так пожелаем им удачи!

Литература

- Кукк К.И., Соколинский В.Г. Передающие устройства многоканальных радиорелейных систем связи. — М.: Связь, 1968.
- Оксидный катод. Сборник трудов международного конгресса, посвященного 50-летию открытия оксидного катода/Под ред. Б.М. Царева — М.:Изд-во иностранной литературы, 1957.
- Гринкруг М.Ю., Кукк К.И., Липсман Ф.П. Авторское свидетельство № 24206 от 09.05.62 г. «Устройство для осуществления усиления СВЧ-колебаний до больших мощностей с использованием схем сложения».
- Гринкруг М.Ю., Кукк К.И., Липсман Ф.П. Параллельная работа ЛБВ в мощном СВЧ-усилителе. — Специальная радиоэлектроника, 1962, вып. 6/13.
- Кукк К.И. Оценка предельных возможностей мостовых схем сложения колебаний. — Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника радиосвязи», 1972, вып.5.
- Военно-промышленный комплекс/Под ред. О.Д. Бакланова, О.К. Рогозина. — М.: Ладога-100, 2005.
- «Requirements for Technical Parameters of Hybrid Analog and Digital Transmitters Suitable for both Analogue and Digital TV Broadcasting», Document 6E/TEMP/59-E, 26 September 2001. Working Party 6E. Russian Federation.
- Кукк К.И. Опытная зона в Нижнем Новгороде. — Вестник связи, 2000, № 11.
- Авдонин Б.Н., Мартынов В.В. Электроника. Вчера...Сегодня. Завтра? — Москва, 2005.
- Борисов Ю.И. Отечественная электронная промышленность и компонентная база. Перспективы развития — Электроника. НТБ, 2006, № 2.
- Борисов. Ю.И. Стратегия российской электроники. Повторение пройденного или новый шаг? — Электроника. НТБ, 2006, № 4.
- Кукк К.И. Новые шаги цифрового телерадиовещания. — Install Pro, 2004, № 3 (28).
- Кукк К.И. Микроэлектроника для цифрового телерадиовещания. — Chip News, 2005, № 8.
- Листов В.Н. О возможных новых свойствах фильтров цепочечных схем. — Автоматика и телемеханика, 1939, № 6.
- Белецкий А.Ф. Расчет фильтров по рабочим параметрам. Сборник научных трудов. — Лаборатория проблем проводной связи, 1953, № 2.
- Зелях Е.В., Великин Я.И. Узкополосные фильтры с пьезокварцевыми резонаторами. — Радиотехника, 1946, № 7-8.
- Багдасарян А.С., Карапетян Г.Я. Импедансные фильтры на поверхностных акустических волнах. — М., 1998.



3.6. Некоторые аспекты создания систем и средств связи и передачи информации

В.И. Борисов, *член-корреспондент РАН*,
Б.Я. Осипов, *кандидат технических наук*

Связь, радиотехнические и радиоэлектронные системы, как ни одна другая область науки и техники, влияют на формирование и образ жизни общества, на уровень взаимоотношений как между государствами, так и внутригосударственными структурами и отдельными людьми.

Современные радио и телевидение, мобильные системы связи, всемирная система общего пользования — Интернет, компьютерные системы пронизывают всю современную жизнь общества и являются важнейшей его составляющей. Именно этим объясняются востребованность и высокие темпы развития систем и средств передачи информации как общего пользования, так и специального назначения, особенно в последние десятилетия.

Рассмотрение вопросов развития систем и средств связи возможно в двух плоскостях: научной и прикладной. Научные аспекты развития этих систем затрагивают относительно узкий круг специалистов, исследующих теоретические основы проблемных, как правило, частных вопросов. Прикладные аспекты развития систем передачи информации нацелены на конкретные решения тех или иных потребностей общества, на обеспечение жизненных удобств, безопасности как отдельного человека, так и государства в целом и потому не безразличны большинству членов общества.

В статье рассматриваются такие разработки систем связи, которые создавали новые возможности, новые качества потребительского характера и закладывали основы дальнейшего их совершенствования. Разработки были направлены на создание систем, которые имеют большую дальность действия; обеспечивают надежную связь в сложных условиях помеховой обстановки; конфиденциальность или скрытность передаваемой информации; удобство пользования большим количеством корреспондентов; передачу различных форм информации: речи, данных, изображений, документальной информации и т.д., выполненных в приятном и удобном для потребителя дизайне и не вызывающих у него отрицательных эмоций.

Это относится к системам и средствам связи и передачи информации как гражданского, так и военного профиля.

На технический уровень и развитие радиоэлектронных систем влияют как потребности общества, так и достижения науки и техники на данный период. Поэтому принято рассматривать поэтапное (во времени) их развитие. Технику радиосвязи до 1950-х годов, базировавшуюся на громоздких лампах, крупногабаритных узлах избирательной селекции и тяжелых трансформаторах, в том числе средства телефонной связи и военные радиостанции Второй мировой войны, условно принято относить к средствам связи 1-го поколения.

Не претендуя на исчерпывающие исследования вопросов развития современных систем и средств передачи информации в целом, рассмотрим некоторые аспекты этой проблематики на примере развития систем 3-х направлений подобных систем, разрабатываемых институтом в разные периоды времени. Рассмотрение целесообразно проводить по крайней мере для

трех временных периодов: первый — до перестройки (1955—1985 гг.), второй — годы распада СССР, отхода от плановой социалистической системы (1986—1999 гг.), третий — начало подъема страны (2000—2006 гг. и далее).

Среди всего многообразия разработок института (ныне ОАО «Концерн «Созвездие») можно выделить некоторые, которые оказались пионерскими в своей области, в которых закладывались новые решения, разрабатывалась новая теория, новые принципы и методы передачи информации. Эти разработки обеспечивали некоторый качественный прорыв в технике, зачастую не только своего направления.

Первые работы (институт организован в мае 1958 года) были направлены на создание специальных радиолиний передачи данных между центром обработки радиолокационной обстановки (впервые создаваемых наземных комплексов противовоздушной, а в дальнейшем противоракетной обороны) и пусковыми установками (ПУ). По этим радиолиниям должна была передаваться информация о всех воздушных объектах, обнаруженных радиолокационной станцией (РЛС) дальнего обнаружения в охраняемой зоне, на пусковые установки и РЛС ближнего радиуса действия (РЛС сопровождения), с распределением целей по различным пусковым установкам, текущим координатам целей, командам на пуски ракет и т. д. Отечественных прототипов подобных систем не было и все создавалось впервые. Параллельно велись работы по созданию системы радиолиний для двух различных комплексов ПВО. Эти радиолинии известны под названием «Круг» и «Краб». Они имели некоторые общие черты, такие как передача кодированной информации, обеспечивающей поочередное и многократное получение каждой пусковой установкой информации с локатора дальнего обнаружения и ответную передачу информации с пусковых установок, работа в единой временной диаграмме, формируемой вычислительным центром комплекса, и общий алгоритм работы комплекса в целом.

Однако все остальное было разным — объемы передаваемой информации, построение временных диаграмм, расположение объектов комплексов на местности, дальности действия радиолиний, размещение аппаратуры радиолиний передачи данных совместно с другой аппаратурой и т.д. Это привело к необходимости создания двух различных систем радиолиний передачи данных с максимальным применением унифицированных решений и элементной базы.

В радиолиниях «Круг» и «Краб» использовалась импульсно-кодовая модуляция. В качестве активной элементной базы применялись новые для того времени малогабаритные «пальчиковые» лампы и в некоторых решениях использовались только что появившиеся полупроводниковые приборы.

При работе над комплексом радиолиний «Краб» столкнулись с проблемой преодоления огромного динамического диапазона уровней сигналов от различных пусковых установок, и, вследствие этого, необходимостью быстрого (на микросекундном уровне) восстановления полной чувствительности приемников при переходе с приема от близкорасположенной пусковой установки (ПУ) (с большим уровнем сигнала) к приему от дальней ПУ (с малым уровнем сигналов). Это требование оказалось принципиальным и трудным для реализации, потребовались неординарные решения по автоматической регулировке усиления (APУ) со сбросом после каждого сеанса работы с кон-



кретной ПУ и быстрого установления АРУ в начале каждого сеанса. Весьма трудным оказалось и выполнение конструктивно-технологических требований, в частности, обеспечения передачи информации при движении объекта, на котором размещалась аппаратура, т.е. обеспечение виброустойчивости аппаратуры (что подтверждалось испытаниями ее на вибростенде в течение не менее 4-х часов).

В комплексе «Круг» при разработке были другие проблемы. Одна из них состояла в том, что на пусковой установке в одном контейнере размещалась аппаратура радиолинии передачи данных и формирователь сигналов РЛС, создающей импульсные помехи в широком диапазоне частот. Эти помехи полностью блокировали работу приемных устройств радиолинии передачи данных. После исследований удалось найти решение, которое вылилось в разработку специального параллельного широкополосного приемного тракта, в формирование бланкирующего сигнала и запираение с его помощью основного приемного тракта на время действия импульсной помехи (вырезание помехи из принимаемого сигнала). Это решение было новым шагом в борьбе с импульсными помехами. Радиолинии передачи данных «Круг» и «Краб» прошли все виды испытаний отдельно и в составе комплексов ПВО, были приняты на вооружение и выпускались на серийных заводах более 15 лет до тех пор, пока не была создана и принята новая унифицированная система передачи данных «Эвольвента».

Одновременно с разработкой радиолиний «Круг» и «Краб» в смежных подразделениях велись работы по созданию широкодиапазонной танковой радиостанции УКВ-диапазона «Магнолия» и радиостанции КВ-диапазона «Выстрел». В это же время зарождались и прорабатывались идеи создания территориальной системы общего пользования «Алтай».

Радиостанция «Магнолия» (Р-123М) разрабатывалась для замены радиостанции Р-113, работающей в диапазоне 20-22 МГц с разносом частот между соседними каналами 50 кГц.

Требования, предъявляемые к ней при разработке:

- широкий диапазон 20-48 МГц;
- высокая чувствительность (не хуже 1 мкВ);
- автоматическая установка рабочей частоты (без подстройки) на ряде каналов при работе на штыревые антенны (от 1 до 4 м длины);
- автоматическая настройка согласующего устройства передатчика с антенной во всем заданном диапазоне частот;
- наличие встроенного в единую конструкцию 50-Вт передатчика без принудительного охлаждения;
- обеспечение работоспособности аппаратуры в интервале температур от -50 до 50°C;
- сохранение работоспособности радиостанции при воздействии ударов в 120 g (ударопрочность 120 g);
- жесткие требования по габаритам.

Для выполнения всех этих требований были необходимы оригинальные решения буквально во всем: и в выборе экономичного, но эффективного схемопостроения приемника и передатчика, и в создании высокостабильного термостатированного генератора плавного диапазона (элементы генерато-



ра изготавливались из материалов с малым температурным коэффициентом расширения, например конденсатор переменной емкости из инвара (ковар)). Форма конденсатора была выбрана такой, чтобы можно было обеспечить максимальную линейность шкалы. Были применены высокочастотные катушки из высокочастотной керамики с воженными индуктивностями.

Большие трудности возникли с разработкой 10-контурного фильтра (ФСС) для обеспечения избирательности приемника, так как кварцевых фильтров в то время не было.

Для обеспечения точной настройки всех контурных систем радиостанции был разработан уникальный для того времени 12-секционный конденсатор переменной емкости (по 6 секций для каждого из двух поддиапазонов). Все высокочастотные высокочастотные контуры были выполнены на высокочастотной керамике с экранированием. ВЧ-платы были также изготовлены из керамики. Все это позволило добиться высоких параметров по избирательности приемника и побочным излучениям передатчика.

Неординарным для того времени решением было размещение согласующего антенного устройства внутри радиостанции. Большую проблему пришлось преодолевать в части обеспечения индикации частотной настройки (световой и стрелочной) во всем диапазоне частот. В радиостанции была применена оригинальная прецизионная фотошкала с индивидуальной автоматический градуировкой для каждой радиостанции по калибратору с точностью до 100 Гц.

Серьезной проблемой была разработка прецизионной механики для механизмов автоматической установки частоты и САУ, детали которой требовали обработки при изготовлении по 1 классу точности. В результате, все управление установкой четырех заранее подготовленных и двух оперативно устанавливаемых каналов сводилось к простому повороту переключателя, далее все устанавливалось автоматически при помощи специально разработанного низкооборотного электромотора. В качестве активных элементов использовались миниатюрные лампы и только несколько имеющихся на то время полупроводниковых приборов.

«Магнолия» (в дальнейшем Р-123М) была принята в эксплуатацию и с 1964 года начала выпускаться серийно. Радиостанция Р-123М (рис. 3.6.1) оказалась настолько удачной разработкой, что выдержала проверку временем. Почти 30 лет ею оснащались бронетанковые войска.

В известном журнале *Jane's Military Communications* за 1986 год отмечалось, «что эта аппаратура демонстрирует пример хорошего инженерного проектирования и надежной простой конструкции в условиях ограниченного набора компонентов, многие из которых полностью устарели по западным стандартам. Проведенные с этой радиостанцией испытания (специалистами западных стран в конце 1970 — начале 1980-х годов) свидетельствуют о том, что она хорошо функционирует, имеет высокий показатель наработки на отказ...».

В конце 1950-х годов стало очевидным, что локальные системы ведомственной связи не эффективны и не обеспечивают связь с объектами, находящимися в движении или в местах, где отсутствовала телефонная связь. Системы строились на базе существующей телефонной связи и отдельных радиостанций (КВ- и УКВ-диапазонов). Институту (совместно с рядом



Рис. 3.6.1. Радиостанция Р-123

предприятий-соисполнителей) была поручена разработка первой в стране системы радиотелефонной связи общего пользования «Алтай» с автоматическим выходом в телефонную сеть. Эта система строилась по принципу централизованной связи. В ее состав входила центральная станция и периферийные абонентские станции. Подобных систем в мире еще не было, поэтому все встречающиеся проблемные вопросы решались по ходу их возникновения. Прежде всего, это были вопросы сопряжения с обычной телефонной связью как в плане общих принципов вызова корреспондентов, так и поддержания связи в движении, одновременного вызова от нескольких корреспондентов и ведения с ними независимой дуплексной связи и т.д. Сложными оказались вопросы обеспечения связи во время движения корреспондентов в городских условиях, когда из-за экранизации и переотражений сигналов от строений возникали эффекты «многолучевости» с замираниями сигналов, «мертвые» зоны. Вопросы равнодоступности связи требовали построения многоканальной аппаратуры центральной станции. В начале 1960-х годов первая в мире такая система была создана, проведены ее испытания в Москве, а в 1963 году она была принята в эксплуатацию. Подобная американская система IMTC была введена в эксплуатацию в 1964 году. Созданная первая система радиотелефонной связи общего пользования «Алтай» работала в диапазоне волн 150–175 МГц, имела 16 равнодоступных каналов и была способна обслужить одновременно до 400 абонентов. Это была система прообраза современных сотовых систем общего пользования. Радиус действия системы 40–50 км. Уже к концу 1960-х годов система «Алтай» была развернута и функционировала более чем в 30 городах страны.

В 1980 году в Москве проводилась всемирная летняя «Олимпиада-80». К этому времени была проведена модернизация системы общего пользования «Алтай» с целью не только расширения количества обслуживаемых кор-

респондентов, но и обеспечения с ее помощью всех мероприятий «Олимпиады-80». Модернизированная система («Алтай-3М») имела значительно большие возможности. Она позволяла вызывать и вести связь с любой мобильной абонентской станцией, как с мобильным абонентом, так и с любым абонентом городской телефонной связи, а также обеспечивала связь с любого телефона городской телефонной сети с радиоабонентом. Абонентские станции устанавливались на отечественных легковых автомобилях всех марок. Система «Алтай-3М» была введена в эксплуатацию в начале 1980-х годов, более чем в 300 городах страны.

Радиотехнические системы «Круг», «Краб», «Магнолия», «Алтай» были первыми разработками института в этом направлении, и они создали предпосылки для поиска неординарных путей дальнейшего их развития.

В 1960—1970-х годах в западных странах интенсивно разрабатываются средства разведки и радиоэлектронного подавления (РЭП) систем связи и управления противника. В свете этого возникла задача создания таких систем передачи информации, которые могли бы сохранять работоспособность в условиях организованного радиопротиводействия. Выяснилось, что создаваемые средства радиопротиводействия могут легко забивать помехами существующие узкополосные системы связи. Среди наиболее опасных систем радиопротиводействия оказались средства, устанавливаемые на самолетах или других объектах воздушного базирования, которые могли создавать прицельные по частоте помехи. Такие средства РЭП имели изначально энергетическое преимущество (относительно наземных систем передачи данных из-за высокоподнятого источника помех) на несколько порядков, и «силовые» методы защиты от их воздействия для используемых узкополосных систем были неприемлемы.

Начались интенсивные работы по поиску путей создания идеологии построения защищенных от РЭП систем, новых алгоритмов работы, новых форм сигналов, методов их передачи и обработки и т.д. Были проведены теоретические и прикладные исследования новых методов передачи информации и найдены решения практической реализации как в системном, так и в аппаратном плане, положившие начало новому этапу совершенствования уже существующих и вновь создаваемых систем.

К одной из таких систем относится унифицированная система радиолиний передачи данных «Эвольвента» для комплексов ПВО. Система «Эвольвента» должна была обеспечивать передачу данных между объектами комплексов ПВО в условиях практически любого активного радиопротиводействия. «Эвольвента» являлась последовательным развитием и совершенствованием ранее созданных радиолиний «Круг» и «Краб». В процессе проработки стала очевидна необходимость построения систем передачи информации с использованием сигналов с большой базой или использования режимов «распределенной» передачи сигналов в большом диапазоне частот. Это направление в начале 1960-х годов было слабо исследовано даже в теоретическом плане. Проведенные в институте исследования положили начало созданию систем передачи информации с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Смысл применения ППРЧ заключался в том, чтобы уйти от прицельных помех, создаваемых средствами РЭП воздушного базирования, и заставить

противоборствующую сторону применять неэффективную заградительную помеху, равномерно распределенную в широком диапазоне частот и имеющую малую спектральную плотность в узкополосном парциальном канале.

Известно, процесс радиоэлектронного подавления распадается на ряд этапов: поиск и обнаружение разведываемого сигнала, его идентификация, принятие решения о подавлении, настройка передатчика на нужную частоту и т.д. Все эти процессы требуют времени. Идеальная система передачи данных с программной перестройкой частоты — та, которая может работать в условиях практически нулевого времени реакции средств РЭП, т.е. практически мгновенной постановки прицельных помех. Следовательно, для системы с ППРЧ необходима была такая скорость перестройки рабочей частоты, при которой время работы на каждой частоте было бы меньше времени постановки помехи на каждой текущей рабочей частоте.

Анализ показал, что для успешной работы комплексов ПВО и сохранения работоспособности систем передачи данных комплексов необходимо работать на фиксированной частоте не более 150–200 мкс. Это время и было положено в основу дальнейших разработок и реализовано в системе передачи данных «Эвольвента», работающей в режиме быстрой перестройки рабочей частоты.

Разработка системы передачи данных с ППРЧ для комплексов ПВО (со значительным количеством неравномерно распределенных на местности пусковых установок и обменивающихся большим объемом информации), работающей в режиме перестройки рабочей частоты через каждые 100 мкс, оказалась крайне сложной задачей как по построению приемных и передающих устройств, осуществлению и поддержанию синхронизации, созданию сверхбыстродействующих синтезаторов частоты, обеспечению высокой частотной стабильности задающих генераторов и малым временем установления частоты и т.д., так и по обеспечению надежной передачи самой информации, защиты от станционных и других помех и т.д.

Создание впервые в мире системы радиосвязи с быстрой ППРЧ (10–20 тысяч скачков в секунду) определило на десятилетия облик будущих подобных систем. Созданная система «Эвольвента» была принята в эксплуатацию и даже на сегодня нет ей зарубежных или отечественных аналогов. В дальнейшем была проведена модернизация системы с расширением рабочего диапазона ППРЧ (более 100 МГц вместо 10 МГц в «Эвольвенте»). Введена адаптация к помеховой обстановке в точке приема, применены антенны с электронным управлением их диаграммы направленности. Система выпускается серийно и эксплуатируется до настоящего времени.

Не менее значительными являются работы в институте по созданию специальных систем передачи данных с шумоподобными сигналами (ШПС). Систем связи с ШПС практически в начале 1970-х годов в мире не было, хотя теоретические исследования по широкополосным, шумоподобным сигналам уже были опубликованы. Требовалось создание высоконадежных систем передачи информации с защищенностью от любых видов помех — от шумовых помех с высокой спектральной плотностью, от сигналов мощных узкополосных радиостанций, от помех организованного радиопротиводействия. Такие работы по созданию различных систем передачи информации с шумоподобными сигналами проводились в институте с начала 1970-х годов. Исследовались вопросы теории шумоподобных сигналов, ансамблей сигналов, их взаи-

мокорреляционных свойств, проводились прикладные исследования и поиск практических путей генерирования псевдослучайных последовательностей, методов обработки ШПС, получения свертки сигналов. Разрабатывались методы поиска и обнаружения сигналов и оптимизации их по быстродействию, синхронизации, защите от мощных сосредоточенных и ретранслированных помех и т.д. Создавались согласованные фильтры для ШПС сигналов, многоканальные корреляторы, блоки защиты и многое другое.

Институтом, наряду с разработкой наземных систем передачи данных с шумоподобными сигналами, были созданы различные приемопередающие устройства и модемы для радиостанций космической связи, использующих шумоподобные ШПС для обеспечения высокой помехоустойчивости каналов спутниковой связи при воздействии различного вида естественных и преднамеренных помех.

В период с 1974 по 1977 год была разработана унифицированная широкополосная аппаратура «Кулон-Ш». Она обеспечивала помехозащищенность порядка 20 дБ при воздействии флуктуационных и других помех и порядка 30 дБ при воздействии узкополосных помех.

Специфика систем с ШПС — они сложны и требуют применения самой современной элементной базы. Вышеупомянутые системы в последующие годы модернизировались, переводились на новую элементную базу. В результате повышались помехоустойчивость, скорость передаваемой информации. В работах широко использовались интегральные микросхемы различной степени интеграции, толстопленочная технология монтажа, специализированные микросборки.

В институте, начиная с конца 1950-х годов, велись разработки КВ-радиостанций, в частности радиостанция «Выстрел». Она разрабатывалась на той же элементной базе, что и радиостанция «Магнолия». Для связи в радиостанции использовалась одна боковая частота. Эта радиостанция оказалась прообразом будущих радиостанций КВ-диапазона.

В середине 1970-х годов была принята в эксплуатацию разработанная институтом глобальная КВ-система связи для обеспечения передачи информации между удаленными объектами, одна из первых автоматизированных адаптивных систем связи КВ-диапазона. Она предназначалась для одновременного обслуживания до 150 корреспондентов на расстояниях до 9000 км без ретрансляции.

Как известно, КВ-канал является нестационарным. Для него характерны: частотно-суточная зависимость прохождения радиоволн между двумя любыми точками земного шара, замирание сигналов (фединг), зависимость от расстояний, от географической широты расположения корреспондентов и т. д. Поэтому создание системы круглосуточного надежного обмена информацией в КВ-диапазоне являлось, да и сейчас является, проблемной задачей.

В процессе разработки была создана автоматизированная система постоянного анализа прохождения радиоволн в направлении каждого корреспондента, анализа частотно-зависимого уровня помех в точке приема, определения оптимальной частоты передачи и приема информации для каждого корреспондента, учета временной статистики и обеспечения для любого времени наилучших частот для связи. Для автоматизированного статистического анализа частотных каналов, выбора оптимальных частот по распростране-

нию и по станционным помехам для каждого корреспондента, автоматизации управления процессом ведения связи, обеспечения заданной достоверности информации была разработана специальная ЭВМ с соответствующим программным обеспечением. Для передачи информации были использованы многопозиционные сигналы. При этом использовалось кодирование с исправлением одиночных ошибок и реализован режим переспроса искаженной части сообщения (методом переспроса и мажоритарного принятия решения). Для реализации оптимального приема был специально разработан уникальный для того времени многополосный 32-позиционный согласованный кварцевый фильтр с решающей схемой автовыбора максимального сигнала.

Существенным вкладом в работоспособность системы явилось создание уникального для того времени многоканального генератора опорных частот, суммарная долговременная нестабильность которого за год составляла $1 \cdot 10^{-8}$.

Для обеспечения круглосуточного приема вызова от 150 корреспондентов была разработана автоматизированная помехоустойчивая система вызова с системой отображения, указывающая адрес вызывающего корреспондента и срочность связи. Такой же вызов предусмотрен и в сторону 150 корреспондентов одновременно (циркулярный), либо избирательный на конкретного корреспондента.

В целях обеспечения бесперебойной круглосуточной работы в системе использовалось «горячее» аппаратурное резервирование.

Многолетняя эксплуатация системы подтвердила ее высокие эксплуатационные свойства. Система КВ-связи (рис. 3.6.2) обеспечивала надежность связи 0,8 при достоверности передачи информации не хуже 0,98. За 20-летнюю эксплуатацию система показала высокие эксплуатационные качества, практически не было трудностей установления и ведения связи, как в сторону центра, так и в сторону корреспондента.

Период времени с 1986 до конца 1990-х годов в связи с перестройкой, распадом страны был периодом всеобщей борьбы за выживание, поиска средств к существованию, к выполнению работ менее престижного уровня.

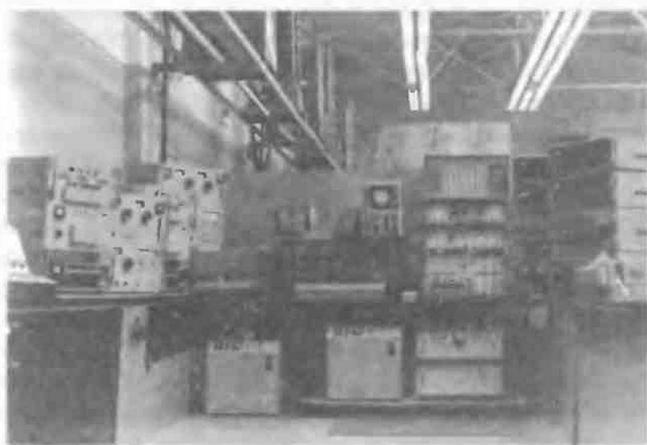


Рис. 3.6.2. Комплекс аппаратуры КВ-системы (1975 г.)

Многие предприятия распались на мелкие фирмы или прекратили свое существование. Воронежский НИИ связи пережил это трудное время и благодаря усилиям, активности и находчивости руководства института, благодаря выдержки коллектива сотрудников сохранил основной кадровый состав и тем самым свой научно-технический потенциал. Даже в этот тяжелый период проводились работы практически по всем уже ранее упомянутым и новым направлениям. Были начаты исследования по дальнейшему совершенствованию системы передачи информации для новых комплексов ПВО.

По специальным системам передачи данных с ШПС проводились работы по переводу аппаратуры на новую элементную базу с одновременным улучшением эксплуатационных характеристик. В частности, была проведена глубокая модернизация аппаратуры «Кулон-Ш» в рамках темы «Кулон-ШМЗ». В 1990 году была создана и внедрена в серийное производство унифицированная аппаратура «Кулон-ШМЗ» для системы спутниковой связи ЕССС-2. В отличие от аппаратуры «Кулон-Ш» в аппаратуре «Кулон-ШМЗ» для повышения разведзащищенности и общей помехоустойчивости применена периодическая псевдослучайная последовательность (ПСП Гоулда) только для начальной синхронизации, а передача информации осуществлялась по «непериодической ПСП» со сменой формы (структуры) от криптостойкого датчика случайных чисел (непериодическая ПСП имела минимальный период повторения несколько лет). В изделии «Кулон-ШМЗ» реализованы большие значения тактовой частоты ШПС ($f_T = 19,2$ МГц), значительно увеличена база сигналов (до 32000) и существенно повышена помехоустойчивость спутникового канала. Кроме того, в изделии «Кулон-ШМЗ» для уменьшения потерь в ретрансляторе реализован режим работы с обработкой сигнала ШПС на борту ИСЗ (ОСБ). В результате помехозащищенность по входу ретранслятора в режиме ОСБ составляет 30 и 24 дБ по входу земной станции при воздействии помех любого вида.

На базе действующей системы КВ-связи разработан модернизированный вариант системы. Главные его достоинства: повышение уровня автоматизации, прежде всего автоматизированный выбор и переход на лучшую частоту без участия оператора, повышение скорости передачи информации с 50–200 до 2400 бод, увеличение надежности связи до 0,98 при информационной вероятности 0,995. Эти параметры обеспечивались за счет применения более совершенных кодов Рида-Соломона, оптимального регулирования скорости передачи информации в зависимости от качества канала связи, за счет перемежения информационных посылок во временном интервале. Одновременно решались проблемы повышения надежности аппаратуры, снижения веса и габаритов за счет применения новой элементной базы. Для выполнения всех процедур по автоматизации процессов анализа качества каналов, выбора и перехода на лучшую или заранее подготовленную частоту, адаптации по виду кодирования, скорости передачи информации, автоматического документирования сеансов связи и переданной информации и т. д. был разработан специальный блок управления с модемом. Применение новейшей (для того времени отечественной элементной базы) позволило уменьшить габариты и вес аппаратуры в несколько раз. Кроме того, было реализовано требование по управлению старым парком приемных и передающих средств. Модернизированный вариант системы КВ-связи (рис. 3.6.3) был принят в



Рис. 3.6.3. Комплекс аппаратуры модернизированной КВ-системы связи (1995 г.)

эксплуатацию в 1995 году и с тех пор обеспечивает бесперебойную, надежную связь с корреспондентами, удаленными на расстояния до 9000 км.

В этот же период времени начались исследования по новому для института направлению — созданию систем и средств радиоразведки и радиопротиводействия, приведшие в дальнейшем к разработке целой философии радиопротиводействия, эффективных методов противодействия и созданию соответствующей аппаратуры.

Серьезным достижением того времени было не только продолжение ранее начатых работ по созданию комплекса радиостанций для тактического звена ВС РФ, но и их развитие в последующем в рамках темы «Акведук». Не останавливались (но велись в значительно меньшем темпе) и поисковые работы по созданию современных отечественных систем общего пользования, которые были бы способны конкурировать с зарубежными системами мобильной связи, заполняющими пустой российский рынок.

В последние годы продолжены работы по дальнейшему совершенствованию автоматизированной системы связи КВ-связи с расширенными системными возможностями, интеллектуальными методами управления, автоматическим обеспечением передачи запрашиваемой информации, информационного обмена между корреспондентами системы и т.д. Проводимые в начале XXI века исследования связаны с дальнейшим повышением скорости передачи информации до 9600 бит/с с одновременным обеспечением высокой достоверности и надежности связи.

Применение новейшей элементной базы при этом изменит облик аппаратуры и позволит резко уменьшить массогабаритные характеристики аппаратуры используемой системы.

2000–2006 годы были годами восстановления утраченной активности по изучению последних зарубежных и отечественных достижений в области науки и техники, освоению новейших компьютерных технологий автоматизированного моделирования и проектирования как систем, так и аппаратурных реализаций, освоению новых технологий производства аппаратуры.

Для создаваемых в эти годы радиотехнических комплексов и систем характерным является применение новейших методов передачи информации, автоматизированного анализа помеховой обстановки и применение адаптивных методов по борьбе с высокоорганизованным радиопротиводействием, в том числе использование адаптивных антенн с электронным управлением их диаграмм направленности, интеллектуального управления всей совокупностью используемых средств связи, входящих в систему, применение микропроцессорных систем для обработки информации, использование многофункциональной элементной базы (отечественной и зарубежной) с перепрограммированной логикой и т.д. Из всей совокупности проводимых разработок коснемся только трех: системы СПД «Туф-М», комплекса радиосвязи «Акведук» и Единой системы управления тактического звена (ЕСУ ТЗ).

СПД «Туф-М» (и модификация «Панцирь») — это новая, более совершенная система передачи телекодовой и оцифрованной речевой информации для модернизированных и новых комплексов ПВО (рис. 3.6.4).

В системе СПД внедрены интеллектуальные методы передачи информации и ее обработки с использованием биортогональных систем когерентных сигналов ППРЧ с синхронизацией на каждом скачке частоты в сочетании с блочным перемежением элементов информации и внутрисимвольным кодированием. Все процессы формирования сигналов, осуществления программной перестройки рабочей частоты, обработки сигналов и принятия реше-

ний, процессы взаимодействия с внешней аппаратурой и т.д. полностью автоматизированы. В аппаратуре «Туф-М» и «Панцирь» используется самая современная элементная база и обеспечивается оперативное перепрограммирование режимов работы (например, смена псевдослучайной последовательности, используемой для ППРЧ, изменение параметров средств криптозащиты, управление маршрутизацией информационного обмена с объектами комплекса). Аппаратура обеспечивает непрерывный режим работы как на стационарных, так и подвижных средствах базирования.

В этот же период разработан комплекс унифицированных средств адаптивной радиосвязи «Акведук», предназначенный для обеспечения автоматизированной засекреченной радиосвязи в коротковолновом и ультракоротковолновом (КВ-УКВ) диапазонах волн тактического звена управления, с

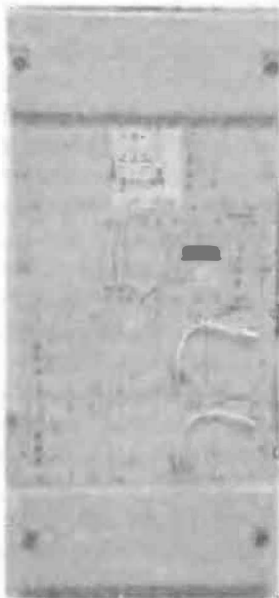


Рис. 3.6.4. Устройство СПД «Туф-М»



выходной мощностью передатчиков радиостанций от 0,1 до 100 Вт, в портативном, носимом, возимом вариантах. Возможности комплекса значительно расширены за счет разработанных радиостанций ДЦВ-диапазона и многоканальных радиостанций. Комплекс «Акведук» имеет в своем составе полный набор радиостанций, обеспечивающих связью все звенья управления дивизии от солдата до командира (штаба) дивизии и взаимодействие с другими подразделениями и частями. Они обеспечивают надежную радиосвязь, передачу открытой и закрытой информации в аналоговой и цифровой форме, передачу данных в любых условиях организованного противодействия. Комплекс радиостанций «Акведук» разработан с использованием всех известных на сегодняшний день новейших методов передачи информации, включая адаптивные методы ведения связи, программную перестройку рабочей частоты (ППРЧ), кодирование и закрытие информации, передачу изображений и фрагментов географических карт. В составе комплекса более 30 видов радиостанций и вспомогательные устройства различного назначения. Радиостанции комплекса перекрывают диапазон частот от 1,5 МГц до 1,75 ГГц. При разработке использована **современная элементная база, применены специализированные аналоговые микросхемы и цифровые микросхемы высокой степени интеграции.**

Для обеспечения передачи информации в условиях высокого радиопротиводействия в радиостанциях «Акведук» используется режим программной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) в широком диапазоне частот со скоростью перестройки 100 скачков/с с псевдослучайной последовательностью переменной длительности.

В особо сложной помеховой обстановке используется передача информации с помощью широкополосных, шумоподобных сигналов с большой базой.

В радиостанциях «Акведук» используется встроенная микроЭВМ, которая обеспечивает автоматизированное управление радиостанцией, осуществляет выбор лучших каналов, формирует псевдослучайные последовательности и обеспечивает работу в режиме ППРЧ, работу радиостанций в многоканальном режиме и осуществляет взаимодействие с внешними ЭВМ.

Используемый в ряде радиостанций многоканальный режим, обеспечивает одновременную передачу аналоговой и цифровой информации с временным разделением. На рис. 3.6.5–3.6.10 представлены некоторые радиостанции из общей совокупности средств комплекса «Акведук».

Радиостанция Р-168-5УН(2) — носимая, УКВ-диапазона с мощностью передатчика 10 Вт дальностью связи до 10 км — предназначена для обеспечения радиосвязи в тактическом звене управления рота-батальон в режимах работы с применением ППРЧ со скоростью перестройки 100 скачков/с, адаптации, многоканальной передачи, в открытом и закрытом криптостойких режимах.

Унифицированные возимые многоканальные средства адаптивной радиосвязи метрового диапазона Р-168-5УТ(2), Р-168-5УТ(2)-25 и Р-168-5УТ(2)-100 предназначены для обеспечения в тактическом звене управления одновременной независимой работы по пяти информационным каналам в аналоговом или цифровом режимах, передачи данных на скоростях 1200 и 2400 бит/с, а также в одноканальном режиме по одному ТЛФ каналу или по цифровому каналу со скоростью 1200, 2400, 4800, 9600 и 16000 бит/с.



Рис. 3.6.5. P-168-5УН(2)

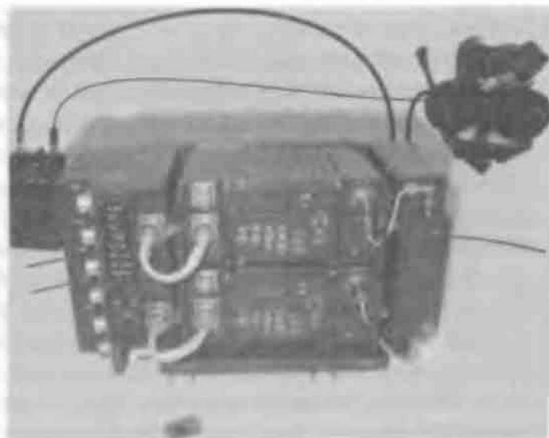


Рис. 3.6.6. Радиостанции УКВ-диапазона P-168- 5-УТ(2)-25 (мощность ПРД -40 Вт) и P-168-0,1УМ (мощность ПРД-0,1Вт)

Для обеспечения передачи информации в условиях организованного радиопротиводействия используется:

- адаптивная связь;
- программная перестройка рабочей частоты (ППРЧ);
- техническое маскирование информации.

Управление каждой из радиостанций может осуществляться как от пультов управления P-168ПУ, P-168СПУ-2, P-168СПУ-3, так и от ЭВМ объекта.

Носимая радиостанция P-168-К-5КДН, КВ-, УКВ- и ДЦВ-диапазонов (мощность передатчика 5 Вт, дальность в КВ-диапазоне 300 км, в УКВ — 10 км, в ДЦВ — 5 км) предназначена для обеспечения связи в звене рота-батальон-полк с применением режимов ППРЧ, адаптации и закрытием передаваемой информации

Радиостанции СВЧ-диапазона P-168-К-МРА предназначены для организации высокоскоростных сетей радиосвязи, а также для обеспечения радиодоступа к проводным СПД, в том числе к Интернет. Радиостанции P-168 МР обеспечивают пакетную передачу информации (в том числе видеоизображения и звука) со скоростью до 11 Мбит/с, автоматическую ретрансляцию информации, техническое маскирование передаваемой информации, адаптивное управление скоростью передачи информации по сквозному каналу. Радиостанции обеспечивают (совместно со специально разработанной аппаратурой АВСКУ, сопряженной с внешней ЭВМ) дистанционное управление сквозным каналом, включая спутниковые радиостанции, отображение состояния каналов связи.

Устройство P-168ПД для передачи цифробуквенных сообщений по КВ-, УКВ- и спутниковым каналам связи имеет в своем составе управляющую микроЭВМ; навигационный приемник; устройства коммутации, синхронизации, кодирования и маскирования информации. Портативные УКВ радиостанции для связи в звене взвод-отделение-солдат обеспечивают открытую и закрытую связь на дальностях до 5 км.

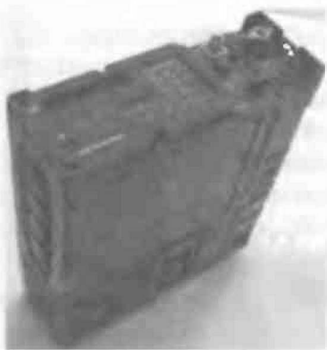


Рис. 3.6.7. Носимая радиостанция Р-168-К-5КДН КВ-УКВ-ДЦВ-диапазонов



Рис. 3.6.8. Радиостанция Р-168 К-МРА

Оснащение радиостанциями комплекса «Акведук» тактического звена МО РФ позволит обеспечить надежную связь в любых условиях боевой обстановки, в том числе в условиях активного радиопротиводействия, и тем самым повысит ее эффективность в конфликтных ситуациях.

Вместе с тем, создание комплекса «Акведук» явилось благоприятной предпосылкой к созданию общей системы управления на уровне тактического звена как одного из главных элементов современного противоборства.

В настоящее время ОАО «Концерн «Созвездие» как головное предприятие (совместно с рядом других организаций) ведет работы по созданию единой системы управления войсками и оружием в тактическом звене управления от солдата до дивизии (ЕСУ ТЗ).

В сегодняшнем мире силовые конфликты приобретают многоликий характер с применением наиболее опасного высокоточного оружия, с большим сосредоточением противоборствующих сил, обладающих высокой маневренностью и технической оснащенностью, высокоорганизованным радиопротиводействием. Вместе с тем, важнейшее значение приобретают действия и каждой отдельной боевой группы (вплоть до отдельного солдата), действующей в интересах выполнения общей задачи по взаимовязанному и скоординированному из общего центра плану. Решение задач управления в современных условиях возможно только на основе современных технологий, обеспечивающих автоматизированные процессы сбора, обработки и доведения оперативной информации о местоположении и состоянии своих сил и сил противника, вплоть до визуализации поля боя, обеспечивающих управление войска-

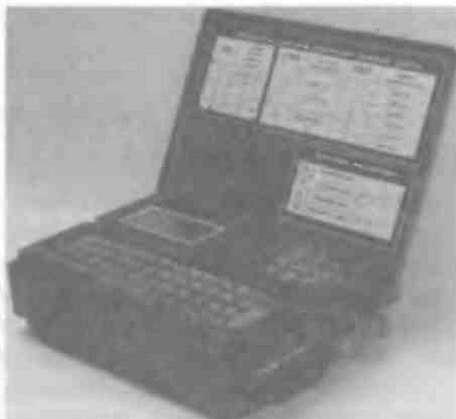


Рис. 3.6.9. Устройство Р-168ПД для передачи цифробуквенных сообщений по КВ-, УКВ- и спутниковым каналам связи

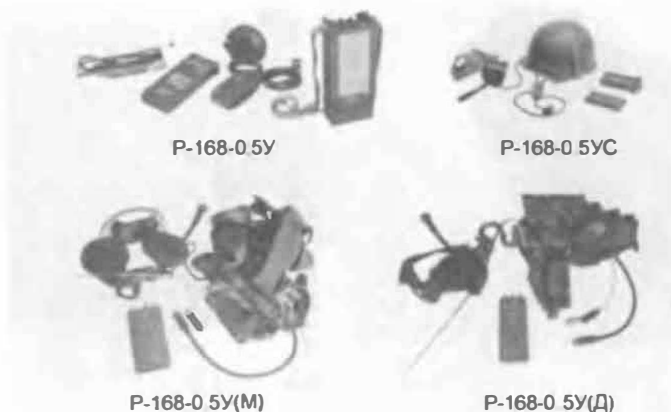


Рис. 3.6.10. Портативные УКВ-радиостанции для связи в звене взвод-отделение-солдат. Радиостанции обеспечивают открытую и закрытую связь на дальностях до 5 км

ми и оружием в реальном масштабе времени, организуя взаимодействие и поддержку, в том числе используя активное радиопротиводействие средств связи и передачи данных противника.

Современная военная доктрина базируется на противоборстве интеллектуальных возможностей сторон, на их способности получать, обрабатывать и применять постоянно изменяющуюся и пополняемую оперативную информацию о своих силах и силах противника. Информационное превосходство является одним из решающих преимуществ в современном силовом конфликте. В этой связи особую актуальность приобретают интегрированные информационно-управляющие системы, в частности, ЕСУ ТЗ. Главной задачей создаваемой системы является повышение эффективности применения сил общего назначения ВС РФ, а также других войск.

ЕСУ ТЗ предполагает решение следующих основных задач:

- обеспечение непрерывного, устойчивого и скрытого управления войсками (силами) и оружием при решении боевых задач в условиях огневого воздействия, радиоэлектронного и информационного противооборства;
- разведку, обеспечение сбора и автоматизированной обработки и передачи данных о своих войсках и войсках противника, визуализацию ситуации, возникающей на поле боя в текущий момент времени, навигационное и временное обеспечение;
- комплексную интеллектуальную поддержку и информационное обеспечение процессов подготовки и принятия решения командиром, а также планирование применения войск (сил) и оружия;
- интеграцию систем информационного обеспечения, управления, связи и обмена данными, навигационное и временное обеспечение и обеспечение их комплексного применения, радиоэлектронной борьбы;
- обеспечение обмена информацией с вышестоящими, подчиненными (приданнными) и взаимодействующими органами управления, система-



ми (комплексами, образцами) вооружения, военной и специальной техники;

- обеспечение моделирования и прогнозирования обстановки и вариантов действий своих войск (сил) и войск (сил) противника применительно к различным решениям командира;
- обеспечение многоуровневой комплексной защиты информации в любых условиях и при любых обстановке, формах и способах применения войск (сил) и оружия.

На сегодняшний день в процессе создания ЕСУ ТЗ:

Разработана архитектура многофункциональной автоматизированной системы управления в тактическом звене. Определен полный состав структурных подсистем, разработан алгоритм их взаимодействия и многоальтернативного использования, разработаны и изготовлены базовые комплекты структурных подсистем.

Разработан комплекс стационарных пунктов управления и подвижных командных и командно-штабных машин различного уровня — от взвода до дивизии (с полным комплектом технических систем и программным обеспечением) и идеология их использования.

В целях расширения возможности оперативного управления созданы переносные и носимые программно-технические комплексы с полным обеспечением функциональных возможностей по управлению.

Созданы унифицированные программно-технические комплексы сопряжения технических средств объектов ЕСУ ТЗ с объектами других войск.

Решение этих задач оказалось возможным благодаря использованию существующих и вновь разрабатываемых новейших:

- средств радиосвязи и систем передачи данных;
- унифицированных вычислительных средств;
- интеллектуальных средств автоматизированного управления;
- общесистемного программного обеспечения;
- взаимоувязанных протоколов информационно-технического сопряжения между различными подсистемами ЕСУ ТЗ;
- современных средств защиты информации;
- современных систем контроля, отображения и документирования.

Создание такой системы как ЕСУ ТЗ позволило с одних позиций подойти к формированию и разработке всех входящих в нее подсистем и отдельной аппаратуры, подчинив их общей задаче эффективного управления войсками и оружием в любой ситуации.

Здесь, по-видимому, уместно отметить, что еще в 1970-х годах с целью обеспечения высокого уровня эффективности руководства войсками вооруженных сил США была разработана концепция «взаимоувязанного» перспективного развития систем боевого управления, связи, разведки и РЭБ» с постепенной их интеграцией в единую структуру C³I (Command, Control, Communication, Intel). В 1980-х и 1990-х годах велись интенсивные работы по реализации этой программы, которая уточнялась, усложнялась и видоизменялась, преобразуясь сначала в C⁴I, а затем в C⁴ISR (Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance).

Этой концепцией C⁴ISR (командование, управление, связь, вычислительная техника, разведка, наблюдение и рекогносцировка) предусматривается создание интегрированной многоэшелонированной информационно-управляющей системы («системы систем») на основе использования космических, стратосферных, атмосферных, наземных и морских стационарных и мобильных информационных и командных управленческих сетей, включающих сети военного Интернета, объединенных стандартизованным программным обеспечением. Эта система решает следующие задачи:

- руководство войсками,
- управление в штабах,
- управление боевыми средствами,
- обеспечение связи,
- оценку ущерба, наносимого противником,
- передачу данных,
- автоматизированную обработку данных,
- поиск цели, обнаружение, сопровождение и наведение,
- опознавание «свой — чужой»,
- строительство сетей связи,
- программное обеспечение,
- разведка,
- наблюдение,
- радиоэлектронную борьбу (РЭБ),
- навигация и определение местоположения.

Совпадение идеологии разработки современных систем управления ЕСУ ТЗ и C⁴ISR очевидно и закономерно. Оно характеризует уровень понимания развития современного мира и обеспечивает паритетные взаимоотношения между государствами.

В заключение следует отметить развитие отечественных систем и средств общего пользования. После создания системы общего пользования «Алтай-3М» и некоторых его модификаций были разработаны ряд ведомственных систем: «Лен», радиально-сотовая система общего пользования «Волемот». Дальнейшего развития эти системы не получили из-за отсутствия бюджетного финансирования.

В институте продолжают (в незначительном объеме) поисковые и прикладные исследования прежде всего в области создания отечественной системы общего пользования на основе CDMA, проводятся исследования как в системном плане, так и в плане аппаратной реализации. Однако без государственной поддержки этих работ и работ по формированию целостной отечественной системы общего пользования, определения ее места и роли, создания сетей, протоколов и т.д. бороться с зарубежным «натиском» будет весьма проблематично.

Следует отметить важное различие в подходах в западных странах и в нашей стране к развитию электронных систем, в частности, систем и средств связи для военных и гражданских нужд. Идеология развития систем связи военного назначения, обеспечивающая управление войсками и оружием, в наиболее развитых странах мира, базируется на достижениях в электронике, системах связи и управления общего (гражданского) пользования (Интер-

нет, компьютерные сети, сотовые системы связи и мобильные многофункциональные телефоны и т.д.). В то же время в нашей стране приоритет был за военными системами, а развитие гражданских электронных систем, в том числе и радиосвязи, осуществлялось по остаточному принципу.

Системы общего пользования, имея большой приоритет в силу огромного рынка сбыта гражданской продукции, приносят очевидную пользу обществу и огромную прибыль фирмам, часть которой идет на дальнейшее развитие новых технологий, на создание конкурентоспособной продукции. Конкуренция же на рынке сбыта продукции требует и обеспечивает высокое качество разрабатываемых средств.

Поэтому все зарубежные фирмы, ведя работы по двум направлениям (по электронным системам общего пользования и по военным системам) всегда имели финансирование разработок, в том числе и по электронной тематике, за счет двух источников: бюджетных (государственных) и частных инвестиций, причем второй источник часто превалировал над первым.

Ни одна крупнейшая фирма, занимающаяся разработкой и выпуском техники, не позволяет себе специализироваться только на выпуске военной техники. Обычно соотношение объемов гражданской и военной продукции лежит в зоне 50–70% гражданской продукции и 50–30% — военной, что обеспечивает независимость развития фирмы на рынке продукции общего пользования.

В нашей стране в отсутствие рыночных отношений разработка как военной, так и гражданской техники осуществлялась за счет бюджетных ассигнований, т.е. не регулировалась спросом населения и не имела частных инвестиций. Именно этим объясняется то, что наши ведущие институты, КБ и заводы были не приспособлены к самостоятельному (не по заказу государства) созданию и выпуску конкурентоспособной гражданской продукции.

Выпуская уникальную продукцию военного назначения, они оказались не в состоянии разрабатывать изделия радиоэлектронной техники общего пользования, в том числе и связи, зарубежного уровня. В этом одна из причин нашего отставания в области высоких технологий, микроэлектроники, систем и средств связи общего пользования.

Другой причиной сегодняшнего состояния в области радиоэлектронных систем общего пользования является резкое сокращение или почти полное прекращение бюджетного финансирования на значительном промежутке времени (что вызвало развал производства, банкротство и прекращение существования многих предприятий, в том числе в области электроники и связи), нарушение связей и коопераций, снижение научного и технического потенциала и т.д. Все это привело к потере темпов развития и освоения новых технологий и, прежде всего, в микроэлектронике, степени интеграции и надежности микросхем, в компьютерных методах проектирования и моделирования систем и средств связи, в технологиях производства аппаратуры и т.д.

И, как следствие, сегодня практически невозможно создавать радиоэлектронные системы современного уровня без использования зарубежных компьютерных программ моделирования и проектирования, зарубежной элементной базы (в частности микросхем большой степени интеграции и требуемой номенклатуры), без использования зарубежной высокоавтоматизированной многофункциональной измерительной техники.

3.7. Вычислительная техника и ее база — электроника

В.К. Левин, *академик РАН*

Взаимосвязь вычислительной техники и электроники охарактеризована во множестве публикаций, в том числе и автором данной статьи. Вместе с тем, на каждом новом этапе развития этих областей так или иначе уточняются оценки, относящиеся к предшествующим этапам, и делаются обобщения, способствующие выявлению тенденций дальнейшего научно-технического прогресса. Автор, занимаясь разработками высокопроизводительной вычислительной техники с 1950 года, оказался в гуще многих событий, связанных с созданием и применением этой техники в нашей стране, участником принятия решений по ряду узловых вопросов ее развития. В представленной статье комментируются некоторые общие вопросы развития вычислительной техники и ее базы — микроэлектроники.

Начало пути

В период с 1935 по 1950 год (предвоенные годы, Вторая мировая война и послевоенное пятилетие) на базе электроники получила развитие техника связи, радиолокация, различные направления автоматизации, и это относилось как к военным, так и гражданским (народнохозяйственным) применениям. В этот период довольно интенсивно развивалась аналоговая вычислительная техника (называвшаяся также техникой непрерывного действия или моделирующей; значительным классом этой техники являлись так называемые дифференциальные анализаторы — интеграторы). Поворотной точкой считается ввод в действие в США в 1946 году системы ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) в составе 18 тыс. радиоламп — это первый электронный цифровой (т.е. дискретного действия — digital) вычислитель с программным управлением, прообраз современных компьютеров. Развиваемые с того времени принципы программного управления обычно связываются с именем американца Джона фон Неймана, автора соответствующей публикации 1945 года (ограниченного распространения), хотя некоторая дискуссия по поводу приоритета ведется до сего времени. Эти принципы включают в себя представление программы (т.е. алгоритма решения задачи) в виде последовательности кодов команд, хранимых в памяти и обрабатываемых наравне с числовыми данными.

В машине ENIAC был весьма малый объем памяти, поэтому программное управление было реализовано в упрощенном виде и сформировалось как «каноническое» лишь к 1950 году, когда появились последующие ламповые компьютеры (ЭВМ или ЭЦВМ — в русскоязычной терминологии того времени) с памятью достаточного объема. Появление этих первых машин воспринималось как огромное достижение; в заголовках публикаций их именовали «Giant Brain» — «гигантский мозг», объявляли одним из «трех китов» мироздания, наряду с атомной техникой и ракетами.

Существенно, что именно сочетание электроники (взамен предшествовавшей ей электромеханики) и принципов цифровой обработки данных позволило реализовать достаточно развитое программное управление (попыт-



ки сделать это аналоговыми средствами успеха не имели). Цифровая техника соответствует потребностям решения разнообразных задач, поскольку наряду с числовыми операциями реализует также текстовую (символьную) обработку, непосредственно применима для методов дискретной математики и, в итоге, оказывается на сегодня наиболее универсальной. Вместе с тем, это не отвергает аналоговую обработку, хранение, передачу информации как принцип: в ряде конкретных ситуаций и перспективных проработок аналоговые подходы могут быть решающими.

При построении и эксплуатации такой большой системы как ENIAC и ближайших последующих потребовалось решить множество схемотехнических вопросов, возникли новые представления об обеспечении надежности. Электронно-ламповая двоичная триггерная ячейка (как основополагающий элемент схемотехники компьютеров) известна с 1918-1919 годов. В предвоенные годы уже могли использоваться электронные счетчики, т.е. устройства в виде совокупности триггеров, отображавших число N , которое при подаче очередного входного импульса принимало значение $N+1$. Соответственно, были известны ламповые схемы, реализующие логические операции «И», «ИЛИ», «НЕ». Магнитные элементы и полупроводниковые диоды были вначале несовершенны, их заметное использование в компьютерах началось после 1950–1952-х годов. Вскоре были начаты разработки транзисторной схемотехники.

С зарождением вычислительной техники иногда связывают английские системы Ultra и Colossus, созданные во время Второй мировой войны для вскрытия германских шифров. Эти системы содержали, наряду с электромеханикой, значительное количество электронных ламп, но были узкоспециализированы и вряд ли имели непосредственное значение для последующего развития электронной вычислительной техники (типа системы ENIAC и последующих), в частности, потому, что были очень засекречены.

Еще задолго до 1950 года для обработки буквенно-цифровой информации и некоторых расчетов применялась электромеханика — перфокарточные машины (табуляторы и др.) и настольно-клавишные калькуляторы. Эта техника не скоро была вытеснена электроникой, оставаясь довольно мощным средством обработки статистических данных и в банковском деле.

Заметим, что термины ЭВМ, ЭЦВМ к настоящему времени стали малоупотребительными. Слово «компьютер» достаточно оправдано, оно имеет латинский корень *computo* — вычисляю. В Оксфордском словаре трактовка слова *computer* появилась в 1897 году, при этом имелось в виду механическое вычислительное устройство. С 1946 года в словаре разделены понятия цифрового, аналогового и электронного компьютеров. В 1929 году газета New York World использовала термин «super computing» — «супервычисления» в связи с мощным табулятором фирмы IBM.

На рубеже 1950 года сформировалась уверенность в возможности надежного функционирования аппаратуры с большим количеством электронных ламп. Наряду с универсальными ЭЦВМ для ускорения работы комплексов перфокарточной техники и других применений стали делать специализированные вычислительные устройства, основанные на электронно-ламповых счетчиках и логических схемах. Сопоставлялись возможности построения вычислительных машин на ламповой схемотехнике с тактовой частотой 10-100 кГц (что соответствовало электронике ENIAC и ближайшим последу-

ющим компьютерам) либо порядка 1 МГц; последнее соответствовало наиболее высокому уровню электронных схем того времени.

Решающей предпосылкой достижения высоких показателей надежности и быстродействия ЭЦВМ является то, что эта техника базируется на электронике дискретного действия — на элементах типа «ключ», работающих по качественному принципу (включено-выключено, логика «ДА-НЕТ»). В отличие от аналоговой техники, здесь достигается работоспособность в широких диапазонах разбросов внутренних параметров схемотехники, за счет чего удается радикально снизить вероятность отказов даже при огромном количестве элементов в системе. При этом сосредоточивается внимание на получении высокой скорости переключения «ключа», а не на воспроизведении или сохранении деталей формы (или точностных физических параметров) сигнала.

В 1949 году в нашей стране были приняты крупные правительственные решения по созданию новой вычислительной техники. Кроме электронной цифровой техники, уделялось внимание мощной аналоговой технике, которая сохраняла довольно значительные позиции еще 20–25 лет. История отечественной вычислительной техники отражена в ряде публикаций, но надо учитывать, что они неполны и, отчасти, субъективны, так как многие работы носили закрытый характер, а документальные свидетельства утрачены.

Первые наиболее известные отечественные довольно мощные для того времени электронные цифровые машины БЭСМ и «Стрела», которые были созданы до 1955 года, имели производительность на уровне нескольких тысяч операций в секунду, работали на схемотехнике невысокого быстродействия, имели небольшую память, но довольно развитое программное управление и в этом смысле были универсальными. Разрабатывались также ЭВМ меньшей мощности. Большие ЭВМ содержали порядка 10 тыс. радиоламп, в них использовались импульсные трансформаторы (на пермалловых и, позже, на ферритовых сердечниках) и появившиеся в то время германиевые диоды. Был осуществлен комплекс мер по обеспечению надежности, включая надлежащий выбор режимов работы электронных элементов, встраивание средств автоматизированной диагностики для профилактических проверок аппаратуры и процедур контроля хода вычислений.

Успех в создании и применении первых отечественных ЭВМ имел решающее значение в преодолении скепсиса относительно возможностей этой новой техники, который ощущался при проведении разработок. Не вызвала сомнений заинтересованность и вполне четкая поддержка проводимых работ высшим руководством, что подкреплялось своевременным расширением штата сотрудников и надлежащим материально-техническим обеспечением. К работам привлекались ведущие ученые страны. Несмотря на закрытость работ, обеспечивалось достаточно эффективное взаимодействие организаций различного профиля и обмен опытом.

Для решения все более усложнявшихся вычислительных задач была проведена разработка и с 1958 года развернут серийный выпуск универсальной ЭВМ М-20 производительностью 20 тыс. операций в секунду (оп./с), а также велись работы по проблемно-ориентированным ЭВМ. При этом повышалась тактовая частота, расширялось применение германиевых диодов для основной массы элементов «И»-«ИЛИ», типизировались схемно-конструктивные модули, улучшалось общее конструктивное оформление, система охлаждения

и инженерное оборудование машинных залов. Все более широко использовалась и совершенствовалась память на магнитных лентах и барабанах.

Большие работы были связаны с переходом к использованию памяти на ферритовых сердечниках, причем довольно быстродействующей и большой. Для машины М-20 была разработана лучшая по тому времени память объемом 4 тыс. чисел (в современных представлениях это соответствует 30 Кбайт). При ее изготовлении потребовалось преодолеть значительные производственно-технологические трудности. Были организованы вычислительные центры для эксплуатации новых машин с переводом туда ряда сотрудников из числа разработчиков.

В 1956—1958 годах разворачивались разработки первых в нашей стране полупроводниковых машин, и это соответствовало переходу ко второму поколению вычислительной техники. Однако транзисторы того времени имели относительно невысокое быстродействие, и построенная на их основе схемотехника не превосходила лампово-диодную применительно к стационарным высокопроизводительным установкам. Но возможности построения малых и бортовых транзисторных вычислителей активно прорабатывались.

Общая характеристика развития высокопроизводительной вычислительной техники

Рассмотрение развития данной области техники за 60-летний период ее существования позволяет сделать выводы общего характера, существенные для понимания роли вычислительной техники в решении прикладных (пользовательских) задач, потребностей в компонентной базе и оценки перспективы.

Для многих довольно разнообразных применений требуется вычислительная техника возможно более высокой производительности, и именно такая направленность рассматривается в данной статье. Стремление повышать производительность должно соотноситься с затратами на создание и эксплуатацию этой техники, а также с оценкой значимости результатов применений. Для определенных применений целесообразна специализация вычислительной техники (по функциональному содержанию и конструктивному оформлению); эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Уровень производительности вычислительной техники, с некоторой условностью, оценивается количеством выполненных арифметико-логических операций, отнесенным ко времени — оп./с. Верхний уровень производительности растет в 10 раз за пятилетие: в 1950 году ЭВМ выполняла порядка тысячи операций в секунду, а наиболее мощные суперкомпьютеры, введенные в действие в 2005—2006 годы (с числом процессоров по 10—100 тыс.) имеют производительность на уровне 100 трлн. (10^{14}) оп./с. Объем основной оперативной памяти в современных суперкомпьютерах — порядка 1 Гигабайта на процессор.

Современные суперкомпьютеры строятся на базе крупносерийных микропроцессоров, т.е. диапазон производительности от современных массовых компьютеров (однопроцессорных) до суперкомпьютеров — 10^4 — 10^5 -кратный.

Фирма IBM (США), а также некоторые другие (в том числе японские) анонсируют выпуск в ближайшие годы систем производительностью на уровне квадриллиона (10^{15}) оп./с.

Когда говорится об оценке производительности компьютера по количеству операций, выполняемых в единицу времени, надо учитывать следующего рода условности. В узком смысле, такая оценка характеризует некоторое усредненное быстродействие арифметико-логического устройства (АЛУ). Но применительно к системе в целом подразумевается наличие памяти, внешних устройств, средств управления и программного обеспечения, характеристики которых определенным образом сбалансированы с быстродействием АЛУ. Такая «сбалансированность» по существу связана с принадлежностью системы к некоторому типу или классу (по области применений, вычислительным возможностям и проч.). Поэтому сопоставление по количеству операций в секунду обычно делается лишь в рамках определенных системных построений. К тому же, производительность должна соотноситься с такими показателями, как стоимость и надежность систем. Прогресс по уровню производительности, вообще говоря, должен сопровождаться улучшением технико-экономических показателей (обычно имеется в виду повышение соотношения производительность/стоимость) и поддержанием достаточно высокой надежности (живучести, готовности) при усложнении систем.

Условность и неполнота оценок производительности с помощью количественных показателей (таких как количество операций в секунду, объем памяти и т.д.) проявляется также и в том, что вновь появляющаяся система, как правило, позволяет решать качественно новые задачи, т.е. расширяются применения по сравнению с тем, что удавалось делать с помощью компьютеров предыдущего поколения, и именно это во многом определяет эффективность системы.

Следует отметить, что по мере роста производительности компьютеров увеличивается разрыв между скоростью выполнения вычислительных операций (в компьютере) и работой программиста. В программное управление все в большей мере вносятся функции саморазвертывания, самоорганизации в сочетании с развитием структурного параллелизма, что осложняет программирование. В этих условиях составление программ требует больших усилий и высокой квалификации в разнообразных аспектах, что бы ни говорилось о мероприятиях по совершенствованию методов программирования и его автоматизации, использовании стандартных пакетов программ и т.д. Все это вызывает соответствующие издержки вычислительного ресурса и влияет на реальную эффективность применения компьютеров.

Вычислительных установок с числом процессоров более пятисот в современном мире менее тысячи, они охватывают верхний 100-кратный диапазон производительности, причем половина их суммарной производительности сосредоточена менее чем в сотне наиболее мощных вычислительных установок. Все это свидетельствует о специфичности и своего рода «узости» проблематики создания и применения суперкомпьютеров как таковых (по сравнению с большим разнообразием типов и применений массовых однопроцессорных компьютеров или серверов в составе десятка процессоров). Вместе с тем, работы, связанные с суперкомпьютерами, в развитых странах относятся к числу приоритетных, являются фактором стратегического значения и характеризуют научно-технический потенциал. Следует также отметить, что структурно-технические решения в области высокопроизводительной вычислительной техники (HPC — High Performance Computers) с тече-



нием времени влияли и распространялись на более широкие области, в том числе, на структуру микропроцессоров (см. ниже).

Вышеназванный рост производительности определяется повышением физического быстродействия (характеризуемого тактовой частотой электронных элементов) и увеличением количества элементов в системе — логических схем и памяти. Последнее соответствует развитию параллелизма обработки как в структуре процессора (обработка одновременно нескольких команд и потоков данных), так и в общесистемной структуре (одновременная работа множества процессоров и подсистем).

Повышение производительности вычислительных систем за счет наращивания быстродействия и количества компонентов связано с использованием новых физических принципов (переход от электровакуумных приборов к полупроводниковым, оптоэлектронным и др.), с развитием технологий (повышение уровня интеграции полупроводниковых приборов, плотности магнитной записи и др.), с расширением функционального ряда компонентов (усложнение логики, реконфигурируемые структуры — ПЛИС, новые виды памяти и др.). Естественно, что при этом получают развитие и общесистемные концепции построения компьютерных систем, видоизменяются их методы разработки, технология изготовления и организация эксплуатации, а также проявляется обратная связь — использование компьютеров, в свою очередь, стимулирует прогресс компонентной базы.

Повышение физического быстродействия базовых компонентов и развитие параллелизма обработки составляют стержень истории вычислительной техники, что отражается в общепринятой характеристике ее нижеперечисленных поколений.

1-е поколение: электронно-ламповая техника (1946—1960 гг.). Получили распространение: параллельный код в арифметических операциях, групповые операции; совмещение вычислений, модификации адресов и обращение к памяти при обработке двух подряд идущих команд программы (вышеупомянутая ЭВМ М-20).

2-е поколение: транзисторная схемотехника (1960—1970 гг.). Машина IBM 7090, выпускавшаяся с 1960 года и ставшая «классикой» этого поколения, имела производительность на уровне 100 тыс. оп./с. Она входила в семейство машин, которое охватывало некоторый диапазон по производительности и комплектации внешних устройств, а также имело функциональную преемственность по отношению к ламповым машинам фирмы IBM, что облегчало работу по программному обеспечению.

В создании наиболее мощных машин на этом этапе лидером стала фирма CDC (США), выпускавшая с 1965 года машину CDC-6600 производительностью 3 млн оп./с, а затем и более мощные. Впоследствии это направление работ выделилось как фирма Cray, выпускавшая одноименные суперкомпьютеры (см. ниже).

Для отечественных разработок электронной вычислительной техники 2-го поколения (в классе высокопроизводительных систем общего назначения) характерны машины «Весна» и БЭСМ-6 производительностью, соответственно, 0,3 и 1 млн. оп./с, освоенные в производстве в 1966-1968 годах. Эти разработки базировались на только что появившихся у нас диффузионных транзисторах, позволявших строить схемотехнику с тактовой частотой 5—10 МГц,

т.е. со значительно большим быстродействием, чем в ламповой технике. Новизна транзисторной базы и машин, в целом, привела к появлению новых для нашей страны устройств и конструкторско-технологических решений: быстродействующей транзисторной схемотехники с так называемыми «токовыми ключами»; печатного монтажа и многоконтактных разъемов с покрытием золотом (или металлами платиновой группы); памяти большого объема на миниатюрных ферритовых сердечниках, магнитных барабанах и лентах; быстродействующих средства ввода, вывода и отображения информации, мультиплексоров для сопряжения ЭВМ с каналами телефонно-телеграфной связи.

Развитие структуры в системах 2-го поколения: параллелизм при выполнении арифметических операций — отдельные сумматор (с ускоренным переносом) и умножитель (с обработкой одновременно нескольких разрядов множителя); усложнение функций обработки — расширение состава операций, макрооперации; одновременная работа нескольких уровней памяти, расслоение памяти на параллельно работающие модули; конвейерная обработка нескольких команд программы — «трубопровод»; совмещение основных вычислений и процедур ввода-вывода на основе мультипрограммного режима с использованием механизмов прерывания программ и разграничения областей памяти; выделение периферийного процессора. При необходимости строились комплексы из двух и более машин с общим полем внешней памяти. Довольно широкие функциональные возможности машин 2-го поколения позволили не только решать сложные расчетные задачи, но и реализовать многопользовательские режимы (обслуживание в реальном масштабе времени), строить на этой основе мощные вычислительные центры коллективного пользования, информационно-поисковые системы и автоматизированные системы управления высокого уровня, а также центры коммутации для создаваемых сетей передачи данных и др.

На этом этапе, наряду с большими машинами, стали отчетливо выявляться классы малых, средних, а также разного рода управляющих и бортовых ЭЦВМ. Расширились масштабы серийного производства вычислительной техники.

3-е поколение: интегральные микросхемы («начальный» уровень интеграции) и на этой базе дальнейшее развитие параллельных структур (1970—1985 гг.). Происходило разграничение альтернативных направлений: семейства программно-совместимых машин, охватывающие широкий диапазон производительности, и, вместе с тем, обособление классов суперкомпьютеров и мини-компьютеров (эта тенденция проявлялась уже во 2-м поколении, а в 3-м — стала вполне отчетливой). В этот период получили развитие многопроцессорные и многомашинные системы — по классификации того времени. Первые характеризовались общей оперативной памятью, а в системах второго типа объединение машин осуществлялось посредством общей внешней памяти или связью через канал-канал ввода-вывода (при этом одна ЭВМ воспринимала другую как свое внешнее устройство).

При переходе от одного поколения к другому как в зарубежных, так и в отечественных разработках неоднократно проявлялось стремление строить на новой компонентной базе машину с функциями и структурой, аналогичными тем, что имелись в некоторой, хорошо себя зарекомендовавшей, ЭВМ предыдущего поколения, с целью ускорения разработки и освоения новой машины. Положительным примером отечественной разработки такого рода является



транзисторная машина М-220 — функциональный аналог ламповой М-20. Возможности подобных подходов прорабатывались и при переходе от 2-го поколения ЭВМ к 3-му, а также и в последующие годы, однако это носило характер тактического маневра и не могло стать магистральной линией: как компонентная база, так и структурно-функциональные построения совершенствуются весьма интенсивно, работы в этих двух направлениях взаимно стимулируют и поддерживают друг друга в интересах обеспечения и развития применений.

Большое место в отечественной вычислительной технике 3-го поколения заняло создание и применение семейства программно-совместимых машин — Единой системы ЭВМ (система «Ряд»). В ее структурном построении (как тогда начали говорить, в «архитектуре») была принята ориентация на вновь появившуюся весьма развитую и в этом смысле функционально-перспективную американскую систему — System 360 IBM, поскольку это соответствовало потребностям нашей страны и сотрудничавших с нами восточноевропейских стран.

Здесь уместны краткие пояснения по выбору концепций построения ЕС ЭВМ, уже излагавшиеся автором данной статьи и другими участниками этих работ. Разработка системы началась в те годы (1967–1970), когда опыт применения ЭВМ 2-го поколения у нас еще был невелик, программное обеспечение отечественных машин находилось в начальной стадии; в этих условиях любая собственная структура нового поколения машин оказалась бы, по меньшей мере, спорной. Принятие System 360 IBM за прототип отечественной системы основывалось на том, что усматривалась возможность использования для ЕС ЭВМ весьма обширного и наращиваемого программного обеспечения системы-прототипа и целесообразность восприятия в отечественной практике соответствующих передовых общесистемных стандартов. Наличие прототипа позволило развернуть широкий фронт работ по ЕС ЭВМ и решать параллельно множество проблем, которые обычно в новых разработках продвигались бы поочередно.

Принятые концепции создания ЕС ЭВМ были осуществлены и себя оправдали: удалось за относительно короткий период поднять уровень отечественной вычислительной техники и создать базу для дальнейшего прогресса. Наличие развитого программного обеспечения и возможностей его обновления обусловило многочисленные применения вычислительной техники на уровне требований того времени, создавать автоматизированные системы различного назначения, т.е. делать то, что впоследствии стало именоваться информатизацией общества.

Промышленный выпуск машин Единой системы (ЕС) был начат в 1973–1974 годах. Затем развернулась разработка следующей очереди ЕС ЭВМ (функционально соответствовавшей System 370 IBM, т.е. обновленной версии прототипа) с использованием накопленного к тому времени аппаратно-программного задела. Большое значение имел осуществлявшийся при этом переход к полупроводниковой оперативной памяти (взамен ферритовой).

ЕС ЭВМ была продукцией двойного назначения — гражданского и военного; это способствовало повышению качества продукции. Работы по ЕС ЭВМ стимулировали развитие отечественной микроэлектронной базы, технологии многослойного печатного монтажа, внешних устройств и других смежных производств и отраслей.

В разработках схемотехники ЭВМ 3-го поколения существенно использовался опыт создания машин предыдущего поколения; новизна разработок была, прежде всего, в переходе от дискретных компонентов (диодов, транзисторов и пр.) на технологию интегральных схем (ИС). В нашей стране их производство в то время разворачивалось в Зеленограде, и уже в первых машинах ЕС удалось применить твердотельные (монокристалльные) ИС, в то время как машины фирмы IBM еще поставлялись на микросхемах по гибридной технологии (объединение в одном корпусе нескольких миниатюрных дискретных компонентов, что считалось вначале экономически оправданным).

Можно отметить, что вычислительная техника того времени, в общем, не благоприятствовала применению микросхем с повышенным уровнем интеграции, поскольку при переходе к большим ИС каждая ЭВМ требовала нескольких десятков (а то и сотен) типонаименований схем, в то время как серийность выпуска ЭВМ была незначительной. Это противоречие разрешалось зарубежными фирмами-производителями полупроводниковых приборов путем ориентации разработок и выпуска больших, а затем и сверхбольших ИС (БИС и СБИС) на применение, прежде всего, в бытовой аппаратуре, где обычно массовость производства сочетается с малой разновидностью микросхем. К тому же, повышение уровня интеграции и повышение физического быстродействия (тактовой частоты, скорости срабатывания) ИС — требования, вообще говоря, противоречивые. Недаром суперкомпьютеры в период с 1970 по 1985 год обычно строились на высокоскоростных компонентах с невысоким уровнем интеграции.

В таких важнейших средствах, как память на магнитных лентах и сменные диски, принятие для ЕС ЭВМ общепризнанных в мире стандартов (во многом основанных на технических решениях фирмы IBM) сориентировало разработку соответствующих отечественных аналогов и стало большим шагом вперед, поскольку предыдущие наши устройства магнитной записи имели параметры скорости, плотности записи и объема хранимой информации значительно хуже.

Вычислительные машины ЕС, их типовые конструктивные модули и устройства широко использовались в качестве базовых в ряде разработок проблемно-ориентированных вычислительных центров и систем (обычно классифицируемых как автоматизированные системы управления и информационного обслуживания различного уровня мощности).

Наиболее мощной в составе ЕС ЭВМ была машина ЕС-1066, построенная на ЭСЛ-схемах средней степени интеграции с тактовой частотой 12 МГц (при построении специализированных процессоров эту схемотехнику удавалось «разогнать» вдвое). Машина ЕС-1066 выпускалась в течение 1985–1993-х годов (более 400 установок); двухмашинный комплекс (с общей внешней памятью) на этой базе имел производительность 10 млн. оп./с и оперативную память (на процессор) до 16 Мбайт. Велись разработки более мощных машин ЕС, но их промышленный выпуск не был осуществлен, так как не было развернуто производство требуемых матричных ЭСЛ БИС и СБИС памяти.

Вычислительная техника 3-го поколения существенно расширила возможности построения территориально-распределенных сетей для обслуживания удаленных абонентов-пользователей, создавались специализированные сети (например, для продажи железнодорожных и авиабилетов). Однако высказывавшийся в те годы оптимизм относительно развития информаци-

онно-вычислительных сетей не мог подтвердиться из-за неразвитости (и дороговизны) средств связи и терминального оборудования.

В последующем развитии вычислительной техники не было общепринятых градаций по поколениям. После 1975 года большое внимание уделялось векторно-конвейерным суперкомпьютерам на ЭСЛ-базе с тактовой частотой 100 МГц и более (американские системы Cray-1, -2, их разновидности и некоторые японские системы). Такие системы имели производительность процессора порядка 100 млн. оп./с и затем 1 млрд. оп./с, а также допускали комплексирование (с общей оперативной памятью) до суммарного уровня 10 млрд. оп./с. К 1985 году возросли трудности в дальнейшем повышении уровня производительности суперкомпьютеров этого, можно сказать, «традиционного» направления, которые были преодолены переходом к массово-параллельным вычислительным системам (MPP — Massively Parallel Processing).

Вначале массово-параллельная обработка строилась в виде совокупности арифметических устройств (от нескольких десятков до тысяч), управляемых единым потоком команд программного управления (структура SIMD). Позже, по мере развития микропроцессорной базы, возобладало распараллеливание программ на множество более или менее протяженных ветвей (структура MPP-MIMD — см. ниже).

В нашей стране в тот период различными организациями были введены в действие малотиражные специализированные процессоры (векторно-матричные ускорители-сопроцессоры и др.), построенные на базе серийных компонентов и работавшие в комплексе с серийными ЭВМ.

Примечательной разработкой в классе высокопроизводительной техники стала система ПС-2000 производительностью до 100 млн. оп./с, содержавшая до 64-х арифметических устройств при едином потоке команд программы. Система выпускалась серийно с 1981 года и была относительно недорогой, так как строилась весьма экономно на схемотехнике среднего (по тому времени) быстродействия. Однако ограниченность формата числовых кодов (24 бита) и сложность программирования затрудняли применение этой системы.

Большое значение придавалось разработке вычислительной системы «Эльбрус-2», ее промышленный выпуск осуществлялся с 1985 года. Система содержала до 10 процессоров с общей оперативной памятью и имела производительность на уровне 100 млн. оп./с, что обеспечило решение весьма сложных задач. В связи с этой системой была разработана ЭСЛ-база с повышенным быстродействием. Намечавшиеся дальнейшие отечественные разработки суперкомпьютеров «традиционного» направления и соответствующей компонентной базы затянулись и остались невостребованы.

Современный этап — массово-параллельные вычисления

В 1983—1987-х годах в нашу жизнь «ворвался феномен микропроцессоров и персональных компьютеров», и это многое изменило.

По мере повышения уровня интеграции полупроводниковых приборов становилось возможным помещать в СБИС все более полную структуру основной обрабатывающей части компьютера. Вначале такие СБИС, названные «микропроцессорами», имели невысокое быстродействие и не представляли интереса для построения сколько-нибудь мощных вычислительных сис-

тем. Однако микропроцессоры обладали функциональной универсальностью (поскольку имели программное управление) и потому были полезны для разнообразных малогабаритных средств массовой автоматизации, что соответствовало условиям их крупносерийного производства как дешевой и надежной продукции. В своем функциональном развитии микропроцессоры прошли несколько «поколений», соответствующих повышению уровня интеграции и быстродействия СБИС. Микропроцессор в сочетании с БИС памяти, устройствами ввода-вывода данных, электропитания и некоторыми связующими компонентами стал также основой персонального компьютера, и это явилось решающей предпосылкой широкой информатизации общества.

Среди пользователей высказывалось мнение, что непосредственная доступность настольной «персоналки» дает многократно большие возможности решать задачи, чем работа с громоздкими труднодоступными большими вычислительными системами коллективного пользования (такие суждения имеют свой резон и в современных условиях).

В 1990—1995-х годах за рубежом «традиционные» суперкомпьютеры стали все более заметно вытесняться альтернативными системами в виде вышеупомянутых массово-параллельных структур (MPP-MIMD) на базе 32- и 64-битных КМОП-микропроцессоров (их можно считать «полнофункциональными» в отличие от предыдущих малоразрядных). В Западной Европе и в России в качестве такой базы на начальном этапе хорошо показали себя транспьютеры. На первых порах эти микропроцессоры работали с тактовыми частотами 10–20 МГц и, попросту говоря, воспроизводили в одном чипе электронную часть вычислительных машин 2-го и 3-го поколений (процессор без основной оперативной памяти). К 2000 году, на основе дальнейшего развития СБИС, серийные микропроцессоры по быстродействию вышли на уровень 1 млрд. оп./с, что соответствовало производительности суперкомпьютеров 1980—1985 годов, и на этой базе многопроцессорные MPP-структуры стали монопольными в высокопроизводительных вычислительных системах.

Можно проследить развитие параллельной обработки во внутренней структуре процессора. В ламповых машинах одна операция (команда программы, содержащая обычно одну арифметическую операцию) выполнялась, ориентировочно, за сотню тактов. В высокопроизводительных машинах 2-го и 3-го поколений операция выполнялась за 10–20 тактов, и при этом объем аппаратуры возрос на порядок (по количеству транзисторов, заменивших лампы). Эта тенденция продолжилась в суперкомпьютерах. В современных микропроцессорах, содержащих более чем 100 млн. транзисторов, обычно выполняется 2–4 полных арифметических операции за такт, а при наличии векторного сопроцессора — 8–16 операций за такт, при этом тактовая частота стала на порядок выше той, что была в ЭСЛ-базе. Надо, однако, заметить, что часть транзисторов используется как быстродействующая промежуточная память (кэш-память), являющаяся буферной между вычислительным ядром микропроцессора и более медленной, но большой по объему основной оперативной памятью.

Произошедшая переориентация в построении суперкомпьютеров (и, вообще, вычислительной техники) на микропроцессорную базу существенно затронула сферы создателей и потребителей этой техники: в «традиционном» программировании потребовалось освоить методы и новые средства распараллели-

вания основной обработки; системные проекты, которые не вписались в эту обстановку, не были реализованы. Недаром эти полнофункциональные микропроцессоры за рубежом называли «Killer Micros». В нашей стране такая переориентация происходила на 3–4 года позже и отчасти связывалась с перестроенными процессами. По сути же дела, это объективные проявления прогресса: ЭСЛ-база себя исчерпала; полный процессор разместился в КМОП-чипе, и его быстродействие наращивалось до суперкомпьютерного уровня. При этом использование микропроцессоров и, вообще, средств COTS (Components on the Shelf — процессорные модули, память, коммутационно-сетевые средства и другие серийные изделия «с полки магазина») дало возможность продвинуть ранее проводившиеся исследования возможностей массово-параллельной обработки на этапы реализации систем с высокими технико-экономическими показателями и тем самым обеспечить актуальнейшие применения.

В выпуске микропроцессоров, используемых в компьютерах массового применения, лидирует фирма Intel (США). Именно она первая стала изготавливать на своей базе вычислительные системы в составе до нескольких тысяч процессоров, которые после 1990 года по производительности стали опережать все другие и в 1996–1999 годах достигли уровня 1–3 трлн. оп./с, объединяя 7–9,5 тыс. процессоров (система Red). Позже, однако, фирма Intel не выпускала большие системы. В 2000 году фирма IBM ввела в действие суперкомпьютер White производительностью более 10 трлн. оп./с (6 тыс. процессоров), а в 2004–2005 годах поэтапно ввела в действие систему Blue Gene/L производительностью на уровне 300 трлн. оп./с (65 тыс. двухпроцессорных чипов). Установки названных типов выпущены также и с меньшим числом процессоров; таким образом, фирма IBM закрепила свою доминирующую роль во всем спектре производительности компьютеров.

Современный суперкомпьютер, как объединение множества процессоров, имеет много общего с компьютерной сетью, но предназначения этих системных построений заметно различаются. Это отражается в функциях процессорных модулей и в таких характеристиках, как объем и организация памяти, интенсивность межпроцессорного взаимодействия, состав внешних устройств, общесистемное управление и др. Различия проявляются и в стоимости.

Существенно, что микроэлектронная база, модули и вычислительные системы, в целом, строятся и развиваются с соблюдением определенных стандартов (на интерфейсы, конструктивное оформление, программное обеспечение и др.). Единообразие архитектуры микропроцессоров и концепций построения систем на их основе позволило в более широком плане (по сравнению с машинами 3-го поколения) решать вопросы переносимости (портбельности) программного обеспечения и реализовать стандарты открытых систем. В области стандартизации также происходят видоизменения: здесь постоянно требуется рассмотрение альтернатив — сопоставление вновь появляющихся проектно-технологических возможностей и сложившихся традиций.

В России исследования по массово-параллельным структурам имеют 40-летнюю историю. Вместе с тем, проводившиеся на рубеже 1990-х годов отечественные разработки 32-битных микропроцессоров не привели к их промышленному выпуску, поэтому в последующий период в нашей стране многопроцессорные вычислительные системы (МВС) стали строиться на зарубежной микропроцессорной базе. В кооперации организаций промышлен-

ленности, институтов РАН и вузов были разработаны и введены в действие системы двух поколений производительностью 10-100 млрд. оп./с (МВС-100 и МВС-1000 с быстродействием микропроцессоров, соответственно, порядка 0,1 и 1 млрд. оп./с). Процессоры этих систем объединялись в двумерную решетку (с применением транспьютеров, а затем более скоростных связных микропроцессоров).

С 2000 года стали строиться так называемые «кластеры», т.е. системы, в которых серийные процессорные модули объединялись вновь появившимися высокоскоростными коммутационно-связными средствами локальных сетей. В порядке реализации целевых программ рассматриваемого направления в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН в 2001 году была введена в эксплуатацию 768-процессорная система МВС-1000М производительностью 1 трлн. оп./с, а в 2004–2006-х годах поэтапно введена 1148-процессорная система МВС-15000 производительностью 10 трлн. оп./с. В 2004 году создана в России и передана в Минск для эксплуатации 576-процессорная система К-1000 производительностью 2,5 трлн оп./с. Эти системы позволили решать новые сложные задачи с большим объемом вычислений. В Москве и различных регионах страны эксплуатируются кластеры с меньшим числом процессоров в различных модификациях по типам процессоров, объемам памяти, межпроцессорным связям, конструктивному оформлению, составу программного обеспечения. Осуществляется поэтапно-прогрессирующее наращивание производительности и совершенствование технико-экономических показателей действующих и вновь создаваемых систем.

Важным фактором в отечественной практике стало повсеместное использование удаленного множественного доступа пользователей к мощным вычислительным системам (по сети Internet или корпоративным сетям). В связи с этим становится реальным переход на новый этап осуществления вычислительных процессов с большим объемом обработки данных — территориально-распределенные вычисления на основе повсеместно развиваемых Grid-технологий.

Дальнейшее развитие микроэлектронной базы определяется переходом от достигнутых технологических норм 0,18–0,09 мкм к более жестким — фирма Intel объявила о переходе производства с 2007 года на технологию 45 нм.

Микропроцессоры по тактовой частоте вышли на уровень нескольких гигагерц, и возможно ее повышение. Вместе с тем, структура микропроцессора предельно усложнилась за счет развития внутреннего параллелизма обработки, интенсификации взаимодействия с памятью различных уровней и внешнего обмена данными, при этом возросло тепловыделение. В микропроцессорах продолжает развиваться векторная и многопоточковая обработка, они уже выпускаются как двухъядерные с суммарным пиковым быстродействием более 10 млрд. оп./с. Ожидается, что в ближайшие 2–3 года этот показатель многократно возрастет за счет размещения в одной СБИС 10–30 процессорных ядер. В микропроцессоры встраиваются разнообразные средства контроля, терморегуляции и энергосбережения. Все это, однако, осложняет использование микропроцессоров в аппаратуре и требует соответствующего программного обеспечения. Следует признать, что из-за этих трудностей возможности новейшей процессорной базы последних 2–3 лет по повышению производительности пока что не в полной мере ощущаются в отечественной практике применений (т.е. в исполнении прикладных программ).



В широком спектре изделий современной микроэлектронной базы, принимаемых в вычислительных системах, большое место занимают также разного рода элементы памяти, СБИС с перенастраиваемой логической структурой (ПЛИС — FPGA — field-programmable gate arrays), средства межпроцессорной связи и коммутации, визуализации данных, электросилового питания, охлаждения, разнообразные пассивные компоненты и проч.

В развитии элементов и устройств памяти имеется несколько направлений функционального и технологического характера: повышение быстродействия СБИС памяти при наращивании ее объема для того, чтобы не возникал чрезмерный разрыв между быстродействием основной памяти и кэш-памяти микропроцессора; СБИС с функциями обработки данных в памяти (PIM, в том числе ассоциативная память); совершенствование энергонезависимой полупроводниковой памяти с функциями внешнего устройства (флеш-память). На этапах предыдущих поколений компьютеров не раз предрекался конец эры магнитной дисковой памяти (с заменой ее механики чем-то другим), однако она продолжает занимать прочные позиции и интенсивно развивается.

По мере повышения уровня интеграции микроэлектроники все более увеличивается разрыв (по техническим характеристикам, условиям производства и применений) между заказными БИС-СБИС (ASIC — Application Specific Integrated Circuits) и микропроцессорами. Этот разрыв отчасти заполнялся разного рода «полузаказными» микросхемами (на основе матричных БИС, БИС типа «море вентиля» и др.), а в последнее десятилетие все более активно используются ПЛИС. Их быстродействие повышается, а структура развивается как по количеству элементов реконфигурируемого массива (вентилей, триггеров) так и за счет введения в состав ПЛИС функционально развитых узлов (памяти, сумматоров, умножителей и др.) вплоть до нескольких процессорных ядер. На современном этапе развитие электронных компонентов во многом связывается с направлением «системы на кристалле» (SoC).

Промышленный выпуск микропроцессоров, памяти и прочих компонентов значительно превышает потребности производства компьютеров и, тем более, потребности выпуска суперкомпьютеров, поскольку те же компоненты используются в широких сферах автоматизации и в средствах связи. Массовость производства компонентов сочетается и взаимосвязана с их относительным удешевлением и обеспечением высокой надежности. В этих условиях ориентация на какие-то специфические компоненты для суперкомпьютеров стала технически и экономически неоправданной; этот вывод важен для определения технической политики в рассматриваемой области.

На этапах 2-го и 3-го поколений компьютеров всегда прорабатывалась проектная альтернатива: «наибольшее быстродействие при невысоком уровне интеграции и возможном удорожании компонентов» либо «относительно дешевые компоненты с невысоким быстродействием при их большом количестве в системе», имея в виду, что второй из этих путей требует построения более развитых параллельных структур. Обычно для больших вычислителей (и «традиционных» суперкомпьютеров) выбирался первый путь, а для малых машин применялись компоненты «попроще и подешевле». За последние 10–15 лет ситуация изменилась: в массовых компьютерах используются микропроцессоры и память, у которых возрастает быстродействие, уровень

интеграции и, соответственно, сложность структуры, а суперкомпьютер строится путем объединения множества таких компонентов.

Иногда высказывались предложения об использовании в суперкомпьютере каких-то «упрощенных» процессоров (и получения высокой производительности, прежде всего, за счет увеличения количества процессоров); обычно это оказывается неприемлемым по технико-экономическим показателям и из-за возрастания трудностей программирования. Понятно, что это — выводы сегодняшнего дня; в будущем можно себе представить появление и использование каких-то других элементов, сред, явлений и соответствующих технологий, что может повлечь корректировку системно-структурных концепций.

Надежность полупроводниковых компонентов, в принципе, может быть очень высока. Но практическое достижение высокой надежности систем, в целом, возможно только при очень хорошем уровне всех этапов разработки, изготовления и эксплуатации компонентов и аппаратуры, а также при надлежащем взаимодействии — обратной связи от потребителя компонентов к их изготовителю, что в нашей практике, к сожалению, не всегда осуществлялось. Массово-параллельная структура современных суперкомпьютеров является существенной предпосылкой достижения их «живучести» при отказах единичных процессоров, однако это не допускает пренебрежения всем комплексом мер и средств поддержания надежности.

Несмотря на усложнение проблем кремниевой микроэлектроники, на сегодня и ближайшие годы именно она определяет базу вычислительной техники; остаются на втором плане такие направления, как, например, элементы на арсениде галлия, криогеника, оптические средства обработки данных, на которые оптимистично смотрели 10–20 лет назад. Вместе с тем, следует отметить, что все более широко используются в вычислительных системах оптоволоконные связи, диски с лазерным чтением-записью информации при повышающейся плотности и скорости; следует ожидать появления в вычислительной технике новых элементов оптоэлектроники.

Одним из определяющих факторов в вычислительной технике является уровень автоматизации и оснащенности соответствующим оборудованием всех этапов создания систем — от начального проектирования и выпуска конструкторской документации до изготовления, контроля и обслуживания в процессе эксплуатации. Этот фактор определяет не только производительность труда, но и саму возможность проектирования и реализации современных систем и их компонентов, включая СБИС, в силу их функциональной сложности и высоких требований к физико-технологическим параметрам. Уже давно стало фактом, что компьютеры нового поколения создаются на основе применения компьютеров предыдущего поколения. Необходимо обращать внимание на создание, внедрение и своевременное обновление всего комплекса средств автоматизации работ по созданию новых вычислительных систем.

Некоторые выводы

Развитие структурно-технического построения вычислительных средств и систем в значительной мере обусловлено совершенствованием компонентной базы (микроэлектронные приборы, память, средства связи и ввода-вывода данных) и, с другой стороны, — исходит из потребностей примене-



ний. Эти аспекты развития взаимосвязаны, т.е. компьютеры, в свою очередь, стимулируют развитие компонентной базы и процессы информатизации.

Прогресс электронной вычислительной техники как по уровню производительности, так и в отношении внедрения в практику применений, рассматриваемый за более чем полувековой период ее существования, носит характер активно протекающей эволюции, которая определяется широким многообразием факторов и устойчиво-высоким темпом. Вместе с тем, имели место острые и даже переломные моменты, столкновения ярких новаций и «здорового консерватизма» — недаром говорится о «бурном развитии» в этой области; это проявлялось при охарактеризованных выше обновлениях поколений компонентной базы, схемотехники и структур (архитектур), при переходах на большую полупроводниковую память и новые внешние устройства, при миниатюризации аппаратуры, расширении применений, повсеместном внедрении человеко-машинного диалога, формировании концепций «машинного интеллекта» и др.

Характеристики современной электроники, как компонентной базы вычислительной техники, далеко превосходили те «ограничения», на которые указывалось в ряде прогнозов прошлых лет. В настоящее время проявляется оптимизм как в отношении развития этой базы на ближайшие годы, так и в более отдаленной перспективе, связываемой с различными проявлениями нанотехнологий.

В структурном построении средств вычислительной техники «неймановская» концепция сохраняет свое фундаментальное значение, и современные структуры скорее ее дополняют и развивают, чем являются альтернативными. Это относится также и к разного рода параллельной и многопоточковой обработке, реконфигурируемым построениям на базе ПЛИС, реализациям нейросетей и др. Вместе с тем, мы создаем, что человек думает (можно сказать, обрабатывает информацию) не так, как компьютеры, и это (наряду с прочим) вдохновляет на поиск других парадигм машинной обработки информации по отношению к тем, что используются сегодня.

Вычислительные средства, основанные на каких-то новых подходах к обработке данных (и даже такие, как квантовые вычисления и др.) не обязательно должны быть «универсальными», они могут быть реализованы в виде функционально-специализированных процессоров, присоединяемых к «обычному» компьютеру, образуя проблемно-ориентированный комплекс. Развиваемая в настоящее время параллельная обработка также во многом выглядит как своеобразная специализация, поскольку ее эффективность, вообще говоря, зависит от характера задач. Таким образом, специализация может определяться не только функциональными и конструктивными особенностями компьютера, но и новизной, «нетрадиционностью» в способах его применений, что требует определенных усилий в освоении. В настоящее время рассматриваются другие среды и явления (оптика, химический синтез, бионика); они так же могут восприниматься в виде «нетрадиционных» специализированных построений, ориентированных на те или иные конкретные применения (по крайней мере, на этапе освоения).

По сравнению с верхним уровнем производительности вычислительных установок, действующих в США, в нашей стране на всех этапах обеспечи-

вался близкий уровень (на порядок ниже, т.е. со сдвигом на пятилетие, что соответствует уровню техники западноевропейских фирм), при этом темп роста производительности вводившихся в действие наиболее мощных отечественных систем соответствует мировому. Это признается приемлемым с позиций требований поддержания стратегического паритета в решении актуальных задач с большим объемом вычислений и обработки данных.

Комплектные поставки зарубежных суперкомпьютеров в нашу страну существенно ограничены, к тому же, такие системы непомерно дороги и трудны в эксплуатационном освоении; при их использовании затруднена защита информации и организация удаленного доступа пользователей. В этих условиях оснащение отечественных организаций необходимыми суперкомпьютерами осуществляется путем целенаправленных собственных исследований и разработок, сочетаемых с анализом научно-технической информации и применением передовых аппаратно-программных компонентов. На сегодня созданы и результативно используются в научных учреждениях и в промышленности различных регионов России системы различного уровня производительности, обеспечивая решение разнообразных задач высокой вычислительной сложности. В процессе проведенных работ сформирован задел для построения более мощных систем, дальнейшего повышения технико-экономических характеристик систем (по соотношению производительность/стоимость) и расширения их использования в информационно-вычислительных сетях в темпе мирового прогресса.

Литература

- Быстродействующие вычислительные машины/Пер. с англ. под ред. Д.Ю.Панова. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1952. — 430 с. (оригинал издан в США в 1950 г.).
- Левин В.К. Весна/Энциклопедия кибернетики.- Киев, 1974, т. 1, с. 184-185.
<http://www.computer-museum.ru> (Виртуальный компьютерный музей при PC Week).
- Левин В.К. Очерк становления Единой системы ЭВМ.
http://www.computer-museum.ru/histussr/es_levin.htm.
- Левин В.К. Структурно-технические характеристики и направления развития высокопроизводительных вычислительных систем/Электронная вычислительная техника/Под ред. В.В. Пржиялковского. — М.: Радио и связь, 1988, вып. 2, с. 4-16.
- Левин В.К. Радиоэлектроника и вычислительная техника//Радиотехника, 1995, № 4-5, с.137-141.
- Левин В.К. Высокопроизводительные вычислительные системы для решения задач науки и промышленности России//Информационные технологии и вычислительные системы, 2003, № 4, с. 5-13.
- Киселев А.В., Корнеев В.В., Семенов Д.В., Сахаров И.Е. Управление метакомпьютерными системами. — Открытые системы, 2005, № 2, с. 11-16.
- Гиббз Уэйт. Два в одном. — В мире науки, 2005, № 2, с. 78-81.
- Будущее микропроцессоров (подборка статей). — Открытые системы, 2006, № 5, с. 1, 12-44.
- <http://www.top500.org> (списки 500 наиболее мощных вычислительных установок мира, начиная с 1993 г.).
- <http://supercomputers.ru> (списки 50 наиболее мощных вычислительных установок России и стран СНГ, начиная с 2004 г.).
- <http://www.jssc.ru> (Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН).
- <http://www.computerhistory.org> (материалы по истории вычислительной техники, в основном, американской).
- <http://www.ru.wikipedia.org/wiki> (Internet-энциклопедия).

3.8. Элементная база — основа динамики развития БЦВМ комплекса «Аргон»

В.И. Штейнберг, кандидат технических наук,
профессор

Внедрение бортовых вычислительных машин (БЦВМ) и комплексов (БЦВК) в ракетно-космические, авиационные и мобильные объекты специального назначения стало возможным благодаря развитию электронной техники и созданию соответствующей компонентной базы. В СССР первые БЦВМ были разработаны в середине 1960-х годов коллективом НИЭМ, имевшим к тому времени значительный опыт в создании ЭВМ военного назначения для стационарных систем ПВО. НИЭМ директивными документами Правительства был определен головной организацией в стране по разработке БЦВМ, получивших позднее наименование — комплекс БЦВМ «Аргон». Впоследствии — в 1968 году — коллектив НИЭМ был включен в состав вновь созданного НИЦЭВТ, и только в 1985 году на основе структурных подразделений по разработке БЦВМ и БЦВК был образован НИИ «Аргон».

Первой отечественной БЦВМ, полетевшей в космос, стала БЦВМ «Аргон-11С», обеспечившая выполнение программы «Зонд» — облет и фотографирование поверхности Луны с возвращением космического аппарата на Землю. БЦВМ «Аргон-11С» положила начало комплексу БЦВМ «Аргон», включающему свыше 30 выполненных и внедренных в штатную эксплуатацию разработок БЦВМ и БЦВК в приоритетные системы и объекты государственного значения.

История комплекса БЦВМ «Аргон» во многих отношениях отражает развитие отечественной бортовой вычислительной техники в целом. Уникальность комплекса БЦВМ «Аргон» по сравнению с разработанными в стране сериями других изделий состоит в том, что, наряду со специализированными, в рамках комплекса впервые в стране были разработаны базовые межвидовые унифицированные БЦВМ, что предопределило их широкое использование в сотнях систем и объектов различного назначения.

Первые БЦВМ разрабатывались на гибридных интегральных схемах серий «Тропа-1», «Тропа-3», «Тропа-5». «Тропа-1» (серия 201) представляла собой гибридные толсто пленочные интегральные схемы с резистивными связями, параметры: средняя задержка на вентиль ($t_{\text{ср.зad.}}$) 250 нс и средняя потребляемая мощность ($P_{\text{ср.потр.}}$) 15 мВт. Главным достоинством серии являлась простота технологии. «Тропа-3» (серия 202) — диодно-транзисторные гибридные толсто пленочные интегральные схемы, отличительной особенностью которых (по сравнению с «Тропой-1») являлась повышенная плотность и более высокие функциональные возможности. Параметры серии 202: $t_{\text{ср.зad.}} = 200$ нс, $P_{\text{ср.потр.}} = 20$ мВт. «Тропа-5» (серия 215) — это усовершенствованная серия 202 в части сокращения примерно вдвое $t_{\text{ср.зad.}}$. В разработке логических проектов указанных серий принимали непосредственное участие создатели БЦВМ.

Параллельно с разработкой первой БЦВМ «Аргон-11С» велась разработка БЦВК «Аргон-12А» — для орбитальной посещаемой космической станции «Алмаз» и БЦВМ «Аргон-12С» — для возвращаемого космического ап-

парата, что обеспечило успешное выполнение этого пионерского проекта по дистанционному зондированию поверхности Земли.

Для мобильных объектов была выполнена разработка БЦВМ «Аргон-1М» на «Тропе-1», универсальный облик которой в условиях дефицита БЦВМ и стремительного развития АСУ для комплексов вооружения обеспечил ей применение в 70 объектах и продолжительное серийное производство на двух заводах отрасли. Мобильные пусковые ракетные комплексы «Точка», комплексы топопривязки «Кратер», командно-штабные машины АСУ войсками фронта «Маневр» и десятки других систем и объектов были оснащены этой БЦВМ.

Гибридные микросхемы «Тропа-1», «Тропа-3», «Тропа-5» стали основой разработок БЦВМ «Аргон-10» и «Аргон-10М1». БЦВМ «Аргон-10М1» применена в наземных системах управления воздушным движением, в том числе в системе УВД «Стрела» в зоне аэродрома «Пулково», находившейся длительное время в штатной эксплуатации.

С середины 1960-х годов интенсивно велась также разработка мобильных ЭВК для решения масштабных задач, связанных с созданием автоматизированных систем управления крупными воинскими соединениями. Для решения таких задач требовалось поставить «на колеса» высокопроизводительный вычислительный комплекс, оснащенный соответствующей периферией, с радиосредствами и аппаратурой передачи закрытой информации. Проблема создания такого комплекса решалась поэтапно. На первом этапе необходимо было разработать возимый ЭВК со штатной работой в полевых стационарных условиях, на втором — обеспечить функционирование на ходу. В ЭВК «Ритм-20», размещенном в двух транспортных единицах на колесном ходу, применялись гибридные микросхемы «Посол» (серия 217). Это диодно-транзисторные тонкопленочные интегральные схемы, отличительной особенностью которых по сравнению с микросхемами серии «Тропа» явились более высокие коэффициенты объединения по входу и выходу, повышенное быстродействие и помехоустойчивость, $t_{\text{ср.зад.}} = 25 \text{ нс}$, $P_{\text{ср.потр.}} = 20 \text{ мВт}$.

ЭВК «Ритм-20» был освоен в производстве на серийном заводе и обеспечил начальные этапы Государственных испытаний АСУ войсками фронта «Маневр». Выносной комплект оборудования из ЭВК «Ритм-20» — изделие «МСМ» — использовался много лет в стационарных условиях в центре разведки ВМФ.

С появлением первой отечественной серии монолитных интегральных схем серии 110 была выполнена разработка БЦВМ «Аргон-11» для ракетной техники. Серия 110 — интегральные микросхемы транзисторной логики с резистивно-емкостными связями. Повышенное быстродействие при сравнительно низкой потребляемой мощности было обеспечено за счет ускоряющих емкостей во входных цепях ($t_{\text{ср.зад.}} = 450 \text{ нс}$, $P_{\text{ср.потр.}} = 2,5 \text{ мВт}$). А последующие разработки интегральных схем — «Тур», «Приз», «Турбина», «Мост», «Исполин», «Микроватт» легли в основу разработок БЦВМ «Аргон-14» для авиационной ракеты «Х-45» класса «воздух-земля», межвидовой базовой унифицированной БЦВМ «Аргон-15» (рис. 3.8.1) и высоконадежного БЦВК «Аргон-16» (рис. 3.8.2). Микросхемы «Тур» (серия 134), «Приз» (серия 106) — монолитные интегральные схемы транзисторно-транзистор-

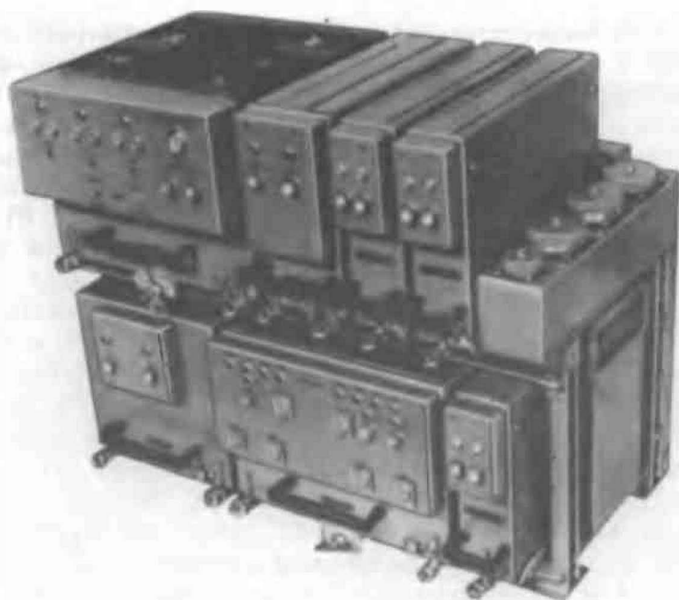


Рис. 3.8.1. Базовая межвидовая БЦВМ «Аргон-15»

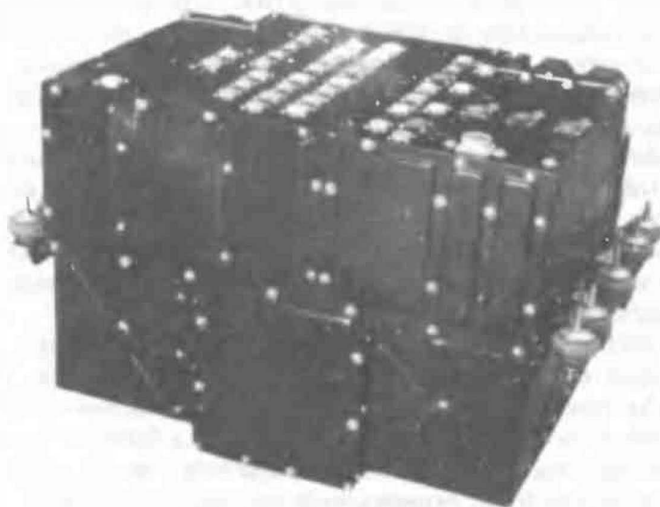


Рис. 3.8.2. Базовый БЦВК «Аргон-16» для космических объектов

ной логики с хорошим соотношением задержка-мощность («Тур» — 100 нс, 2 мВт; «Приз» — 20 нс, 15 мВт), высокой надежностью и радиационной стойкостью, повышенной помехозащищенностью. «Микроватт» (серии 113, 115) — микромощные монолитные микросхемы транзисторной логики с резистивными связями, отличительной особенностью которых являлась малая потребляемая мощность — 0,3 мВт при средней задержке 500 нс. При решении вопросов комплексной микроминиатюризации разрабатываемых

средств бортовой вычислительной техники на предприятиях электронной промышленности по выданным техническим заданиям была организована разработка интегрированных активных и пассивных дискретных электронных компонентов — транзисторных и диодных матриц, наборов резисторов и конденсаторов, трансформаторов в конструктивах, аналогичных корпусам интегральных микросхем. Применение таких интегрированных компонентов серий 125 («Мост»), 262 («Марс»), 149 («Турбина»), Б18, Б19, БТИ и др. позволило существенно повысить плотность компоновки БЦВМ. БЦВМ «Аргон-15» и ее модификация с расширенной памятью БЦВМ «Аргон-15А» были применены в 35 системах управления авиационных и мобильных объектов, в том числе в мобильных ракетно-зенитных комплексах «Бук», «Куб», в истребителях-штурмовиках МиГ31-33, в мобильных ракетных комплексах «Ока» и «Волга», в авиационных системах РЭП, в самолетах противолодочной обороны «Коршун» и «Сова». БЦВК «Аргон-16» стал базовым для космических кораблей серии «Союз» и грузовых «Прогресс», для орбитальных космических станций «Салют», «Алмаз», «Мир» и «Меч-К», для спутников серии «Космос». Повышенные требования к надежности БЦВК были реализованы за счет избыточности аппаратуры и применения элементной базы с приемкой «9». Изделия с приемкой «9» изготавливались по специальной технологической документации, подвергались специальным испытаниям на безотказность, включая электротермотренировки в заданном диапазоне температур. Удачно выбранная структура БЦВК, исключившая функциональные отказы комплекса при штатной эксплуатации в составе объектов, обеспечила долгую жизнь этого уникального комплекса — свыше тридцати лет ведется серийное производство БЦВК «Аргон-16» и его модификаций для объектов РКК «Энергия».

В БЦВМ «Аргон-17А» (рис. 3.8.3), разработке которой предшествовали многие годы научных поисков, исследований, лабораторных и натурных испытаний, были реализованы новые научно-технические решения, обеспечившие высокую боевую готовность и радиационную стойкость для принятой впоследствии на боевое дежурство твердотопливной противоракеты дальнего перехвата.

В начале 1970-х годов перед разработчиками БЦВМ комплекса «Аргон» была поставлена сложная задача по созданию БЦВК для авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения (аналога американского комплекса «AWACS»). Объем задач, решаемых на борту такого комплекса, потребовал новых научно-технических решений как по структуре БЦВК, так и по элементной базе, приемлемой для заданных жестких массогабаритных характеристик БЦВК. В результате совместных творческих усилий коллективов НИЦЭВТ и НПО «Вента», имевшего опыт разработки гибридных интегральных микросхем 3-й степени интеграции для предприятий Минсудпрома, в феврале 1972 года были подписаны ТТ на ОКР «Виктория» — серию функциональных логических многокристалльных БИС (МБИС) с задержкой на вентиль менее 35 нс и мощностью рассеивания 10–1,5 мВт. В рамках ОКР были разработаны 8 типов базовых кристаллов со специальными столбиковыми выводами и интеграцией от 5 до 8 вентилей в кристалле. Межсоединения на подложке корпуса предполагали до 3-х слоев металлизации. Логический проект 10-ти типов многокристалльных



Рис. 3.8.3. БЦВМ «Аргон-17А» для противоракеты

БИС был выполнен разработчиками БЦВК. Созданная в результате ОКР серия 705 базовых кристаллов и серия 216 МБИС, совместимая по входным и выходным уровням напряжения с ИС типа ТТЛ серий 106, 133, 134, 136 и 130, работающая в диапазоне температур -60 – 85 °С, стала основой разработки базового унифицированного межвидового БЦВК А-30 — первого из семейства БЦВК, программно совместимого с ЭВМ общего назначения серии ЕС.

Освоенный в серийном производстве БЦВК А-30 и его модификации обеспечили создание, наряду с АК РЛДН «Шмель», мобильных средств АСУ ПВО, систем предупреждения о ракетном нападении, систем УВД в зоне авианосца и ряда других объектов. С появлением отечественных разработок монолитных микросхем со средним уровнем интеграции (СИС) была выполнена разработка БЦВМ А-40, а позднее, с появлением БИС памяти, и БЦВМ А-50 (рис. 3.8.4). Реализованный впервые в стране ряд базовых унифицированных моделей БЦВМ А-30, А-40, А-50, программно совместимых с ЕСЭВМ, позволил разработчикам систем и объектов вести наиболее трудоемкую стендовую отработку общесистемного программного обеспечения параллельно с разработкой и испытаниями БЦВМ.

Для БЦВК на основе базовых моделей БЦВМ А-40, А-50 был разработан ряд внешних устройств, в том числе, впервые в СССР, внешнее ЗУ на цилиндрических магнитных доменах большой емкости и внешнее постоянное ЗУ с электрической перезаписью информации (разработчик — НИЦЭВТ), алфавитно-цифровое печатающее устройство (разработчик — НИИСчетмаш), кассетные накопители на магнитных лентах (разработчики НИИЭВМ и НИЦЭВТ), устройство оперативной памяти большой емкости на ферритовых сердечниках (разработчики ПНИИММ). На основе БЦВМ

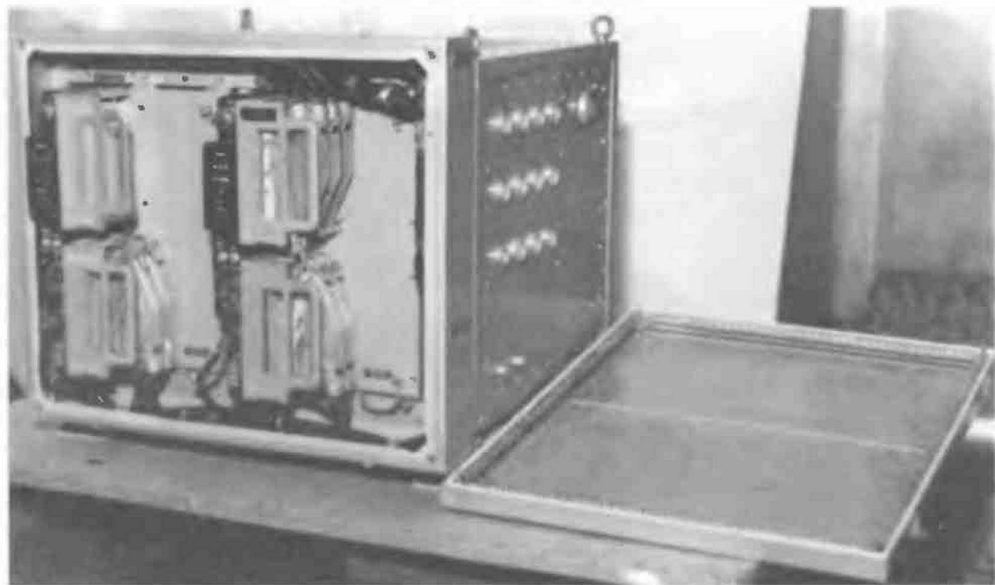


Рис. 3.8.4. Базовая межвидовая БЦВМ «Аргон-50»

А-40 и внешних устройств был реализован ЭВК «Бета-3М» в гусеничной транспортной базе, работающий на ходу в составе АСУ войсками фронта «Маневр».

Выносной комплект вычислительных средств из состава ЭВК «Бета-3М» был использован при проектировании целого ряда командно-штабных машин в АСУ различного назначения. В базовой БЦВМ А-50, впервые в отечественной практике разработки БЦВМ, была реализована оперативная память емкостью 16 Мбайт на БИС 565 серии (1985 год), что позволило существенно расширить круг решаемых задач в десятках авиационных, мобильных и стационарных объектов, созданных на ее основе.

Вычислительные комплексы на основе БЦВМ А-50, в авиационном и в мобильном вариантах, в течение ряда лет изготавливались на двух серийных заводах отрасли и успешно использовались в составе стационарных систем специального назначения.

На интегральных схемах со средним уровнем интеграции (серии 533 и 530 с транзисторно-транзисторной логикой, уровнем интеграции до 100 вентилей на кристалле, широким функциональным составом, высокой помехоустойчивостью и радиационной стойкостью, с типовыми параметрами вентиля 10 нс, 2 мВт и 3 нс, 18 мВт, соответственно) для истребителей МиГ-29, Су-27 была разработана БЦВМ Ц-100 для систем управления вооружением и индикации, освоенная в крупносерийном производстве. А с появлением микропроцессоров и БИС памяти был разработан и реализован проект семейства БЦВМ А-2009 БИС для истребительной авиации, включающий 9 базовых моделей. Модели этого проекта обеспечивали средствами бортовой вычислительной техники все агрегаты самолета, включали в себя мультиплексные каналы информационного обмена для организации на борту са-



молета вычислительной сети. Ряд моделей из этого семейства (Ц101, Ц102, Ц104) пришел на смену БЦВМ Ц100 и вошел в штатную комплектацию истребителей МиГ-29, Су-27 и их новых модификаций.

Многолетняя специализация коллектива разработчиков БЦВМ комплекса «Аргон» только в этой области науки и техники, приобретенный бесценный опыт по обеспечению работы средств вычислительной техники в экстремальных условиях позволили ему занять ведущее место в стране среди коллективов-разработчиков БЦВМ и БЦВК, работающих в оборонных отраслях промышленности. Не случайно, именно НИЦЭВТ был выбран в качестве головной организации созданного в 1978 году Межведомственного координационного Совета по БЦВМ (МКС № 16) при Комиссии Президиума СМ СССР по военно-промышленным вопросам. На него была возложена задача по унификации разрабатываемых для нужд обороны страны БЦВМ. Созданные рабочие органы МКС № 16 — Совет главных конструкторов и рабочие группы специалистов по направлениям унификации сыграли огромную роль в научно-технической координации проводимых в стране работ БЦВМ.

Наибольший объем работ в МКС № 16 выпал на рабочую группу по элементной базе, которой предстояло выработать совместно с головными предприятиями электронной промышленности единые подходы по созданию унифицированных изделий электронной техники для БЦВМ.

Несмотря на видимые успехи в создании новой компонентной базы для РЭА и, в частности, для БЦВМ, разработка средств бортовой вычислительной техники, сравнимой по основным техническим характеристикам с лучшими зарубежными образцами, стала проблематичной из-за нарастающего отставания отечественных разработок элементной базы, в первую очередь, по уровню интеграции.

В 1981 году МО США была принята двухэтапная программа разработки сверхскоростных интегральных схем (ССИС). В рамках этой программы планировалось на первом этапе в 1981-1985 годах разработать технологию производства 29 типов ССИС с технологическими нормами 1,25 мкм, что позволяло достигнуть уровня интеграции в одной ИС до 30 тыс. вентилях, тактовую частоту до 40 МГц при потребляемой мощности 50 мВт.

На втором этапе (1985—1989 годы) ставилась задача выйти на технологические нормы 0,5 мкм, что позволяло достигнуть уровня интеграции в одной ИС до 100 тыс. вентилях, тактовую частоту до 100 МГц при потребляемой мощности 3 мВт.

Несмотря на реальные расходы, достигшие на конец 1985 года 780 млн. долл., что в два раза превышало плановые расходы, отставание в выполнении работ по программе оценивалось в 18 месяцев. Приведенные данные по ходу реализации программы МО США по созданию сверхскоростных ИС показывают, что решение задачи по созданию высокотехнологичной элементной базы связано не только с огромными расходами, но является и сложной научно-технической проблемой.

Отставание в микроэлектронике от мирового уровня с годами становилось все ощутимее. Это не могло, естественно, не сказаться на параметрах БЦВМ, при проектировании которых допускалось использование исключительно отечественной компонентной базы. Так, например, базовые модели

БЦВМ Ц101-Ц104, проект А2009БИС, разработанные для истребителей МиГ-29, Су-27, несмотря на удачные конструктивно-технологические решения, повышающие плотность компоновки БЦВМ, уступали по массогабаритным характеристикам приблизительно в два раза американским аналогам, устанавливаемым на истребитель F-18. На научно-технических конференциях по микроэлектронике, регулярно проводимых в Зеленограде, специалисты электронной промышленности к середине 1980-х годов неоднократно заявляли о значительном отставании отечественных разработок в области универсальных микропроцессоров и БИС-памяти и предлагали разработчикам военной радиоэлектроники ориентироваться на матричные БИС (МаБИС). Предполагалось, что при разработке РЭА на МаБИС за счет соединения интеллекта разработчиков РЭА и разработчиков планируемых к разработке МаБИС удастся избежать фатального отставания основных технических характеристик РЭА от зарубежных образцов. Поэтому не случайно в государственной программе унифицированных базовых моделей семейств бортовых ЭВМ (СБЭВМ), принятой в конце 1986 года для перспективных систем управления военных объектов, в качестве основной элементной базы СБ ЭВМ планировалось использование МаБИС, заданных в разработку ведущим предприятиям электронной промышленности директивным документом Правительства (1985 год, декабрь) «О создании изделий электронной техники для перспективных унифицированных бортовых вычислительных машин».

Наряду с планируемым созданием в период с 1987 по 1990 год целой гаммы бортовых матричных кристаллов и заказных СБИС по технологии КМОП, ТТЛШ и КНС указанным документом были заданы в разработку микропроцессорные БИС, БИС ЗУ, а также средства автоматизированного проектирования заказных БИС и СБИС.

Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР (1986 год, май), утвердившим «Основные направления работ по молекулярной электронике на 1986–2000 годы», главным НИИ электронной и радиопромышленности поручалась разработка к 1990 году экспериментальных образцов основных функциональных элементов для молекулярных ЭВМ, к 1995 году — экспериментальных образцов основных блоков молекулярных ЭВМ и к 2000 году — экспериментальных образцов высокопроизводительных молекулярных ЭВМ.

К сожалению, ожидания разработчиков РЭА, связанные с широким внедрением МаБИС в практику проектирования, не оправдались. Глубокий кризис экономики страны, последовавший за развалом СССР, потряс, в первую очередь, электронную промышленность: 80% производства изделий электронной техники оказалось размещенным в странах ближнего зарубежья, а ведущие научно-производственные комплексы электронной промышленности России практически оказались вне серьезной поддержки государства и вынуждены были переориентировать достигнутый к тому времени научно-технический потенциал на зарубежные заказы, связанные с производством полупроводниковой электроники для массовой коммерческой продукции (электронные часы, микрокалькуляторы и т.д.). Попытки НИИ «Аргон» в течение трех лет реализовать в производстве на заводе «Ангстрем» в Зеленограде разработанный для перспективной БЦВМ (из ряда СБЭВМ)

проект 17 типов СБИС, ориентированный на КМОП МаБИС «Такт-6000», также не увенчались успехом.

Намерения поддержать предприятия электронной промышленности за счет финансирования новых заказов на принципах долевого участия через Ассоциацию заказчиков и потребителей унифицированных изделий электронной техники «Фонд УНИЭТ», созданную в 1991 году по предложению предприятий, входящих в МКС №16, не увенчались успехом. Выделение заметных ассигнований на разработку новой компонентной базы в условиях нарастающего кризиса ОПК и резкого сокращения объемов финансирования государственного оборонного заказа даже для крупных предприятий стало проблематичным. Надежды на привлечение необходимых инвестиций в электронную промышленность через «Федеральный Фонд развития электронной техники», созданный для решения этой задачи Указом Президента РФ, также оказались несбыточными. В этих условиях использование зарубежной компонентной базы в разработках БЦВМ для перспективных объектов стало неизбежной реальностью.

Нерегулируемое и неконтролируемое государственными институтами власти использование электрорадиоизделий импортного производства в разработках РЭА специального назначения, включая и разработки БЦВМ, привело к неоправданно большому количеству примененных ЭРИ ИП, достигшему к середине 1990-х годов около 5000 типонаименований. Такое положение значительно осложнило решение задач импортозамещения и технологической независимости при создании специальной техники. С 1996 года к решению возникшей проблемы была подключена Ассоциация «Фонд УНИЭТ», которая в тесном взаимодействии с 22 ЦНИИ МО РФ приступила к упорядочению применения ЭРИ ИП. В целях оптимизации используемой номенклатуры ЭРИ ИП в разработках РЭА специального назначения при Экспертном совете (ЭС) Ассоциации было образовано 12 рабочих групп по классам ИЭТ, объединивших ведущих специалистов головных предприятий ОПК. Рекомендации по применению ЭРИ ИП и предложения по воспроизводству импортных аналогов в РФ Ассоциация оформляет издаваемой раз в два года «Номенклатурой», утверждаемой на расширенном заседании ЭС. В Ассоциации в качестве членов работают представители 143 предприятий, при формировании «Номенклатуры» собирается информация от 300 предприятий ОПК. «Номенклатура» используется в качестве руководящего документа для разработчиков РЭА, она принимается за основу при формировании Госзаказа на новые разработки ИЭТ и за счет резкого сокращения рекомендуемых к применению ИЭТ создает технико-экономические предпосылки для разработки и серийного производства воспроизводимых импортных аналогов для особо ответственных применений.

Широкое и повсеместное использование персональных компьютеров во всех отраслях народного хозяйства, включая оборонные ведомства, поставило на повестку дня вопрос о необходимости разработки БЦВМ, аппаратно и программно совместимых с моделями IBM PC, получившими наибольшее распространение. Среди коллективов-разработчиков БЦВМ, решавших эту задачу, был и наш «Аргон».

Созданные в середине 1990-х годов опытные образцы БЦВМ на микропроцессорах фирмы Intel серии 486 позволили провести модернизацию вы-

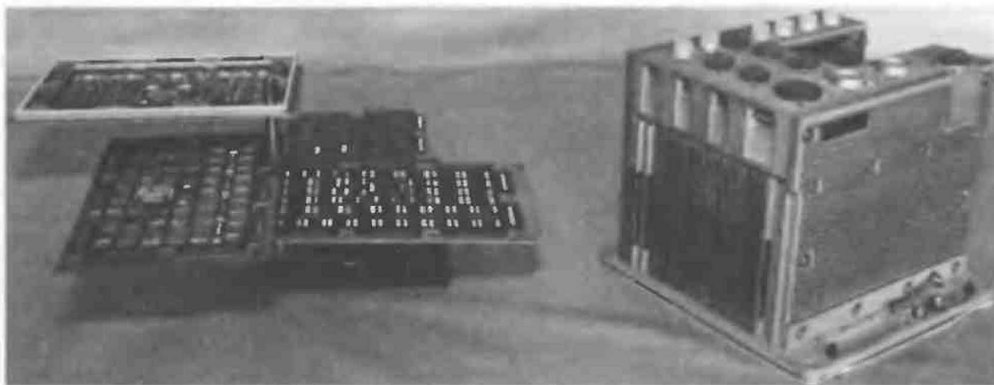


Рис. 3.8.5. БЦВМ, разработанная по технологии «Дора»

числительной системы авиационного пункта управления на основе БЦВМ А-50 путем замены морально устаревшего периферийного оборудования на «бортовую персоналку», которая за счет программно-аппаратной эмуляции реализовала не только функции периферийного оборудования, но и обеспечила задачи интеллектуального инженерного пульта.

С использованием сигнальных микропроцессоров TMS320C30 были разработаны встраиваемые вычислительные модули в формате VME 6U для сбора, обработки данных и управления внешними объектами в составе авиационных и мобильных связных терминалов. В последующем был использован отечественный микропроцессор ЦОС 1867 ВЦ1Ф (аналог TMS320C30).

Зарубежная компонентная база использовалась и для создания аппаратуры нового поколения аэрокосмических систем с длительным сроком активного существования (15-17 лет) и установкой в негерметизированных отсеках космического аппарата. Созданная в НИИ «Аргон» технология разработки и производства долговечной отказоустойчивой и радиационно стойкой аппаратуры (технология «ДОРА») успешно используется и на ряде других предприятий радиоэлектронного комплекса.

Разработанные НИИ «Аргон» в последние несколько лет вычислительные средства по технологии «Дора» (рис. 3.8.5) находятся в штатной эксплуатации в составе российских модулей Международной космической станции и в телекоммуникационных спутниках нового поколения серии «Ямал».

С развитием информационных технологий, сетевых методов обработки информации, расширением круга задач, решаемых в бортовых системах объектов, а также новыми возможностями, предоставляемыми современной высокотехнологичной компонентной базой, перед разработчиками БЦВМ были поставлены проблемные вопросы, связанные с необходимостью перехода от разработки БЦВМ к проектированию бортовых информационно-управляющих систем.

В основу бортовых вычислительных комплексов (БВК) нового поколения, разрабатываемых в НИИ «Аргон», положены принципы открытости и кооперации, что обеспечивает возможность достижения аппаратно-программной совместимости продуктов различных разработчиков и поставщиков. Развитие перспективных систем обмена информацией в БВК связано с со-

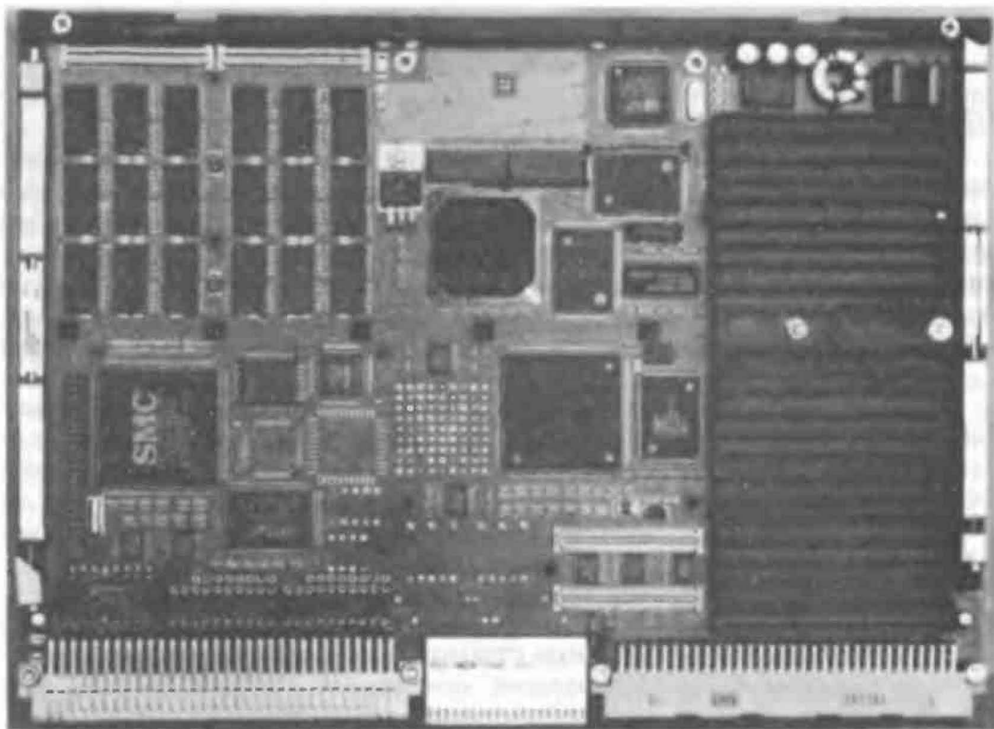


Рис. 3.8.6. Процессорный модуль БЦВК EA2170

зданием развитых шинных структур с единой архитектурой, многоцелевых программируемых интерфейсов, передающей среды с использованием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), специализированных БИС и ПЛИС поддержки различных протоколов. Многофункциональный БВК (рис. 3.8.6), предназначенный для сбора и обработки больших массивов цифровой и аналоговой информации в мощных информационных автоматизированных управляющих авиационных и мобильных системах реального времени, включает серверы различного назначения, автоматизированные рабочие места нескольких типов, систему электропитания, пульт управления и контроля. Базовая конструкция выполнена в стандарте Евромеханики, модули объединяются в систему с помощью магистрали VME — фактическим стандартом на рынке военных систем.

Успехи мировой микроэлектроники в достижении физически предельных технологических норм проектирования и изготовления высокоинтегрированной элементной базы поставили на повестку дня и перед разработчиками отечественной РЭА задачу перехода от применения универсальной компонентной базы к проектированию аппаратуры на принципах «система на кристалле» (СНК). Пионерские разработки в этом направлении сделаны рядом коллективов в нашей стране. К сожалению, изготовление выполненных российскими предприятиями проектов на сегодня возможно только на зарубежных фабриках, ввиду отсутствия необходимой технологической базы в России.

НИИ «Аргон» также приступил к выполнению научно-исследовательских работ по проектированию перспективных бортовых информационно-управляющих систем на принципах СнК в кооперации с разработчиками высокотехнологичных ИЭТ.

Принятые в сентябре 2006 года Правительством РФ решения по развитию отечественной электронной промышленности и планируемые ассигнования на эти цели позволяют надеяться на планомерное возрождение этой базовой отрасли, являющейся основой и фундаментом развития всего радиоэлектронного комплекса.

Выводы

1. До начала 1990-х годов все разработки БЦВМ и БЦВК выполнялись исключительно на отечественной элементной базе и обеспечивали паритет с разработками ведущих мировых производителей по основным тактико-техническим характеристикам.

Контролируемое отставание на 3–4 года отмечалось по отдельным разработкам по массогабаритным характеристикам, что было связано, в основном, с отставанием в разработках и в производстве отечественной микроэлектроники.

2. Глубокий кризис экономики страны, связанный с развалом СССР, нанес непоправимый ущерб народному хозяйству и, в первую очередь, одной из базовых отраслей, определяющей научно-производственный потенциал государства — электронной промышленности.

В сложившихся условиях использование ЭРИ ИП при проектировании РЭА стало неизбежной реальностью, что создало естественную угрозу технологической независимости РФ. Вместе с тем, возможность использования в разработках современной РЭА, включая БЦВК, ЭРИ ИП позволила избежать фатального отставания в радиоэлектронном приборостроении и создать оборонные комплексы с необходимыми тактико-техническими характеристиками.

3. Принимаемые в стране меры по развитию базовой отрасли — электроники создают определенные предпосылки по возрождению отечественной электронной промышленности — основы радиоэлектронного комплекса народного хозяйства.

Литература

- Штейнберг В.И. Принципы организации и разработки ряда совместимых бортовых вычислительных машин//Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук в форме научного доклада, НИИАА. — М., 1988.
- Терещенко М.А., Кондрашев А.Ф., Штейнберг В.И. Вехи полувекового пути НИИ «Аргон». — Проблемы информатизации, 1998, вып. 3-4.
- Штейнберг В.И. Комплекс БЦВМ «Аргон» за 40 лет — динамика развития//Материалы Международной конференции SORUCOM.2006 «Развитие вычислительной техники в России и странах бывшего СССР: история и перспективы», 3-7 июля 2006 г., Петрозаводск.

3.9. Динамика в конструировании и технологии производства РЭА

В.А. Шубарев, *доктор технических наук, профессор*

Способы и методы конструирования и технология производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются определяющей базой реализации заложенных в аппаратуру схемных и схемотехнических решений. Только используя прогрессивные технологические процессы и технологическое оснащение серийного производства электрорадиоэлементов, а также создавая передовые методы конструирования радиоэлектронной аппаратуры можно разработать и изготовить в необходимых количествах современную радиоэлектронную аппаратуру. По мере ужесточения требований к параметрам и характеристикам радиоэлектронных средств, появления новых конструктивных материалов, а также комплекствующих элементов с новыми свойствами, совершенствовались способы и методы конструирования и технология производства радиоэлектронной аппаратуры.

Разработки и внедрение технологий велись в направлении совершенствования сборно-монтажных работ, гальвано-химических производств, контроля, настройки и регулировки изготовленных изделий.

Основная задача — увеличение качества и объемов выпуска — была выполнена благодаря применению на заводах поточно-конвейерных методов производства и оснащению отдельных операций и всего процесса в целом средствами механизации, автоматизации и контроля.

Технология сборочно-монтажных работ в производстве РЭА

Работы по созданию поточно-конвейерных сборочно-монтажных производств начались в начале 1950-х годов, но особенно широкое развитие получили в конце 1950-х и начале 1960-х годов.

В 1955–1956 годах была создана и внедрена первая в Советском Союзе многопредметная конвейерная линия сборки узлов радиовзрывателя. До этого на предприятиях работали только однопредметные (ориентированные на сборку конкретных конструкций узлов без перестройки) конвейерные линии для сборки узлов радиоприемников и телевизоров.

На основе анализа конструкций конвейеров, эксплуатировавшихся на предприятиях различных отраслей промышленности, была разработана конструкция типового конвейера с технологическими характеристиками на уровне лучших по тем временам мировых образцов, в том числе:

- электронной сигнализацией параметров работы;
- возможностью изменения (регулировки) ритма и скорости перемещения;
- возможностью оперативной смены несущих тележек;
- возможностью регулировки положения агрегата;
- оснащением рабочих мест регулируемыми пультами питания электропаяльника, приспособлениями для обжига изоляции проводов и др.

Первые образцы конвейерной сборки были внедрены на ленинградских заводах, а затем поставлены на аппаратостроительные предприятия в количестве более 140 единиц.

В конце 1950-х годов был создан уникальный конвейер для изготовления жгутов бортовой сети ракет класса «земля-воздух». Конвейер не имел аналогов в мире и, несмотря на малую применяемость (в силу специфики продукции), получил высокую оценку.

Работы по механизации и автоматизации сборочно-монтажных операций до начала 1960-х годов сдерживались большим разнообразием конструктивно-технологического исполнения узлов и блоков РЭА, а так же конструктивными особенностями элементной базы, которая была непригодной для автоматизированного монтажа из-за многообразия форм выводов и тары поставок.

Потребовалась унификация, а в последующем и стандартизация конструкций элементов РЭА, которые наиболее эффективно реализовались по мере перехода на печатный монтаж. Накопленный в 1948–1954 годах опыт позволил начать работы по унификации отдельных элементов конструкции радиоэлектронной аппаратуры с объемным монтажом комплектующих элементов. В 1956 году был выпущен «Справочник технолога и мастера», в котором были заложены основы методологии сборочно-монтажных работ, а также элементы унификации конструкций, обеспечивающие возможность применения механизации отдельных технологических операций (рекомендуемые размеры формовки, присоединительные размеры дискретных радиоэлементов, типовые нормы обработки кабельных изделий).

В дальнейшем работы этого направления получили новое развитие в части освоения печатного монтажа как средства увеличения скорости монтажа и, соответственно, объемов выпуска продукции за счет механизации и автоматизации производства. Унификация конструкций аппаратуры для обеспечения серийнопригодности становится первоочередной задачей.

Повышение уровня технологичности узлов и блоков РЭА и переход на печатные платы создали предпосылки для разработки средств механизации, а затем и автоматизации отдельных технологических операций и процесса в целом. В 1960-х годах был разработан комплекс средств малой механизации для формовки и лужения выводов дискретных радиоэлементов и микросхем, установки на печатные платы, монтажа в узлах и блоках электропаяльниками, а на печатных платах групповыми способами.

Для реализации этой технологии были разработаны и изготовлены:

- полуавтомат для формовки интегральных схем с планарными выводами ГГ-2125;
- автомат с программным управлением для пайки ИС на печатных платах ГГ-2129;
- агрегат пайки печатных плат волной припоя для технологии автоматизированной пайки монтажных соединений;
- полуавтоматы для установки и крепления радиоэлементов с цилиндрической формой корпуса и осевыми выводами на печатные платы;
- автоматическая линия, на которой печатная плата перемещалась под укладочными головками автоматически, что позволяло собирать электронный модуль полностью на линии. Линии сборки использовались

в производстве унифицированных функциональных узлов на печатных платах для телевизоров.

Важным этапом совершенствования технологии сборочно-монтажных работ стали разработка и внедрение комплекса средств автоматизации, включавшего полуавтоматы с пантографическим программным управлением (для установки и крепления резисторов, конденсаторов и диодов с осевыми выводами и цилиндрической формой корпуса, ИС в корпусах типа ДИП, транзисторов в круглых корпусах на печатные платы) и линию пайки волной припоя (АП-10).

Применялось это оборудование, в частности, при изготовлении электронно-вычислительных машин. В последующие годы это оборудование было усовершенствовано: введено электронное управление, созданы автоматы установки с перестройкой установочных размеров, увеличена номенклатура обрабатываемых элементов.

Параллельно продолжались работы по созданию автоматизированных комплексов оборудования для сборки электронных модулей с применением новой элементной базы и традиционной элементной базы в таре, пригодной для автоматизированного монтажа. Комплекс включал в себя автомат распаковки ИС из тары, автомат лужения выводов, автомат дозирования припоя (методом напрессовки припоя на выводы), автомат с программным управлением для установки и пайки ИС на печатные платы. Отдельные автоматы объединялись в поточную линию с помощью специальных технологических кассет. В 1976–1985 годах было изготовлено и внедрено свыше 80 комплексов этого оборудования.

Развитием этого комплекса оборудования послужило создание нового комплекса, который включал в себя сиквенсор-автомат переклейки радиоэлементов с цилиндрической формой корпуса и осевыми выводами из ленты в ленту по заданной программе и автомат установки радиоэлементов из программно упакованной ленты на печатную плату. Автомат установки перемещал печатную плату по заданной программе под укладочной головкой, которая автоматически перестраивалась по заданной программе размер формовки радиоэлемента перед установкой на плату. При необходимости комплекс дополнялся автоматами для вклейки элементов, поставляемых россыпью, в ленту. Этот комплекс предназначался для сборки бытовой РЭА.

В 1977–1978 годах были проведены работы по увязке оборудования в единый технологический цикл в виде комплексной системы автоматизированной сборки электронных модулей. Участок подготовки ИС и дискретных радиоэлементов, оснащенный автоматическим и полуавтоматическим оборудованием, был связан конвейером с участком сборки, оснащенный автоматами с программным управлением для установки и пайки ИС, и далее с участком контроля, настройки и регулировки. Планово-экономическое и организационно-техническое управление комплексом КСАС (рис. 3.9.1) осуществлялось от ЭВМ.

Положительный опыт многолетней эксплуатации КСАС создал предпосылки для создания полностью автоматизированного сборочного производства электронных модулей. Однако работы не получили продолжения из-за наступивших изменений в стране.

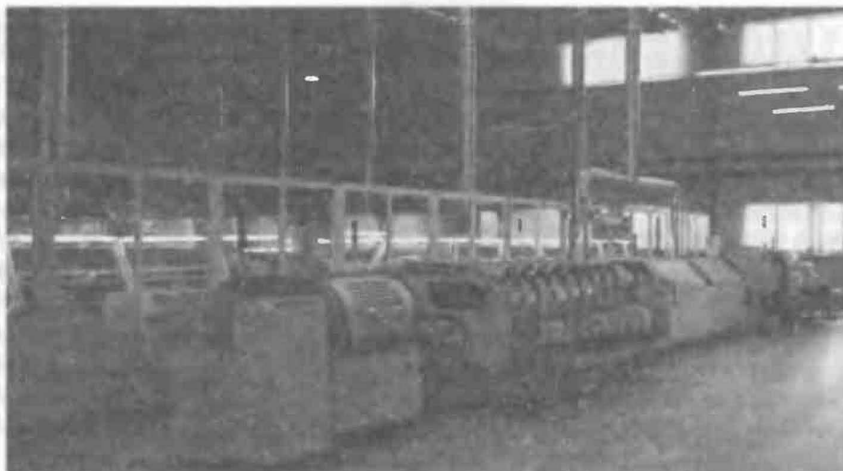


Рис. 3.9.1. Фрагмент линии автоматизированного производства электронных модулей КСАС

Печатные платы и химико-технологические процессы

Технология печатных плат. В СССР переход к печатному монтажу начался в 1950-х годах. Печатные платы получали электрохимическим способом: вначале на гетинакс без применения тока наносили медь, затем формировали маску фоторезиста и гальваническим путем наращивали проводниковые дорожки. Этот процесс был внедрен в производство унифицированных функциональных узлов (УФУ) на печатных платах.

Качество таких плат, изготавливаемых на диэлектриках электрохимическим способом, было низким по ряду основных показателей: сопротивлению проводников, сопротивлению изоляции, плотности монтажа и др. Процесс получения плат был трудоемким. Кардинальным направлением в усовершенствовании технологии был переход на фольгированный гетинакс, а затем на стеклотекстолит.

Широкое распространение печатных плат в разработке и производстве новой радиоэлектронной аппаратуры в период с 1965 по 1975 год стимулировало решение задач: разработки эффективных технологических процессов изготовления плат, в том числе многослойных; организации разработки в смежных отраслях промышленности новых материалов; разработки оборудования для изготовления плат в серийном производстве.

В технологических задачах основным являлось создание так называемого «базового технологического процесса». Новая технология основывалась на применении сухих пленочных фоторезисторов взамен жидких и новых гальванохимических процессов. При этом были решены проблемы стабилизации растворов химического меднения, повышения эффективности гальванических процессов, совершенствования получения рисунка схемы.

Создание оборудования для серийного производства плат осуществлялось по мере совершенствования технологии и расширения возможностей



использования зарубежного опыта. На ранней стадии были разработаны карусельный полуавтомат для химического меднения, карусельный автомат для гальванических операций, специальный агрегат для травления с подачей раствора на платы через форсунки. С учетом достижений мирового уровня, были разработаны и налажено производство оборудования для сверления отверстий в платах, для обработки пленочных фоторезистов и для автоматических линий без гальванических процессов.

Дальнейшее развитие технологии в 1980-х годах было тесно связано с общим процессом миниатюризации аппаратуры. Платы, изготавливаемые по типовым процессам на фольгированных материалах с толщиной медной фольги 35 и 50 мк, имели минимальную ширину проводников и зазоров 0,4 мм. Проводились работы по уменьшению этого параметра до 0,15–0,10 мм. В 1980-е годы производство плат в отрасли в основном соответствовало мировому уровню.

Химико-технологические процессы повышения долговечности и сохраняемости аппаратуры. В середине прошлого века потребность в радиоаппаратуре стала резко возрастать. Существенно возросли требования к долговечности и сохраняемости аппаратуры в различных условиях ее применения, поэтому в ее конструирование стали закладывать принципиально новые решения и новые материалы.

Появилась необходимость проведения специальных работ по совершенствованию всех операций химических сборочно-монтажных процессов, в том числе и таких, как обработка и защита металлических покрытий, нанесение лакокрасочных покрытий, герметизация полимерными материалами и др.

Так, например, для совершенствования технологии металлического покрытия требовалась разработка составов растворов и электролитов, отвечающих новым требованиям, разработка новых покрытий металлами, разработка и организация промышленного выпуска средств механизации и автоматизации гальванических производств. С 1970-х годов в гальванических цехах появились автоматы серии АГ, разработанные ЛНПО «Авангард». Это была серия многопроцессорных линий с программным управлением и автооператором консольного типа. Автоматы избавили людей от необходимости находиться в зоне воздействия агрессивной среды.

В интересах совершенствования технологии лакокрасочных покрытий был обобщен передовой опыт лакокрасочных производств в стране и разработан комплекс отраслевых стандартов, охватывающих все операции, связанные с применением лакокрасочных материалов, с обеспечением необходимым оборудованием, в первую очередь, прогрессивных процессов. Была разработана линия окраски изделий методом электроосаждения, методика маркирования электрокапеструйным методом, освоена новейшая технология получения покрытий из газовой фазы парилеом или полипараксилилеом.

В целях совершенствования технологии герметизации полимерными материалами были разработаны: установка для пропитки в принудительных режимах, смесители для приготовления компаундов и заливки, специальные рабочие шкафы, приборы контроля — всего более 10 единиц оборудования. Для реализации нового направления герметизации микросборок порошковым материалом за рубежом было закуплено оборудование. Часть этого обо-

рудования была воспроизведена и поставлялась изготовителям микросборок.

Совершенствование технологии склеивания достигалось применением однокомпонентных и быстроотверждающихся клеев, клеев-расплавов, пленочных, порошковых, клеев с функциональными свойствами (т.е. электропроводных, теплопроводных, оптически прозрачных). Применялся экономичный способ склеивания с использованием ультразвука. Был разработан и внедрен клей, фиксирующий сборочные единицы инфракрасным излучением на печатных платах перед пайкой. Серийно изготавливалась установка для нанесения клеев низкой и средней вязкости.

Контрольно-измерительная аппаратура для электрорадиоизделий, печатных плат, микросборок, тестового контроля узлов и блоков, СВЧ-узлов и антенн

Наряду с конструктивно-технологической отработкой радиолокационных изделий, технология настроечно-регулирующих работ и разработка контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) изначально считались важнейшими задачами производства РЭА. Было установлено, что при разработке и производстве РЭА есть потребность в измерении почти 2000 физических величин и параметров, но лишь 800 могли быть обеспечены существовавшими в 1950-е годы методами и стандартными рабочими средствами измерения (РСИ).

Развитие радиолокационной техники в 1960–1980-х годах предъявляло высокие требования к измерениям параметров изделий. В те годы развитие изделий новой техники обычно опережало развитие и совершенствование средств измерения по точностным характеристикам, быстройдействию, по автоматизации и способам обработки результатов измерения. Кроме того, производственная база для основных изделий новой техники тоже совершенствовалась более динамично, а новая элементная база в первую очередь поставлялась для изделий новой техники, но не для средств измерения.

Повышение требований к точности параметров изделий требовало повышения точности их измерения средствами контроля, как правило, на порядок, а это значило, что и образцовые средства измерения, используемые для метрологической аттестации рабочих средств измерения, методики аттестации тоже должны были быть новыми. Специфика разработки и производства конкретных образцов радиоэлектронной аппаратуры требовала создания и применения в технологических циклах нестандартных средств измерения (НСИ).

Аппаратура контроля СВЧ-узлов и антенн (1949-1985 гг.) Первоначально создавались отдельные НСИ для настроечно-регулирующих работ в производстве РЛС, таких как «Кобальт», «Изумруд», ПСБН-М, «Цезий» и др. Позже стали разрабатываться уже автоматизированные измерительные комплексы. Один из первых приборов, разработанный в 1949-1952 годах и переданный серийному предприятию, был предназначен для измерения технических характеристик и настройки блока дальности изделия «Кобальт».



Несмотря на ранний период развития НСИ многие разработки выполнялись на высоком уровне, в том числе на уровне изобретений. Вот примеры. В 1955–1959 годах был разработан автоматизированный измеритель диаграмм направленности антенн в 3-сантиметровом диапазоне для изделия ПСБН-М на сокращенных расстояниях в условиях цеха (вместо разнесенных на большое расстояние передающей и испытываемой антенн). Это было достигнуто за счет применения диэлектрической линзы. Второй пример: еще в 1950-е годы были начаты работы по измерению параметров первых вариантов фазированных антенных решеток (ФАР) и антенных обтекателей.

На раннем этапе проводились также работы по автоматизации измерений поляризационных характеристик антенн, разработке гаммы поворотных устройств.

В начале 1960-х годов получили развитие работы по созданию КИА для СВЧ-техники. Были решены следующие задачи:

- отработан технологический процесс изготовления крупногабаритных диэлектрических радиопрозрачных антенных обтекателей на основе стеклоткани с созданием необходимых стендов, КИА, приборов, методик измерения как для этапа разработки таких обтекателей, так и для производства, включая военную приемку;
- создана система, имитирующая в наземных условиях температурный нагрев обтекателя, изменяющийся по заданному закону за конкретное время полета;
- создана КИА, предназначенная для контроля на промежуточных технологических операциях, на этапе сборки отдельных СВЧ-устройств и всего изделия в целом (измерительный комплекс «Сигма»).

Работа выполнялась в интересах создания самолетной и ракетной аппаратуры. Были разработаны: измеритель параметров диэлектриков при нормальной и повышенной температурах до 80°C (ИДТ-1), автоматизированный комплекс «Бета-10» (рис. 3.9.2) для измерения выходных параметров антенных обтекателей (КПД, угловые ошибки, градиент угловой ошибки).

По разработанной конструкторской документации (КД) была изготовлена серия комплексов указанной КИА, что позволило обеспечить серийный выпуск антенных обтекателей на ряде заводов страны.

Этой работе уделялось много внимания. Дважды, в 1963 и 1965 годах, производство обтекателей и разработка комплекса «Бета-10» обсуждались на заседаниях ВПК под председательством Л.В.Смирнова.

Далее для различных типов антенн были разработаны комплексы «Бета-10А», «Бета-10К», «Бета-10М» и внедрены на предприятиях Ленинграда, Москвы, Жуковского, Киева, Кыштыма. Позже была разработана КД на унифицированный комплекс «Диаграмма», а в 1975 году — выпущен отраслевой стандарт «Устройства антенные СВЧ. Методы измерения диаграмм направленности и ошибок пеленга».

Одновременно был изготовлен оригинальный комплекс «Тепло», давший возможность моделировать «летные» испытания в наземных условиях, и коллиматорное устройство для контроля СВЧ-параметров антенных решеток в условиях малогабаритной безэховой экранированной камеры для С-300.



Рис. 3.9.2. Установка контроля СВЧ-параметров антенн «Бета-10»

Приобретенный опыт позволил в период с 1980 по 1985 год создать образцы автоматизированной аппаратуры контроля параметров приемного и передающего модулей РЛС «Волга» и для контроля параметров антенн МКС «Буран».

Аппаратура контроля объемного монтажа, печатных плат, подложек микросборок (1970–2000 гг.). Процесс контроля монтажных структур связан с проверкой большого числа электрических цепей. Только автоматизация позволяла сократить время контроля, уменьшить численность обслуживающего персонала, исключить субъективные ошибки. Разработанная аппаратура представляла собой автоматизированные средства контроля. В технологическую схему вошли операции входного контроля материалов, технологический, операционный и приемочный контроль печатных плат, объединительных плат, жгутов, кабелей, шлейфов, стоек, шкафов и т.п. Причем вопрос решался для всех видов монтажа: объемного, печатного, микросборок.

Одновременно с созданием КИА разрабатывался типовой технологический процесс контроля монтажа, рассматривались требования к контроле-пригодности монтажных структур, разрабатывались и внедрялись отраслевые стандарты, решались вопросы и методы конструирования КИА для монтажных структур. В соответствии с этими положениями была обоснована номенклатура комплексов типовой автоматизированной аппаратуры, и уже к концу 1980 года основные технологические операции контроля монтажных структур были обеспечены типовой КИА. При создании аппаратуры решались многие сложные схемотехнические, технологические, конструкторские и другие задачи. Коллектив конструкторов создал типовую структуру аппаратуры с использованием базовых несущих конструкций. Эту типовую структуру можно было с минимальной доработкой применять при изготовлении гаммы аппаратуры.

Большую проблему представляло обеспечение надежного, стабильного контактирования. Особенно важным было создание многоточечного контактирования к печатным платам и платам микросборок. Всего за 1970–



Рис. 3.9.3. Модернизированная установка тестового контроля УТК-1М

2000 годы по этому направлению разработано и внедрено при серийном производстве более 1000 единиц аппаратуры.

Аппаратура тестового контроля и диагностики цифровых узлов (1970–2000 гг.). Первые образцы установок тестового контроля цифровых узлов УТК-1 и УТК-2 были разработаны еще в начале 1970-х годов. По своим эксплуатационным характеристикам установки значительно превосходили имевшиеся в то время в стране подобные системы контроля. Было выпущено более 100 единиц, которые быстро разошлись по предприятиям отрасли. На рис. 3.9.3 показана модернизированная установка УТК-1М. В 1976 году были разработаны новые модели УТК-4, УТК-5М и проведена модернизация ранее разработанных установок.

Высокая надежность установок УТК во многом определялась элементной базой, применяемой при разработке. С большим трудом разработчикам КИА удалось получить разрешение на использование в УТК дефицитных по тем временам микросхем серии 133, гиперболических разъемов и других ЭРЭ, применяемых лишь в приоритетных РЭС.

Разработка КИА этого направления сопровождалась созданием методики проведения контрольных тестов, которая в дальнейшем была введена в пять отраслевых стандартов. Стандарты применялись практически во всех профильных отраслях промышленности СССР.

Большой спрос на установки УТК привел к тому, что было принято решение об увеличении объемов их производства. В общей сложности заводами было выпущено более 10 тысяч установок УТК разной модификации, в том числе УТК-1, УТК-2, УТК-2М, УТК-5, УТК-5М, УТК-3, УТК-21, УТК-2000, УТК-128/256. Многие образцы установок работают до настоящего времени.

Дальнейшее развитие радиоэлектронных средств (РЭС) поставило перед разработчиками КИА задачи контроля микропроцессорных цифровых устройств. В 1980 году была разработана система тестового контроля микро-

процессоров. Отличие от предыдущих моделей заключается в повышении скорости обмена информацией с объектом контроля (до 70 кГц) и увеличении числа каналов до 256. Далее была разработана модель УТК-6, в состав которой вошла ЭВМ СМ-4, обеспечившая составление программы контроля и управление контролем, в 2001 году — система УТК-21 с управлением от ПЭВМ.

С 2005 года выпускается система тестового контроля микропроцессорных устройств УТК-128/256 (модификация УТК-2000) со скоростью обмена с цифровым устройством до 2,5 МГц.

Аппаратура контроля микросборок и микросхем (1975—1986 гг.) В связи с развитием производства большой номенклатуры микросборок (МСБ) перед предприятиями отрасли встала задача обеспечения контроля их параметров, в том числе микросборок с различным конструктивным исполнением.

Для приборов контроля микросборок (ПКМ) было принято типовое решение с применением блока приконтактной электроники и соответствующим контактирующим устройством для проверяемой МСБ. Измерение параметров осуществлялось с помощью стандартных измерительных приборов, подключаемых к МСБ через блок приконтактной электроники. Параметр выбирался на блоке коммутации с помощью переключателя. Такое простое решение позволило обеспечить контроль всей номенклатуры МСБ с помощью 8 наименований ПКМ, использовать разработанные контактные устройства, базовые несущие конструкции для КИА. Было выпущено более 50 единиц ПКМ. Выбранный принцип построения ПКМ позволил реализовать и автоматизированный контроль МСБ в гибком автоматизированном производстве (прибор КПМ-15).

Для входного контроля параметров и функционирования цифровых интегральных микросхем, поставляемых предприятиями МЭП, была разработана универсальная установка входного контроля цифровых интегральных схем типа 2ИП2-01. Для функционального контроля цифровых микросхем была также разработана установка УФК-1. Более 10 образцов УФК-1 было изготовлено и внедрено на предприятиях отрасли.

Функционально-узловой принцип конструирования блоков аппаратуры. Унифицированные функциональные узлы

Началом работ по созданию типовых конструктивно-технологических методов проектирования радиоаппаратуры явилось создание ряда унифицированных функциональных узлов (УФУ). Высокая эффективность применения УФУ в аппаратуре объяснялась их высокой надежностью, возможностью резкого сокращения сроков и стоимости разработки аппаратуры, возможностью механизации и автоматизации ее производства, широкой производственной кооперацией.

В конце 1950-х годов была проведена первая в стране разработка комплекса УФУ «Элемент-1» с использованием электронных ламп. Вскоре был разработан ряд УФУ «Элемент-2» на основе отечественных полупроводниковых приборов (рис. 3.9.4). В общей сложности было разработано около 150 типов.

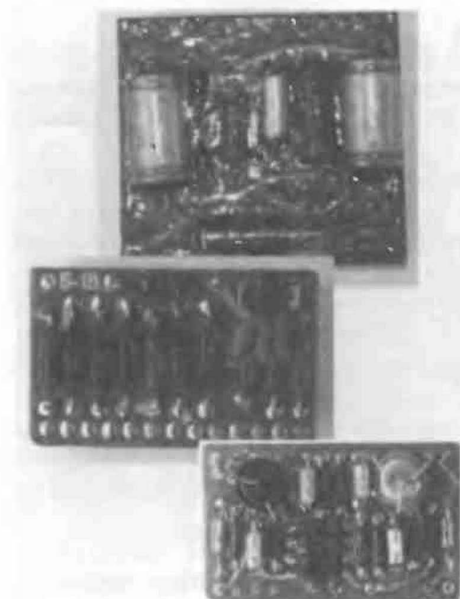


Рис. 3.9.4. УФУ на лампах типа «дробь» и на полупроводниковых приборах

Унификация принципов построения функциональных узлов позволила существенно сократить ручной труд на их сборке. Была разработана автоматическая линия сборки УФУ с программным управлением, включая формовку выводов компонентов, установку их на печатную плату, пайку волной припоя. Создана контрольно-измерительная аппаратура для функционального контроля УФУ. Разработанный позже расширенный ряд УФУ включал в себя около 400 наименований. На протяжении нескольких десятков лет радиотехнические предприятия выпускали УФУ, нашедшие массовое применение в аппаратуре различного функционального назначения, длительное время серийно выпускавшейся на заводах оборонной промышленности.

Фактически этот этап эволюции аппаратуры был первым в создании функционально-узловой метода ее проектирования. Быстрое распространение функционально-узловой метода проектирования и модульного принципа компоновки аппаратуры объясняется, с одной стороны, возможностью реализации большой номенклатуры различных типов блоков аппаратуры одной разработки небольшим количеством стандартных узлов, конструкция которых при определенных условиях может быть сведена к оптимальному, в определенном смысле, унифицированному варианту.

С другой стороны, функционально-узловой метод проектирования аппаратуры позволил на уровне функциональных узлов использовать стандартные технические решения в различных видах аппаратуры. Модульность унифицированных узлов сыграла существенную роль в развитии нового модульного принципа конструирования аппаратуры.

Идея унификации и заложенные принципы компоновки оказались впоследствии плодотворными при разработке микросборок, узлов функциональной электроники и стандартных электронных модулей.

Микросборки

Принципиально новым направлением в конструировании аппаратуры и технологии ее производства явилось создание новых составных частей аппаратуры — микросборок.

В 1965 году проходили бурные споры между представителями электронной промышленности и радиопромышленности по вопросу: должны ли аппаратостроительные предприятия заниматься разработкой и производством микросхем или эту задачу должны решать специализированные предприятия электронной промышленности. Эти споры продолжались до тех пор, пока в 1974 году на совещании в Научном центре в г. Зеленограде при участии представителей радиопромышленности, электронной промышленности и Минобороны не было принято решение квалифицировать микросхемы частного применения как новый класс изделий микроэлектроники — микросборки, предназначенные для комплексной миниатюризации конкретной аппаратуры. Добавка слова «сборка» придала окраску аппаратурной принадлежности.

Была создана концепция и разработана нормативно-технологическая документация на новый класс комплектующих изделий РЭА — микросборки. Основу идеи построения микросборки составляло использование в ее конструкции (в едином корпусе) наряду с типовыми полупроводниковыми интегральными схемами гибридных толсто- и тонкопленочных интегральных схем, бескорпусных полупроводниковых приборов, а также изделий функциональной электроники с применением пленочных методов монтажа. Такой принцип построения функциональных устройств обеспечивал при их применении в аппаратуре резкое снижение массогабаритных показателей, повышение надежности, технологичности аппаратуры, помехоустойчивости, чувствительности, дальности действия и других тактико-технических характеристик аппаратуры.

Первые тонкопленочные и толстопленочные микросборки по своей сложности мало чем отличались от УФУ, но были на порядок лучше по своим размерам, экономичности, надежности, технологичности. Далее номенклатура микросборок расширялась в направлении увеличения сложности схем, повышения рабочих частот вплоть до СВЧ-диапазона, повышения мощности рассеяния, улучшения стабильности их параметров и характеристик. Степень интеграции достигла более 1000 элементов в корпусе. Пример блока приемопередающего устройства, выполненный на микросборках и ПАВ-изделиях, приведен на рис. 3.9.5.

На первом этапе микросборки разрабатывались для конкретных блоков аппаратуры, а затем были разработаны ряды микросборок серий 245, 247, 248, 290, 447, 448, 848, нашедшие применение во многих видах РЭА (рис. 3.9.6).

Наряду с оригинальными исследовательскими разработками (танталовая технология, селективное травление) разрабатывались и типовые технологические процессы. Впервые в стране была разработана технология «сухого» ионного травления толстых металлических пленок с вертикальными стенками применительно к изготовлению СВЧ-микросборок, что позволило изготавливать СВЧ-устройства с высокими электрическими параметрами. Кроме

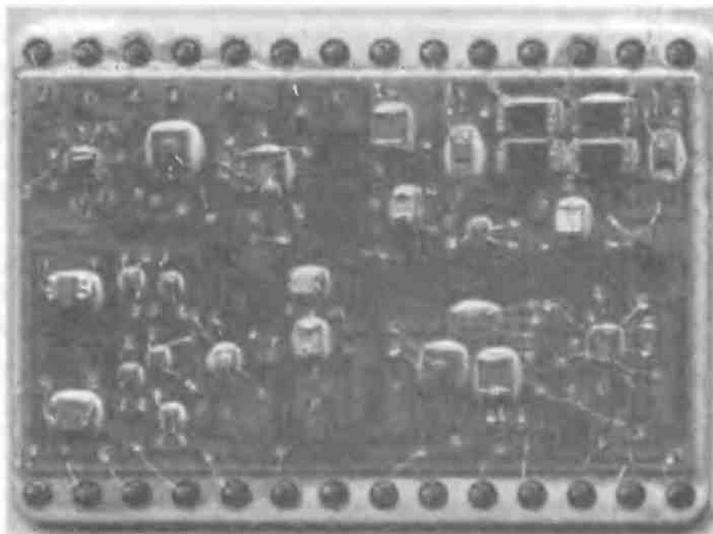


Рис. 3.9.5. Типичная конструкция микросборки

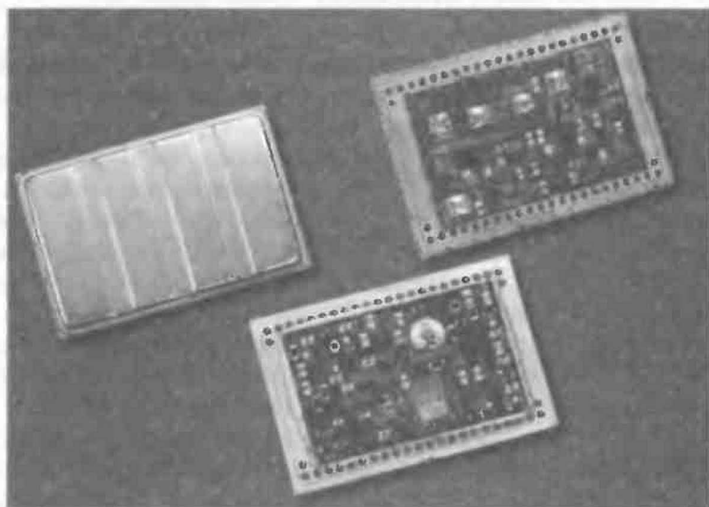


Рис. 3.9.6. Образцы тонкопленочных микросборок

того, были разработаны оригинальные технологические процессы изготовления многоуровневых коммутационных плат на полиимидном основании, на основе алюминия и его анодных окислов. Рис. 3.9.7 иллюстрирует лабораторно-производственный участок по разработке и производству тонкопленочных микросборок в ЛНИТИ.

Одновременно создавалась и научно-техническая документация. Так, был выпущен ОСТ 4 ГО.054.028 «Микросборки интегральные гибридные тонкопленочные специализированные 1-й и 2-й степени интеграции. ТТП». Всего за период с 1970 по 1980 год было выпущено 10 отраслевых стандар-



Рис. 3.9.7. Лабораторно-производственный участок по разработке и производству тонкопленочных микросборок в ЛНИТИ

тов по технологии и конструированию (в том числе ОТУ), внедрение которых позволило получить на предприятиях отрасли значительный технический и экономический эффект.

Работа по микросборкам проводилась комплексно — одновременно создавались новые материалы для тонких и особенно для толстых пленок и организовывалось их производство. Немаловажным являлось создание ряда металлостеклянных корпусов унифицированной конструкции для герметизации микросборок. Значительная работа была проведена по созданию герметичного спая стекла с металлом для выводов микросборок и по отработке технологии лазерной сварки корпусов. Было организовано серийное производство корпусов. Разработанные корпуса нашли широкое межотраслевое применение и до сих пор используются в производстве изделий специальной микроэлектроники на многих предприятиях России и стран СНГ.

Большое значение приобретало снижение трудоемкости изготовления микросборок, их удешевление, повышение надежности и, соответственно, переход к автоматизированной сборке. Необходимо было решить задачу унификации применяемых компонентов по конструктивному оформлению, форме выводов и другим конструктивно-технологическим параметрам, организации их поставки для условий механизированной и автоматизированной сборки, пайки, сварки. Решить задачу поставки радиоэлементов позволила разработка и внедрение на предприятиях регламентирующего стандарта ГОСТ 20.39.405-84 «Изделия электронной техники и электротехнические для автоматизированной сборки аппаратуры. Общие требования». Другим путем снижения трудоемкости производства микросборок и их стоимости был переход на герметизацию полимерными материалами. Это упрощало конструкцию изделия, однако такие микросборки выдерживали менее жесткие воздействия внешних факторов, чем аналоги в метал-



лостеклянных корпусах. Такие микросборки нашли применение в гражданской аппаратуре.

Потребность в микросборках увеличивалась. Объем производства достиг 500 тыс. микросборок в год. В дальнейшем были созданы десятки цехов по производству микросборок на аппаратостроительных заводах, что полностью обеспечило потребности страны в этих изделиях.

Функционально-модульный принцип построения РЭС. Системы базовых несущих конструкций. Унифицированные электронные модули

Необходимость в сокращении количества типов конструкций, их унификации как способа повышения технологичности аппаратуры, тактико-технических и экономических характеристик определили актуальность, цели и задачи разработки системы базовых несущих конструкций (БНК) и унифицированных электронных модулей (УЭМ).

Начиная с 1965 года, были разработаны самолетные ответчики, другие опознавательные устройства и многоканальные фильтровые устройства в виде электронных модулей (ЭМ). Опыт изготовления этих ЭМ подтвердил возможность и целесообразность создания типовых методов конструирования и производства РЭА. Он показал также, что с повышением быстродействия цифровых схем принципы конструирования и вопросы схемотехники становятся взаимосвязанными. Обеспечение функциональной устойчивости работы цифровых схем достигалось не только радиотехническими методами, но и рациональными конструктивно-топологическими решениями, направленными, например, на устранение эффекта «состязания» в схемах и других дестабилизирующих факторов. Поэтому были разработаны методы обеспечения функциональной устойчивости цифровой аппаратуры, на основе которых получены устойчивые типовые функциональные схемы различных устройств, обобщенные для разработчиков РЭА в стандарте ОСТ 4 ГО.303.201 «Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры на микросхемах. Типовые функциональные схемы цифровых устройств».

Начиная с 1970-х годов и по настоящее время, в области унификации и стандартизации особая значимость придавалась вопросам, связанным с созданием унифицированных электронных модулей для аппаратуры на основе широкого применения базовых конструкций.

С началом внедрения в отечественную практику международных стандартов разработки технического комитета (ТК 48) «Электромеханические компоненты (соединители) и механические конструкции для электронного оборудования» Международной электротехнической комиссией (МЭК) вошел в обиход термин «механическая конструкция для электронного оборудования». Для отечественной практики более привычен был термин «несущая конструкция», вошедший в нормативную документацию и относящийся к элементам конструкции или их совокупности, предназначенным для размещения технических средств и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации. Стандартизованные по габаритным, установочным и присоединительным размерам несущие конструкции получили название базовые несущие конструкции — БНК.

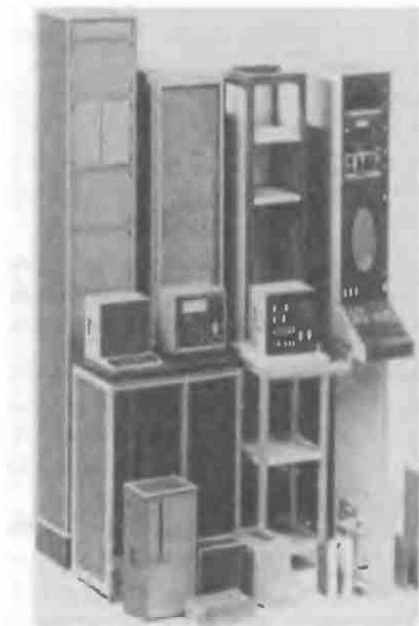


Рис. 3.9.8. Набор БНК по уровням разукрупнения

Основными требованиями, предъявляемыми к БНК РЭС являются:

- размещение РЭС с минимальными потерями площади и объема;
- соответствие изделий требованиям отечественных и международных стандартов по конструктивным и размерным характеристикам;
- размерная совместимость изделий различных уровней разукрупнения, а также наличие интерфейсов совместимости изделий, построенных в разных модульных сетках (метрической и дюймовой).

Создание БНК (рис. 3.9.8) позволило перейти на качественно новый уровень в разработке РЭС на основе унифицированных ЭМ (УЭМ) единой системы высокопроизводительных интерфейсов, что, в конечном итоге, способствовало:

- повышению технико-экономической эффективности разработки, производства и эксплуатации РЭС;
- росту эксплуатационной надежности РЭС;
- внедрению новых информационных технологий;
- конкурентоспособности аппаратуры на международном рынке;
- решению вопросов импортозамещения электронных модулей.

В 1970-х годах были определены принципы модульного построения РЭА и разработаны первые в стране унифицированные конструкции модулей, а к 1980-м годам комплекс проведенных работ по унификации БНК позволил сократить их номенклатуру в несколько раз.

Дальнейшее развитие разработок в области БНК связано с обеспечением перспективных РЭС: создание унифицированных БНК для ЕС ЭВМ, для



аппаратуры управления воздушным движением и радионавигации, для гражданской авиации, автоматизированных информационных систем и систем управления, аппаратуры радионавигации морского флота и рыбного хозяйства. К началу 1990-х годов была разработана новая современная система БНК. Реализация программных работ успешно продолжалась до 1990-х годов и практически обеспечила задел на будущее.

Требования к унификации радиоэлектронной аппаратуры на базе ЭМ и БНК вызвали необходимость их конструктивной совместимости и взаимозаменяемости, обеспечивающих повышение технического уровня, уровня технологичности.

Внедрение магистрально-модульного принципа построения РЭА, осуществление унификации как схемных, так и конструкторско-технологических решений позволили резко сократить цикл «разработка — производство — эксплуатация». Функции единой конструктивной основы должна выполнять система БНК межотраслевого применения.

Период 1990-х годов негативно отразился на дальнейшей активизации работ в области развития, разработки и производства РЭС на основе БНК. Практически прекратили свое существование специализированные производства, были прекращены централизованные поставки БНК и их составных частей, нарушены технические и экономические связи. Но в 2004 году производство БНК возобновилось на основе стальных материалов с использованием японского металлообрабатывающего оборудования.

60-летний опыт опережающего развития конструкторско-технологических решений позволил обеспечить серийное производство всех видов РЭА заданного качества и в необходимых количествах. Основополагающие достижения в этой области:

- прогрессивные функционально-узловой и функционально-модульный принципы конструирования аппаратуры;
- новая специализированная компонентная база микроэлектроники (микросборки и изделия функциональной электроники);
- базовые несущие конструкции по всем уровням разукрупнения и стандартные электронные модули;
- типовые технологические процессы производства от элементов изделий специальной микроэлектроники до сборки аппаратуры в целом;
- контрольно-измерительная аппаратура для производственного контроля элементов, узлов и блоков аппаратуры, в том числе тестового контроля;
- нормативно-техническая документация в виде ОСТов и ГОСТов по всем основным аспектам и объектам конструирования и технологии производства.

Развито новое направление микросистемотехники и микросенсорики для обеспечения высокого уровня интеллектуализации электронной аппаратуры.

Достигнутый уровень развития отечественной науки и практики в области технологии производства РЭА во многом обусловлен работами, проводимыми при непосредственном участии головного предприятия ОАО «Авангард».

3.10. Зенитно-ракетные комплексы и системы противовоздушной обороны¹

А.В. Рязанов, кандидат технических наук,
Е.М. Сухарев, доктор технических наук, профессор

Система С-25

Решение о создании системы ПВО для Москвы было принято Правительством в августе 1950 года. По словам известного специалиста в области радиотехники П.Н. Куксенко, назначенного одним из главных конструкторов системы, И.В. Сталин поставил задачу сделать оборону Москвы такой, чтобы через нее не мог проникнуть ни один самолет. Создание этой системы, в которой предполагалось использовать группу зенитно-ракетных комплексов (ЗРК), стало одной из важнейших государственных оборонных задач, и для ее решения были приняты особые меры. Система получила наименование «Беркут». Была создана головная организация — Конструкторское бюро № 1 (КБ-1). Разработка заданий на проектирование строительной части системы была возложена на Радиотехническую лабораторию члена-корреспондента АН СССР А.Л. Минца.

Облик системы определялся, прежде всего, тем, какие будут радиолокационные средства, обеспечивающие работу ЗРК. Было решено, что основным средством обеспечения непроницаемости задуманной системы ПВО Москвы явятся два кольца, окружающие столицу радиусами 50 и 90 км, на которых будут расположены ЗРК.

Очевидным было использование в каждом из них двух радиолокаторов с узким («карандашным») лучом: одного для слежения за целью, второго — за наводимой на цель ракетой, а также счетно-решающего прибора, который вырабатывал команды управления ракетой по координатам цели и ракеты, определяемых радиолокаторами. Именно по этому пути пошли американцы, создавая зенитно-ракетную систему «Ника-Аякс». Однако было ясно, что при таком построении ЗРК для круговой обороны Москвы потребовалось бы громадное количество (свыше 1000) одноцелевых зенитных комплексов с двумя радиолокаторами в каждом. При этом сложнейшей являлась задача управления действиями всех этих комплексов.

И тогда было принято решение (автор А.А. Расплетин), совершенно необычное для того времени, предлагалось на двух кольцевых рубежах вокруг Москвы разместить ограниченное число (всего 56) радиолокаторов секторного обзора, которым в пределах своих секторов поручалось решение всех задач: от обнаружения целей до наведения на них зенитных ракет.

Секторные радиолокаторы должны были производить обзор (линейное сканирование) своих секторов двумя «лопатообразными» лучами в двух ортогональных плоскостях: вертикальной (по «углу места») и в наклонной (по «азимуту») (рис. 3.10.1). Размер секторов сканирования в каждой плоскости был выбран равным 60°. В пределах пространства такого «биполяря-

¹При составлении настоящего очерка использованы материалы сборника, посвященного 60-летию ОАО «НПО «Алмаз», Москва, 2007 г.



Рис. 3.10.1. Антенная система С-25 (слева — угломестная, справа — азимутальная)

ного» сканирования радиолокатор должен был обеспечивать одновременно наблюдение за всеми находящимися в нем целями, непрерывное автосопровождение до 20 целей и до 20 наводимых на них ракет, а также выработку и передачу на ракеты команд для их точного приведения в точки встречи с целями. При этом предельно упрощалось управление процессом обстрела целей, поскольку на индикаторах радиолокатора одновременно можно было наблюдать все находящиеся в его секторе обзора цели и наводимые на них ракеты.

Важнейшей особенностью предложенного построения радиолокатора ЗРК являлось то, что в секторном радиолокаторе положения цели и ракеты определяются с помощью одного «инструмента» — сканирующего луча, что соответствовало самому существу задачи точного приведения ракет в точки встречи с целями. Понятны были и определенные трудности реализации этого метода. Определение направлений на цели и ракеты с требуемой точностью должно было производиться по «пачкам» импульсов, принимаемых радиолокатором при проходе его сканирующим лучом через эти направления. Для точного автоматического сопровождения целей и ракет и, главное, для эффективной работы замкнутого контура управления наведением ракет на цели обзор сектора должен был производиться с небывалой для того времени частотой (в реализованном радиолокаторе — 5 раз в секунду).

Новизна предложенного решения не позволяла сразу принять его в качестве единственного направления разработки «Беркута», поэтому на первом этапе работ наряду с применением обзорных радиолокаторов не отвергалась возможность использования и узколучевых радиолокаторов для точного сле-

жения за целями и ракетами. При этом секторные радиолокаторы должны были только обнаруживать цели и выдавать данные целеуказания.

Дополнительно прорабатывалась возможность оснащения ракет радиолокационными головками самонаведения.

Оценка точности определения координат объектов по «пачкам» сигналов показала, что она не будет уступать точности узколучевых радиолокаторов.

В январе 1951 года было принято решение, кардинально определившее дальнейший ход работ, по которому все функции, необходимые для наведения ракет на цели должен был решать радиолокатор с линейным сканированием — центральный радиолокатор наведения (ЦРН). Работы по узколучевому радиолокатору прекращались. Результаты проектирования ЦРН, включая конкретные схемы и конструкции составляющих его устройств, были представлены в техническом проекте, выпущенном в феврале 1951 года.

Состав ЦРН определился так:

- высокочастотная часть — азимутальная и угломестная антенны и сопряженные с ними мощные передатчики и высокочастотные усилители принимаемых ЦРН сигналов целей и ракет;
- 20 стрельбовых каналов, каждый из которых содержал системы автоматического сопровождения цели и наводимой на нее ракеты и сопряженный с ними счетно-решающий прибор (СРП), формирующий команды управления ракетой;
- рабочие места операторов управления работой ЗРК, рабочие места операторов ручного сопровождения целей, рабочее место командира комплекса, устройства, синхронизирующие работу ЦРН и др.;
- станция передачи управляющих команд на ракеты.

Разместить всю аппаратуру ЦРН, включая передатчики и высокочастотную часть приемников радиолокатора, предлагалось в подземном помещении. Снаружи располагались только антенны сканирования и станции передачи команд. Для ЦРН был избран 10-сантиметровый рабочий диапазон длин волн, при котором антенны, формирующие достаточно узкие сканирующие лучи, могли иметь приемлемые габариты, а передатчики — необходимую мощность.

Сканирование 60-градусного сектора в каждой из двух плоскостей достигалось непрерывным вращением соответствующей антенной конструкции, составленной из шести формирователей «лопатообразных» лучей, поочередно подключаемых к соответствующему передающе-приемному тракту.

Импульсные зондирующие сигналы создавались двумя передатчиками, отдельными для азимутального и угломестного каналов ЦРН. Принимаемые высокочастотные эхо-сигналы целей и сигналы ответчиков ракет усиливались и после преобразования частоты через приемные устройства со специальной системой нормирования величин сигналов (системой «импульсной регулировки усиления» — ИАРУ) поступали в многоканальную часть ЦРН. Использование для автоматического сопровождения целей и ракет двадцати отдельных стрельбовых каналов определялось уровнем техники в начале 1950-х годов: доступностью в то время только аналоговых решений. В результате аппаратура стрельбовых каналов заняла большую часть помещения

радиолокатора. Для управления боевой работой многоканального комплекса стрельбовые каналы были разбиты на четыре группы по пять каналов. Операторы каждой группы пользовались индикаторами, на которых отображался весь сектор обозреваемого пространства — в координатах дальность-азимут и дальность-угол места, и должны были производить обнаружение целей, взятие их на автосопровождение, пуск ракет и наблюдение за процессом наведения их на цели.

В центре, между рабочими местами операторов 5-канальных групп, располагалось рабочее место командира комплекса, который производил включение ракет на подготовку, контролировал процесс подготовки и мог наблюдать за работой всех операторов ЦРН.

Поскольку в сложных условиях автоматическое сопровождение целей не всегда может быть устойчивым, в ЦРН предусматривалась также возможность ручного сопровождения целей. Для этого каждая 5-канальная группа комплектовалась дополнительным рабочим местом, за которым работало три оператора, обеспечивавшие ручное (полуавтоматическое) сопровождение цели по дальности и двум угловым координатам.

Для передачи на ракеты команд управления в ЦРН использовались 20 отдельных станций, работающих в режиме непрерывного излучения, каждая на своей несущей частоте. В КБ-1, кроме ЦРН, разрабатывалось бортовое оборудование для зенитной ракеты, автопилот и бортовая аппаратура визирования ракет (приемоответчик).

Шестьдесят стартовых столов — (три ракеты на каждый канал обстрела целей) располагались перед ЦРН на удалении от 1,2 до 4 км. Ракеты стартовали вертикально, склонялись в направлении от радиолокатора и автоматически захватывались им на сопровождение (рис. 3.10.2).

Для отработки принципиальных вопросов построения ЦРН техническим проектом предусматривалось форсированное изготовление экспериментального образца в сокращенном составе (антенные системы, приемопередающая аппаратура, по одному комплекту рабочих мест операторов и систем автоматического сопровождения цели).

Непрерывно укреплялись связи с ведущими предприятиями электронной промышленности,

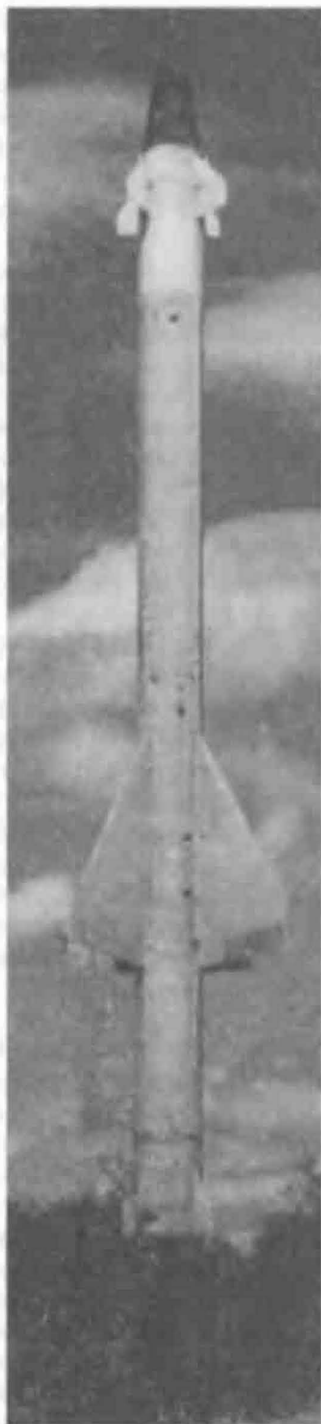


Рис. 3.10.2. Ракета В-300 на стартовом столе

разрабатывающими элементную базу для создания передатчиков: генераторные и модуляторные лампы, магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны, разрядники, защитные устройства, генераторы шума и т.д.

В качестве основы элементной базы в приемном устройстве использовались специально разработанные электровакуумные приборы, а в качестве основного элемента тракта — резонансные управляемые усилители на этих приборах. Они были достаточно сложные по схеме, конструкции и настройке.

С целью уменьшения влияния входных потерь на чувствительность СВЧ-приемника впервые в стране были проведены работы по созданию нового типа маломощного усилителя — лампы бегущей волны (ЛБВ)-УВ-1. Однако первые образцы ЛБВ УВ-1 были внедрены только в опытном образце СВЧ-приемника.

Значительное время восстановления приемника, не дававшее возможности уверенной работе станции на малых дистанциях, в экспериментальном образце определялось параметрами разрядников защиты приемника и блокировки магнетрона, разработкой которых занималось Ленинградское конструкторское бюро на базе предприятия «Светлана». Первыми средствами отображения в радиолокационных индикаторах стали электронно-лучевые трубки (ЭЛТ).

В конце июня 1952 года изготовленный опытным производством головной образец был готов к испытаниям. Главной задачей испытаний была проверка того, насколько точно нулевое значение разности соответствующих координат цели и ракеты, определяемое радиолокатором, отвечает совмещению этих объектов в пространстве. При автономной проверке систем сопровождения сигналы совмещенных «цели» и «ракеты» создавались специальной аппаратурой, размещавшейся в нескольких сотнях метров перед антеннами радиолокатора на вышке от буровой установки БУ-40.

Облеты самолетами показали, что ЦРН может обеспечить приемлемую точность наведения ракет на цели. Успешный ход испытаний позволил начать настоящее серийное производство аппаратуры ЦРН. В августе опытный образец ЦРН был полностью укомплектован и после контрольных испытаний по самолетам, завершившихся к 20 сентября, отправлен на полигон для стрельбовых испытаний. Стрельбы по реальным самолетам-мишеням проводили с 26 апреля по 18 мая 1953 года.

Поскольку мишеней с автоматическим взлетом тогда еще не было, летчики самолета-мишени после выхода на заданный курс покидали самолет на парашютах.

Всего в комплексных испытаниях — с октября 1952 года по май 1959 года — был выполнен 81 пуск ракет.

По требованию военных на полигоне к осени 1954 года был построен ЗРК в полном составе (как и подмосковный). Первого октября начались государственные испытания, в ходе которых были проведены стрельбы по самолетам-мишеням Ту-4 и Ил-28 в разные точки зоны поражения и при различных курсах полета мишеней относительно ЦРН, причем часть стрельб проходила в режиме ручного сопровождения. К концу 1954 года государственные испытания были успешно завершены; всего в ходе испытаний было выполнено 65 пусков ракет. Кульминацией испытаний стала одновременная



стрельба 20 ракетами по 20 целям. И в мае 1955 года на заседании Совета обороны система С-25 была принята на вооружение Советской армии.

Большие потенциальные возможности системы позволили провести ряд модернизаций, которые поддерживали ее характеристики на уровне, достаточном для поражения непрерывно совершенствовавшихся средств нападения.

Прослужила С-25 три десятилетия.

Система С-75

Задача создания перевозимой ракетной системы для противовоздушной обороны объектов в любой точке страны была поставлена летом 1953 года. Техника того времени не позволяла создать многоканальный перевозимый комплекс ЗРК, действующий в широком секторе пространства, поэтому задача была сформулирована так: комплекс должен поражать одну цель, атакующую обороняемый объект с любого направления и под любым углом.

Выбор принципа построения комплекса был однозначным: одноцелевой ЗРК решили создать на основе РЛС с линейным сканированием пространства. При этом сохранялись свойственные такому принципу высокая точность наведения ракет на цели и дополнительные возможности при обстреле целей в сложных условиях, в том числе при плотных групповых целях. Такое построение комплекса было и наиболее простым.

Постановление Правительства, одоблившее предложение по созданию перевозимой зенитной ракетной системы, было принято в ноябре 1953 года. Будущая система получила наименование С-75. Технический проект системы С-75 был выпущен в мае 1954 года. ЗРК новой системы представлял комплекс из радиолокатора и шести пусковых установок, каждая на одну ракету.

Исполнение секторного радиолокатора в новом комплексе облегчалось рядом обстоятельств. В частности, к тому времени уже появилась возможность реализовывать линейное сканирование пространства без механического вращения всей антенной конструкции с помощью «внутренних сканеров».

Создание антенн облегчалось также тем, что сектор сканирования пространства при работе комплекса по одной цели мог быть много уже, чем в многоканальном радиолокаторе. Его ограничили и по азимуту, и по углу места величиной $\pm 10^\circ$ относительно направления на сопровождаемую цель. Перемещение сектора в процессе слежения за целью (подслеживание) осуществлялось при этом по углу места поворотом антенной системы, установленной на антенном посту, а по азимуту — вращением всего антенного поста (рис. 3.10.3).

В радиолокаторе наведения С-75 автоматическое сопровождение цели и наводимых на нее ракет по угловым координатам состояло из двух операций: их электронного сопровождения внутри линейно-сканируемого сектора и электромеханического слежения центром сектора за направлением на цель.

Передача управляющих команд на ракеты осуществлялась одним передающим устройством (станцией передачи команд СПК) с импульсно-временным кодированием передаваемой информации.



Рис. 3.10.3. Радиолокатор сопровождения цели и наведения ракет

Система СДЦ для С-75 была выполнена на основе специальных электронно-лучевых трубок (потенциалоскопов). Для радиолокатора был избран новый 6-сантиметровый диапазон длин волн. По сравнению с широко применявшимся в то время 10-сантиметровым, он позволял формировать более узкие сканирующие лучи и, соответственно, более точно определять угловые координаты цели и ракеты.

Много трудностей было преодолено при разработке аппаратуры 6-сантиметрового диапазона. Были созданы новые электровакуумные приборы СВЧ-приемника: ЛБВ, клистроны, разрядники. Выбрано компактное частотное распределение сигналов целей и ответчиков ракет в рабочем диапазоне частот станции со значительной отстройкой зеркальных каналов, разработана более совершенная схема согласованного многоканального входа приема сигналов в широком диапазоне частот. Были спроектированы быстро перестраиваемые элементы СВЧ-приемника, обеспечившие работу станции при постановке противником активных помех, система быстрой авто-



подстройки частот клистронных гетеродинов канала цели, обеспечивающая требования введенного режима селекции движущихся целей, а также система автоподстройки магнетрона для быстрой подстройки несущей частоты станции ($< 0,2$ с) после скачка на новый номинал.

Из смежных работ важной была разработка ЛБВ типа УВ-9. Предприятие НПП «Исток» после многочисленных согласований и доработок осуществило выпуск этого прибора с хорошими техническими показателями. Разрядники создавались разработчиками ОКБ завода «Светлана». Отражательными клистродами занимался коллектив сотрудников НПП «Исток».

Серьезные изменения коснулись, в основном, элементной базы и конструкции устройств, особенно для аппаратуры селекции движущихся целей. Более жесткие условия эксплуатации, обусловленные перевозимостью аппаратуры, не позволили использовать ртутные линии задержки. Для поисков других, принципиально новых технических решений были проведены серьезные научно-исследовательские работы, в результате которых родились новые приборы: вычитающие потенциалоскопы, твердотельные линии задержки, успешно использованные в приемных устройствах.

Планировалось летом 1956 года приступить к испытаниям опытного образца системы. Однако июльские события этого года существенно изменили планы. Дело в том, что в это время воздушное пространство над нашей страной было несколько раз нарушено новейшим американским самолетом-разведчиком U-2, стартовавшим в ФРГ и левевшим на высоте, недосягаемой ни для зенитной артиллерии, ни для истребительной авиации. Встал вопрос об ускорении создания подвижного комплекса ЗУРО.

Было решено форсировать испытания экспериментального образца С-75 и, упреждая появление штатного ЗРК С-75, создать его упрощенный вариант, работающий в 10-сантиметровом диапазоне и не содержащий аппаратуры СДЦ. Исключение этой аппаратуры никак не влияло на эффективность поражения летящих на больших высотах одиночных самолетов-нарушителей.

Созданная в кратчайшие сроки и поставленная на боевое дежурство система С-75 10-сантиметрового диапазона сразу же продемонстрировала свои высокие характеристики: 1 мая 1960 года под Свердловском системой был сбит американский высотный самолет-разведчик U-2, пилотируемый летчиком Пауэрсом. Безнаказанные полеты самолетов-шпионов над территорией СССР были прекращены (рис. 3.10.4).

Система С-75 была настоящим долгожителем. ЗРК С-75 модернизировался пять раз.

Цели модернизации:

- расширение типажа поражаемых целей (от стратегических, тактических, армейских самолетов до беспилотных летательных аппаратов и крылатых ракет);
- расширение зоны поражения;
- повышение вероятности поражения;
- повышение возможностей борьбы с носителями ракетного оружия до рубежа его применения;



Рис. 3.10.4. Ракета В-750 на пусковой установке

- повышение помехозащищенности;
- повышение надежности.

Система С-125

Кривизна земли и особенности рельефа земной поверхности резко снижают дальность действия всех радиолокационных средств и создают благоприятные условия для «невидимых» полетов летательных аппаратов на малых высотах.

Необходимо создание специального ракетного оружия для борьбы с целями, которые смогут летать на малых высотах.



Рис. 3.10.5. Стрельбовый радиолокатор (антенный пост УНВ, аппаратная кабина УНК)

В 1956 году создается группа для разработки специальной зенитной ракетной системы для борьбы с целями на малых высотах — системы С-125. За счет максимально возможного подъема антенны над земной поверхностью и улучшения аппаратуры селекции низколетящих самолетов на фоне мешающих сигналов, отраженных от земли, удалось создать перевозимый комплекс С-125 для поражения целей, летящих на малых и средних высотах.

На рис. 3.10.5 показан стрельбовый радиолокатор. В течение двух-трех лет этот комплекс был освоен промышленностью и начал поставляться на вооружение войск ПВО.

Системы радиоуправляемого зенитного вооружения С-75 и С-125 к 1970-м годам, взаимно дополняя друг друга, образовали мощный всевысотный щит обороны от ударных самолетов-бомбардировщиков, находящихся у противоборствующей стороны в то время. Модернизация системы С-75 позволила увеличить дальность перехвата почти вдвое — примерно до 55 км. Система С-125 была модернизирована (рис. 3.10.6): максимальная дальность действия увеличилась, а минимальная высота перехватываемых целей уменьшилась с 200 до 50 м и даже ниже. Естественно, значительное повышение тактико-технических характеристик было достигнуто за счет совершенствования высокочастотной техники.

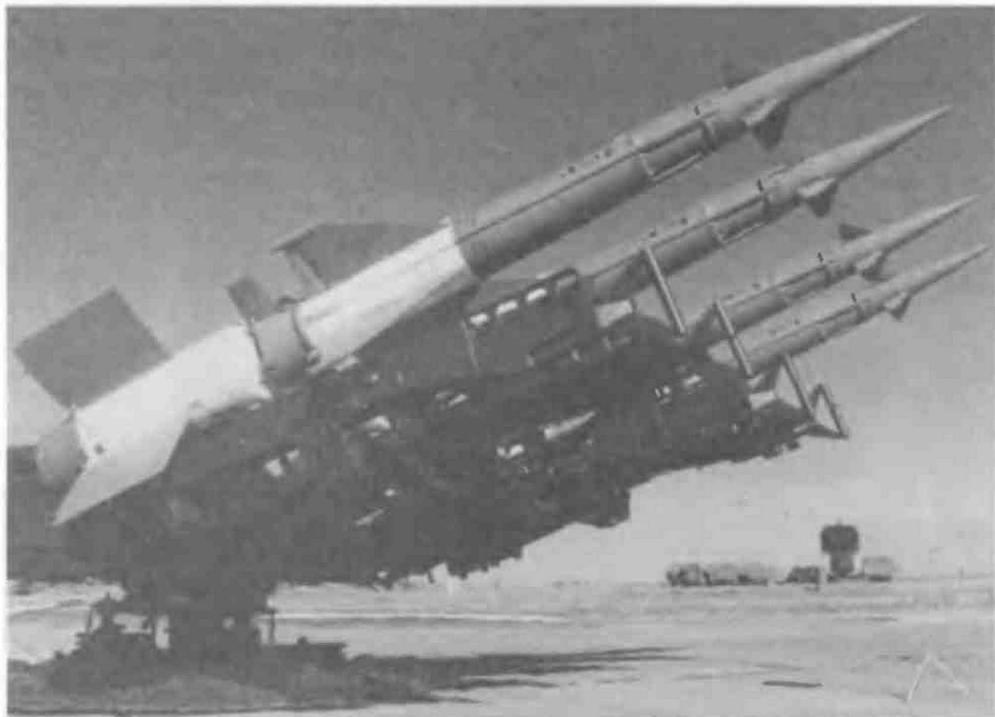


Рис. 3.10.6. Модернизированная четырехракетная пусковая установка

Система «АЗОВ»

По мере развития систем ракетно-космической обороны (РКО) пришло понимание их ограниченных возможностей в случае массированного применения ракетно-ядерного оружия по многим объектам. Задача противоракетной обороны страны существенно отличалась от задачи обороны отдельных наиболее важных объектов по размеру обороняемой площади, числу атакующих ракет, требуемой надежности защиты, допустимых затрат на оборону.

Решением Правительства в 1961 году была предусмотрена разработка системы для защиты отдельных важных объектов от нападения перспективных аэродинамических целей и одиночных баллистических ракет среднего радиуса действия (БРСД). Система получила индекс «АЗОВ». В техническом отношении главными проблемами для разработчиков являлись создание информационных средств и ракеты-перехватчика. В качестве информационного средства мог служить только радиолокатор, поскольку оно должно быть всепогодным. По сравнению с РЛС ПВО радиолокатор ПРО должен работать на существенно больших дальностях, поскольку цель имеет на порядок большую скорость. Другая особенность цели — малая отражающая поверхность: менее $0,1 \text{ м}^2$. По этим причинам радиолокатор системы «АЗОВ» должен был иметь, по сравнению с любым радиолокатором ПВО, на несколько порядков больший энергетический потенциал. Так как в то время получить



необходимую мощность в одном приборе было невозможно, было принято решение — необходимую мощность излучения получать путем сложения в пространстве энергии нескольких генераторов, каждый из которых имел бы предельно достижимую для того времени мощность. Другим методом повышения потенциала радиолокатора являлось увеличение выигрыша антенного устройства. Это могло быть достигнуто путем увеличения размеров раскрыва антенны.

Учитывая крайне напряженный баланс времени для поиска и обнаружения целей, необходим был быстрый обзор пространства. Это наилучшим образом достигалось путем электронного сканирования. Радиолокатор должен был, кроме целей, сопровождать наводимые на цель противоракеты, для чего должна обеспечиваться возможность отклонения луча в широких пределах. Все эти функции наилучшим образом выполнялись при использовании в качестве приемных и передающих антенн фазированных антенных решеток (ФАР).

Проектирование определило облик системы. Радиолокационная станция наведения (РСН) должна была включать в себя антенный пост и аппаратную часть. Антенный пост размещался на неподвижном основании, закрепленном на закладных элементах фундамента. Поворотное устройство имело две степени свободы: поворота по азимуту и углу места. Таким образом, нормаль к раскрыву могла направляться в любую точку пространства верхней полусферы. На поворотной части крепились приемная ФАР с сектором отклонения луча $\pm 60^\circ$ и зеркальная передающая антенна с фазирруемыми облучателями, позволяющими отклонять луч в секторе 4×5 град. На поворотной части размещались также передающие устройства с мощными клистроны на выходе, управляющая аппаратура и входная часть приемных устройств. Такая компоновка обеспечивала минимальные потери высококачественной энергии.

Аппаратная часть РСН включала приемные устройства, аппаратуру обработки сигналов, управления и контроля. Все это размещалось в контейнере. Для управления ракетами в процессе наведения на цель предусматривалась станция передачи команд (СПК), включающая в свой состав поворотный антенный пост на лафете с колонками зеркальных антенн и передающими устройствами и аппаратную часть.

В состав наземных средств системы входили также цифровой вычислительный комплекс, состоящий из нескольких объединенных между собой ЭВМ, с максимальной на то время производительностью (разработка ИТМ ВТ).

Все средства радиотехнического комплекса монтировались в контейнерах полного заводского изготовления, что исключало необходимость монтажных и настроечных работ на объекте и тем самым делало их более качественными и дешевыми. Контейнеры соединялись между собой заранее изготовленной кабельной сетью, прокладываемой после размещения средств на объекте.

Управление комплексом осуществлялось от ЭВМ вычислительного комплекса без вмешательства персонала, боевой цикл от обнаружения до поражения цели составлял несколько десятков секунд.

Во второй половине 1960-х годов в результате интенсивных работ по системам ПРО как у нас в стране, так и в США, в качестве контрмеры, в со-

став баллистических ракет наряду с боевыми элементами начали включаться ложные цели. В то время это были легкие цели, как правило, надувные, которые после отделения от последней ступени ракеты-носителя создавали вокруг боеголовки до 10-12-ти отражателей, идентичных для радиолокаторов головным частям. Ложные цели затеняли боевой элемент и тем самым затрудняли его перехват. При этом для наблюдения за такими целями требовался более широкий сектор обзора, чем для сопровождения парных целей (головная часть — ГЧ и корпус). Правда, легкие ложные цели существовали только в космосе, а при снижении до высоты 90-80 км они сгорали. Но после этого оставалось очень мало времени для осуществления перехвата боеголовки. Такое положение дел заставило создателей систем ПРО искать новые технические решения. Разработчиками было предложено увеличить сектор наблюдения РЛС с 4x5 град до 20x20 град и приступить к созданию высокоскоростной противоракеты, которая успевала бы перехватить боеголовку после атмосферной селекции от ложных целей.

Была разработана передающая антенна в виде ФАР, которая могла заменить в антенном посту радиолокатора зеркальную антенну и позволяла отклонять передающий луч в секторе 20x20 град. Следует отметить, что в системе «АЗОВ» управление всеми функциями РСН, включая функциональный контроль, отработку внешнего целеуказания, обнаружение и сопровождение целей, сопровождение противоракеты, выработку и передачу на борт команд наведения осуществлялось автоматически из центрального вычислительного комплекса (ЦВК) большой производительности. При этом специфика программ ЦВК заключалась в том, что они создавались в реальном масштабе времени и поэтому не могли быть использованы универсальные языки программирования. Создание программ велось на машино-ориентированном языке, позволяющем экономить производительность ЭВМ.

После того, как стало ясно, что в качестве целей для систем стратегической ПРО будут использоваться противником либо разделяющиеся головные части, либо головные части, оснащенные комплексом средств преодоления, перед создателями средств обороны встала весьма сложная проблема выделения головных частей из многоэлементной сложной цели. Пришлось анализировать не только сигнальные характеристики сопровождаемых элементов, но и исследовать характеристики спутных плазменных следов при движении в атмосфере. Реализация селекции в системе «АЗОВ» потребовала внесения серьезных изменений в аппаратуру РСН и создания весьма сложных программ управления.

В 1972 году потребовалось разработать защиту от баллистических ракет не только малоразмерных, но и более крупных объектов. С этой целью был разработан проект объединения нескольких огневых комплексов «АЗОВ» в узел, управляемый командно-вычислительным комплексом. Это было одно из первых объединений многих вычислительных машин в локальную сеть, которое в настоящее время получило широкое распространение.

Успешные работы по системе «АЗОВ» показали, что подобного рода комплексы ПРО для защиты объектов на территории страны вполне реализуемы и очень нужны в условиях вооруженного противостояния для уверенности в собственной безопасности. Но система «АЗОВ» не могла быть запущена в серию, поскольку была сделана на элементной базе 1960-х годов, ко-

торая к началу 1980-х уже устарела. Поэтому в 1980 году было поручено проектирование системы ПРО для обороны объектов страны на новой элементной базе с использованием полученного научно-технического задела. К концу 1981 года были выпущены технические предложения и эскизный проект системы, получившей наименование С-550.

Средства системы решено было создавать в контейнерах, что сокращало трудоемкость их изготовления и позволяло обеспечить быстрое развертывание на объектах. Антенный пост решено было построить в отличие от «АЗОВ» на базе проходной приемопередающей антенной решетки на поворотном основании. Однако размеры решетки были существенно больше, поскольку требовался на несколько порядков больший потенциал. Радиолокатор позволял производить обзор пространства, сопровождение целей и ракет в секторе 90х90 град. Отпала необходимость в СПК, поскольку функцию управления ракетами мог выполнять радиолокатор. Объем аппаратуры на новой элементной базе сократился в несколько раз, что позволило всю аппаратуру комплекса разместить в 3-х контейнерах, не считая антенного поста. Для этой системы была создана высокопроизводительная ЭВМ, отвечающая требованиям военной аппаратуры. Всю аппаратную часть РСН удалось разместить в одном контейнере. В состав радиотехнических средств огневого комплекса входили также контейнер командного пункта с рабочими местами операторов и контейнер с вычислительными средствами.

К 1988 году было изготовлено большинство средств огневого комплекса: аппаратная часть РСН, КП, вычислительные средства и более чем на 50% антенный пост, сложность изготовления которого превышала сложность изготовления всех остальных средств. Наиболее трудоемкие элементы, такие, как поворотное основание, металлические конструкции и антенные элементы ФАР, были изготовлены. Оставалось завершить изготовление и приступить к сборке. Но в 1988 году прекратилось финансирование и дальнейшие работы по системе были прекращены.

Система С-200

Созданные в 1950-х годах и принятые на вооружение одноканальные зенитные ракетные системы С-75, С-125 имели сравнительно небольшую дальнюю границу зоны поражения. В то же время в средствах воздушного нападения стали широко применяться самолеты-разведчики, помехопостановщики и т. д., барражирующие на больших дальностях вне зоны поражения указанных выше систем и создающие помехи радиолокационным средствам ПВО.

Задача создания новой системы — «длинной руки» для поражения крупноразмерных целей на больших дальностях — была поставлена весной 1958 года. Ее необходимость, помимо военно-тактической, диктовалась экономическими соображениями. Только такие системы позволяли при сравнительно ограниченном их количестве обеспечить противовоздушную оборону больших территорий. Постановлением ЦК и СМ СССР (1958 г. и 1959 г.) была задана разработка новой перевозимой системы — системы С-200. Принципиальным в новой системе было использование режима самонаведения ракет на цели по данным пеленгации цели бортовой головкой самонаведения

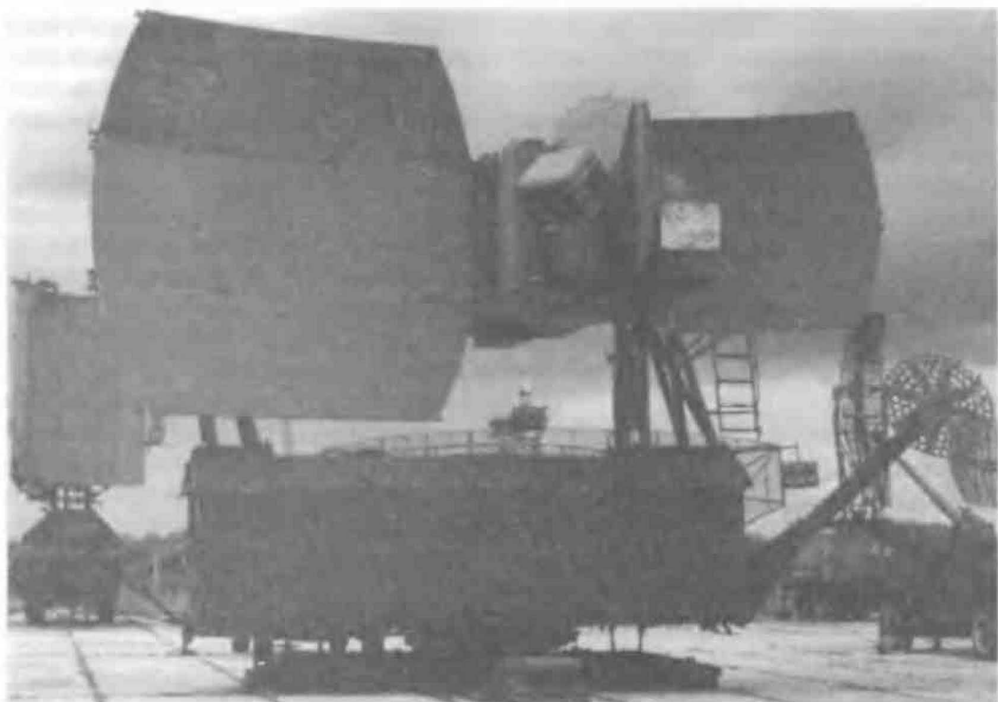


Рис. 3.10.7. Радиолокатор подсвета цели. Антенный пост

(ГСН) ракеты, что обеспечивало высокую точность наведения ракет на цели практически на любых дальностях. Система представляла группу (до пяти) зенитных ракетных комплексов (ЗРК), объединенных общим командным пунктом (КП). КП системы с вышестоящим КП связывала цифровая линия обмена информацией, по которой на КП системы поступали данные целеуказания, а обратно — информация о состоянии и боевых действиях ЗРК. Объединение до пяти ЗРК общим КП существенно облегчало управление системой с вышестоящего КП.

В состав каждого ЗРК входили: радиолокатор подсвета цели — РПЦ (антенный пост с высокочастотной аппаратурой и аппаратный полуприцеп с рабочими местами операторов, аппаратурой обработки сигналов и т. д.) (рис. 3.10.7) и стартовая позиция (шесть пусковых установок (ПУ), каждая на одну ракету и аппаратура подготовки и пуска ракет в автомобильном полуприцепе). Шесть ПУ позволяли без перезарядки произвести обстрел трех целей с самонаведением на каждую из двух ракет.

Комплекс радиотехнического оборудования ракеты включал в себя три устройства: головку самонаведения, контрольный ответчик и сопряженный с головкой полуактивный радиовзрыватель, работающий по тому же эхо-сигналу цели, что и ГСН.

ЗРК с самонаведением ракет на цели работал следующим образом: цель зондировалась непрерывным монохроматическим сигналом, создаваемым в РПЦ мощным передающим устройством и узким лучом, непрерывно сопровождающим цель, а обработка эхо-сигнала от цели в приемных устройствах



РПЦ и ГСН осуществлялась посредством узкополосной доплеровской фильтрации. Такое построение системы обеспечивало получение максимально возможной энергии эхо-сигнала при наиболее простом оборудовании ракеты.

ЗРК работал в 4,5-сантиметровом диапазоне длин волн. Диапазон был достаточно коротковолновым, чтобы при ограниченной площади поперечного сечения ракеты обеспечить формирование необходимой ширины диаграммы антенны ГСН. В то же время в этом диапазоне было возможно создать необходимый для радиолокации дальних целей зондирующий сигнал большой мощности. Чтобы сконцентрировать энергию зондирующего сигнала в максимально узком луче РПЦ, требовалась возможно большая площадь раскрыва передающей антенны. С учетом требований перевозимости РПЦ, его сборки (разборки) в полевых условиях была принята трехсекционная конструкция антенны площадью $\sim 25 \text{ м}^2$. Площадь раскрыва приемной антенны РПЦ была существенно меньшей: даже вчетверо меньшая, чем передающая, она значительно превышала площадь антенны ГСН, что создавало необходимый запас по дальности действия РПЦ перед дальностью действия ГСН. Отсутствие загробления приемника РПЦ мощным непрерывно излучаемым зондирующим сигналом обеспечивалось разделением передающей и приемной антенн специальным экраном, малыми боковыми лепестками диаграмм направленности и низким уровнем шумов сигнала передатчика в доплеровском диапазоне частот эхо-сигналов целей. В дальнейшем в процессе изготовления первого опытного образца антенного поста на заводе ОАО «НМЗ» с целью исключения проникновения в приемную антенну отраженных от аппаратного контейнера сигналов передатчика снизу антенн был дополнительно установлен аналогичный горизонтальный экран.

При зондировании цели монохроматическим (непрерывным) сигналом при соответствующей доплеровской обработке цели в приемниках РПЦ и ГСН обеспечивалась селекция целей только по скорости. При этом цели, летящие в группе с одинаковой скоростью, не разрешаются по дальности и невозможно выделить отдельные цели из состава группы и избирательно производить их обстрел. Для селекции целей также и по дальности в сигнал передатчика была введена фазо-кодовая манипуляция (ФК-манипуляция), частота повторения которой была выбрана достаточно высокой, несколько превышающей доплеровский диапазон, соответствующий максимальной скорости полета заданных типов целей. Однако при ФК-манипуляции невозможно непосредственно однозначно определить дальность по цели (однозначно она определяется только в пределах периода ФК-манипуляции, который незначителен). Для определения истинной дальности до цели (устранения неоднозначности по дальности) был применен так называемый «нониусный метод», основанный на попеременном зондировании цели сигналами с частотами ФК-манипуляции, мало отличающимися друг от друга. Истинное значение дальности до цели было необходимо и для решения задачи пуска ракеты (определения дальности до точки встречи ракеты с целью и границ гарантированной зоны поражения).

Вид зондирующего сигнала, требовавшаяся большая дальность действия ГСН, взаимодействие РПЦ и ракеты (в том числе стартовой позиции) определили основные характеристики и построение аппаратуры РПЦ. При

получении целеуказания от КП системы и выставки антенного поста в направлении на цель по азимуту РПЦ осуществлял обнаружение цели в секторе допояска с помощью механического перемещения антенной системы. После обнаружения цели на экранах индикаторов производился ее перевод на автоматическое сопровождение по угловым координатам, скорости и дальности после предварительного определения истинной дальности до цели. Системы обработки сигнала в приемнике и следящие системы сопровождения имели аналоговое исполнение. Так, разрешение (селекция) целей по дальности и скорости осуществлялась путем обработки эхо-сигналов соответствующим образом ФК-манипулированным гетеродином с последующей фильтрацией результатов этой обработки при помощи узкополосных кварцевых фильтров. В системе впервые в практике создания систем ПВО в РПЦ и КП системы была применена ЦВМ «Пламя», выполненная на полупроводниковых элементах. На ЦВМ возлагались задачи обмена с КП координатной информацией по целям, решением задачи пуска ракет и т.д.

Передача ГСН информации от РПЦ для поражения целей обеспечивалась соответствующей процедурой. Она включала в себя:

- передачу на стартовую позицию всей координатной информации по цели;
- подстройку СВЧ-гетеродина ГСН под несущую частоту РПЦ;
- установку антенн ГСН в направлении на цель, а систем автоматического сопровождения по дальности и скорости — на дальность и скорость цели;
- перевод ГСН на автоматическое сопровождение цели по угловым координатам, дальности и скорости при достижении эхо-сигналов цели в приемнике ГСН достаточного уровня.

Старт ракеты осуществлялся по команде от РПЦ уже при автоматическом сопровождении цели ГСН.

Для системы большой дальности важно иметь информацию о полете ракеты к цели, который может длиться несколько минут. По результатам контроля можно сделать вывод о нормальном функционировании ракеты или ее отказе. В последнем случае необходим пуск дополнительной ракеты. В новой системе с самонаводящимися на цель ракетами, не требующей для выполнения боевой задачи сопровождения ракет, для контроля их полета была введена дополнительная радиолиния связи «ракета-РПЦ» с передатчиком малой мощности на ракете и простейшим приемником с широкоугольной антенной в РПЦ. В случае отказа или неправильного функционирования ракеты эта радиолиния прекращала работу.

Проверка основных принципов построения системы и ее характеристик была проведена на макетных средствах системы (РПЦ, пусковая установка, стартовая аппаратура), созданных в конце 1960 года (рис. 3.10.8).

Успешное завершение испытаний наземных средств позволило открыть зеленый свет их серийному изготовлению. Средства первого серийного образца ЗРК были поставлены с заводов непосредственно на полигон. Вместе с опытным образцом и КП системы они составили двухканальную систему С-200.



Рис. 3.10.8. Зенитная управляемая ракета В-860П на пусковой установке

Основным недостатком первой ГСН была плохая виброустойчивость ее СВЧ-гетеродина. Из-за этого в приемнике ГСН создавались ложные сигналы, нарушающие автосопровождение цели.

По результатам анализа схемного и конструктивного построения существующей ГСН было предложено разработать новую ГСН и скомпоновать ее из четырех функционально законченных блоков с минимумом связей между ними. Такое построение ГСН позволяло наиболее качественно провести их разработку и испытания и тем самым обеспечить высокие характеристики ГСН в целом. Оно позволяло обеспечить и рациональное массовое серийное изготовление укрупненных блоков на специализированном производстве.

Одновременно с проведением испытаний на полигоне на предприятии интенсивно работали над новой моделью ГСН. Проблема виброустойчивости СВЧ-гетеродина была решена существенным изменением схемы гетеродина — исключением электромеханической подстройки под сигнал РПЦ и соответствующей ее заменой на подстройку с помощью вновь введенного перестраиваемого генератора на промежуточной частоте. Кроме того, удалось создать жесткую конструкцию блока СВЧ-гетеродина и с помощью специально разработанных амортизаторов сместить собственную резонансную частоту блока в область частот, где вибрации на вибрирующей в полете ракете были минимальными. По иному была решена задача виброустойчивости генератора подстройки СВЧ-гетеродина и генератора системы слежения цели по скорости. В то время, в эпоху радиоламповой техники перестраиваемые генераторы для бортовой аппаратуры создавались на специаль-

ных миниатюрных радиолампах. Именно вибрация внутренних элементов конструкции радиолампы и была причиной паразитной частотной модуляции сигнала, которую необходимо было нейтрализовать. Были испытаны десятки различных схем генераторов, пока не нашли ту, в которой влияние элементов конструкции радиолампы при вибрациях было сведено к минимуму. Испытания полностью подтвердили правильность найденного решения.

Четыре зачетных пуска ракет с новыми ГСН в рамках совместных испытаний были выполнены в октябре 1966 года и в феврале 1967 года система С-200 была принята на вооружение войск ПВО.

Система С-200 неоднократно модернизировалась, появилось семейство систем С-200: ее последующие модификации — ЗРС С-200В, С-200ВМ, С-200Д. В результате модернизации расширились возможности системы в условиях постановки противником активных помех самоприкрытия, в том числе шумовых прерывистых, уводящих по дальности и скорости, увеличена последовательно дальняя граница зоны поражения самолетов с 160 до 180, 240, 300 км соответственно.

Система С-300

В конце 1960-х годов стремительными темпами развивались средства воздушного нападения. Появились сверхскоростные самолеты, летающие от предельно малых до больших высот, увеличился и сам потолок высот. Изменилась тактика применения средств нападения. Для прорыва обороны противник начинает применять эшелонированные ударные группы из различных типов летательных аппаратов, включая и беспилотные. Вся эта армада поддерживается самолетами-помехопостановщиками, барражирующими вне зоны поражения средств ЗУРО.

Стало ясно, что имеющиеся на вооружении страны одноканальные системы ЗУРО, С-75, С-125, С-200 в условиях массированных налетов не могут обеспечить эффективную защиту объектов военного и народнохозяйственного значения. Остро встал вопрос о создании новой системы ЗУРО, способной бороться с современными средствами нападения.

Для выбора путей создания массовой зенитной ракетной системы для замены систем С-75 и С-125 в войсках ПВО, а также зенитных ракетных систем средней дальности в сухопутных войсках и ВМФ была создана рабочая группа под руководством А.А. Расплетина.

А.А. Расплетин предложил, прежде всего, определить, на какой элементной базе следовало бы проектировать будущую систему? Исходя, конечно, из того, что она должна быть, безусловно, перспективной. Им были сформулированы следующие положения: «Это могут быть только микромодули на многослойных печатных платах, ибо за этим прогресс. Все остальное — топтание на месте, а значит — отставание».

У нас в стране еще никто не делал ни многослойных печатных плат, ни микромодулей. За рубежом в то время ведущие фирмы США и Японии только начали заниматься аппаратурой гражданского применения на этой элементной базе. Военную же аппаратуру на ней еще не производил никто.



Генеральный конструктор убедил всех в необходимости создания многоканальной системы. Итак, система должна строиться на сверхсовременной элементной базе, должна быть массовой, многоканальной, мобильной. Характеристики системы должны быть адекватными характеристикам средств нападения.

Постановление ЦК и СМ СССР (1969 г.) определило начало работ по созданию системы ЗУРО С-300. Система должна разрабатываться в трех модификациях: для войск ПВО, для сухопутных войск и кораблей ВМФ при максимальной их унификации, и головной роли «Алмаза», которому поручалась разработка системы С-300П для войск ПВО. Однако в дальнейшем в силу особой позиции разработчика системы С-300В для сухопутных войск унификация систем С-300П и С-300В не получилась.

В то же время «моряки» плодотворно работали с разработчиками системы для ПВО и совместно достигли больших успехов. И сегодня многие корабли ВМФ, в том числе атомный ракетный крейсер «Петр Великий», оснащены ракетной системой С-300Ф, максимально унифицированной с системой С-300П, составляющей в настоящее время основу ПВО России.

Система строилась по принципу самодостаточности, что обеспечивало ей полную автономность боевых действий. В нее вошли средства обнаружения целей, стрельбовые средства и средства технического обслуживания. Все управление боевыми действиями средств должно вестись с командного пункта системы, который, в свою очередь, взаимодействует с командными пунктами соседних систем и с вышестоящим командным пунктом.

Таким образом, постепенно определился общий облик системы. Она включила в себя боевые средства: командный пункт системы (КПС) (рис. 3.10.9), сопряженный с радиолокатором обнаружения целей кругового обзора (РЛО), шестью зенитными ракетными комплексами (ЗРК), расположенными от КПС на расстоянии до 100 км. В свою очередь в состав ЗРК вошли: радиолокатор обнаружения, автосопровождения и подсвета целей и наведения ракет (РПН) (рис. 3.10.10), до двенадцати пусковых установок с четырьмя ракетами на каждой, удаленных от РПН на расстояние до 120 м.

Функции боевых средств системы были определены следующим образом.

Командный пункт системы по обнаруженным РЛО «отметкам» целей производит завязку трасс, сопровождение до 100 целей, распределение целей между ЗРК и выдачу целеуказания на РПН ЗРК по целям, предназначенным ему для обстрела. Командный пункт осуществляет контроль боевых действий ЗРК, координацию действий по целям, обнаруженным в секторах автономного обнаружения РПН, обеспечивает взаимодействие всех радиолокационных средств системы в сложной тактической и помеховой обстановке.

Зенитный ракетный комплекс ведет непосредственно обстрел целей. Информационно-управляющим средством ЗРК является РПН, выполняющий функции многофункционального радиолокатора и пункта боевого управления ЗРК. РПН осуществляет обнаружение и автосопровождение целей по данным целеуказания от КПС или по результатам обзора пространства в секторе автономного обнаружения. Обнаружение целей, летящих на предельно малых высотах, производится или в нижнем луче сектора автономного поиска, или по данным целеуказания от придаваемого



Рис. 3.10.9. Командный пункт системы (справа — пункт боевого управления, слева — радиолокатор обнаружения кругового обзора)



Рис. 3.10.10. Радиолокатор подсвета цели и наведения ракет

ЗРК низковысотного обнаружителя — РЛС 76Н6, работающего вкруговую. РПН осуществляет также захват и автосопровождение стартующих ракет, передачу на ракеты команд управления их полетом, подсвет цели для обеспечения работы бортового радиопеленгатора, прием бортовой информации по результатам визирования цели радиопеленгатором, подсвет цели в точке встречи ракеты с целью обеспечения работы радиовзрывателя. Таким образом, одним радиолокатором обеспечивается выполнение всех функций по каналам цели и ракеты.

РПН имеет в своем составе антенный пост Ф1 и аппаратный контейнер Ф2. Боевой расчет ЗРК, состоящий из шести человек, включая командира ЗРК, размещается в аппаратном контейнере, где расположены соответствующие рабочие места, оборудованные необходимыми индикаторами, органами управления и контроля. Оператор пуска ракет осуществляет управление пусковыми установками и ракетами на них, включая установку ракет на подготовку и пуск первой ракеты. Высокая эффективность поражения целей в системе достигается обстрелом целей двумя ракетами, при этом пуск второй ракеты производится автоматически. Вся работа боевого расчета максимально автоматизирована и сводится, в основном, к контролю работы автоматов.

Телекодová и речевая радио- и проводная связь между средствами системы осуществлялась через аппаратуру «Эвольвента», разрабатываемую предприятием «ВНИИС».

Система С-300П разрабатывалась в двух вариантах: в транспортно-контейнерном (перевозимом на прицепах и полуприцепах) и в самоходном (на колесных самоходах высокой проходимости) со временем подготовки средств системы к стрельбе после марша не более 5 минут.

«Трехсотка» создавалась на совершенно новых принципах и технических решениях. В аппаратуре впервые была широко применена цифровая элементная база, включая интегральные микросхемы, многослойные печатные платы, что потребовало разработки новой высокотехнологичной конструкции плат, блоков, шкафов, максимально унифицированных для всех средств системы. Для самоходного варианта системы необходимо было боевые средства разместить на самоходных транспортных колесных шасси высокой проходимости, обеспечить аппаратуру автономными средствами электропитания, оперативную топопривязку и ориентирование средств на местности, обеспечить комфортные условия для лиц боевого расчета и т. д.

Была разработана унифицированная базовая конструкция, на основе которой была создана подавляющая часть аппаратуры средств. В целом все решения были подчинены одной задаче: наиболее плотно «упаковать» элементы новой элементной базы в стандартных ячейках, ячейки, в свою очередь, в блоки, блоки — в шкафы и т. д., обеспечив при этом минимум функциональных связей между ними.

Принципиальным шагом, позволившим решить задачу создания многоканального ЗРК, явилось использование в РПН фазированной антенной решетки (ФАР) с электронным сканированием луча в пространстве в двух плоскостях. Использование ФАР обеспечило практически любой высокий темп обращения к целям и ракетам, что было особенно важно для реализации командного метода наведения ракет.

ФАР была применена также в РЛО. На основе применения ФАР в РЛО была решена задача совмещения режима обзора пространства и сопровождения целей в физических стробах и обеспечено адаптивное управление энергетикой РЛО в зависимости от меняющейся целевой и помеховой обстановки.

При создании ФАР необходимо было разработать фазовращатели с малыми потерями, с дискретно управляемым фазовым сдвигом, создать систему управления лучом (ЦВФ), обеспечить плотную упаковку фазовращателей в полотно антенны, наладить их серийное производство и т. д. Одной из важнейших характеристик разработанного фазовращателя является его взаимность при работе на передачу и прием, что в отличие от американской системы «Patriot», в которой применен невзаимный фазовращатель, позволило в РПН применить квазинепрерывный когерентный зондирующий сигнал, обеспечивший работу по целям, летящим на предельно малых высотах.

Обеспечение борьбы с низколетящими целями, летящими с огибанием земной поверхности, когда в луч антенны, кроме полезного сигнала от цели, попадают мощные отражения от подстилающей поверхности, на много порядков превышающие сигнал цели, потребовало применения в РПН впервые в истории радиолокации специального когерентно-импульсного пачечного зондирующего сигнала с малым уровнем собственных шумов и соответствующей оптимальной частотно-временной обработки этого сигнала в приемном тракте РПН. Для этих целей был разработан специальный клистронный передатчик большой мощности, генерирующий когерентно-импульсный сигнал.

Большие трудности возникли и при создании приемных устройств для усиления и оптимальной обработки нового сигнала. Для усиления и выделения слабых сигналов от целей на фоне мощных отражений от местных предметов потребовалась разработка уникальных СВЧ-усилителей, а также разработка новых приемов обработки сигналов в частотно-временной области. По существу, элементов для реализации такой обработки практически не существовало. Нужно было заново разработать целый комплекс кварцевых приборов — режекторных и полосовых фильтров и просто новый ряд высокочастотных кварцев, используемых в качестве накопителей сигналов целей вместо громоздких электромеханических фильтров, а в дальнейшем и серию частотно-избирательных микросхем.

Для конструктивной реализации элементов приемника пришлось разработать специальную конструкцию ячейки, которая, с одной стороны, должна обеспечивать необходимую экранировку от наводок соседних ячеек, с другой — вписываться в общий конструктив блока наравне с обычными ячейками.

При разработке командного пункта системы потребовалось решение целого ряда новых научно-технических проблем. Среди них, как одну из наиболее сложных и трудных, можно выделить проблему автоматической завязки трасс и автоматического сопровождения большого количества целей (до 100) на фоне отражений от подстилающей поверхности и гидрометеорообразований. Одним из основных путей решения этой проблемы была разработка сложных «умных» алгоритмов обработки радиолокационной информации, реализация которых стала возможной благодаря использованию разработанных для системы новых высокопроизводительных вычислительных средств.

Все предыдущие системы ЗУРО были созданы на базе аналоговой техники, за исключением С-200, где была применена ЦВМ «Пламя» с весьма ограниченными возможностями. К началу разработки системы С-300 широкое развитие получила цифровая техника, дающая разработчику большие возможности по реализации технических решений. Именно она (в том числе цифровые вычислительные комплексы (ЦВК) и специальные вычислители (СВ)) нашла самое широкое применение в новой системе. При разработке определились два основных направления: первое — создание и использование центральных вычислительных комплексов для решения глобальных задач управления системой, управления наведением ракеты на цель, радиолокационных задач по обнаружению целей, захвату и сопровождению ракет, борьбы с помехами и т. д. и второе — создание спецвычислителей для решения локальных специфических задач в отдельных устройствах, а также широкое применение цифровой техники для обеспечения работы устройств индикации и управления рабочих мест операторов, имитационной аппаратуры, обмена информацией между устройствами и т. д.

Разработка ЦВК 5Э26 (и дальнейшей ее модификации 40У6) была поручена предприятию «ИТМ и ВТ».

Для управления средствами системы в составе аппаратного контейнера Ф2 ЗРК были созданы шесть рабочих мест:

- рабочее место командира ЗРК с индикатором воздушной обстановки в секторе ответственности ЗРК;
- рабочее место оператора обнаружения целей в секторе автономного обнаружения РПН с индикатором первичной информации;
- рабочее место оператора наведения цели по координатам дальность-скорость и контроля автосопровождения целей и ракет;
- два рабочих места операторов ручного сопровождения цели по угловым координатам;
- рабочее место оператора пуска, оборудованное прибором пуска, органами индикации и управления пусковым комплексом, в том числе управления ракетами, включая пуск ракет.

В системах ЗУРО С-25, С-75, С-125 для наведения ракет на цели применялся командный метод наведения, использующий текущие координаты целей и ракет, измеренных одним и тем же радиолокатором. При таком методе точность наведения ухудшается с увеличением дальности до цели. Для повышения точности наведения на больших дальностях в системе С-200 был применен метод самонаведения, использующий для управления ракеты информацию об углах визирования цели головкой самонаведения ракеты. При этом точность визирования, а значит и точность наведения, повышается по мере сближения ракеты с целью. Однако технические проблемы и высокая стоимость ограничивают возможности его применения. Поэтому в системах С-300П, С-300Ф была применена комбинация вышеприведенных методов наведения: на начальном этапе полета ракеты для ее наведения используется информация о координатах цели и ракеты от РПН, а при подлете ракеты к цели дополнительно используется информация от головки ракеты с учетом оценки степени ее достоверности. При этом по своему устройству головка ракеты существенно проще, чем головка системы С-200, так как



Рис. 3.10.11. Самоходные средства зенитного ракетного комплекса на позиции (РПН — в центре)

сигнал гетеродина для приемного устройства формируется не автономно, как в системе С-200, а из сигнала, передаваемого по эфиру от РПН, а также отсутствуют автономные системы слежения за целью.

Такой метод наведения получил название «наведение через ракету». Преимуществом такого метода по сравнению с методами, применяемыми в других системах, является и то, что в РПН на протяжении всего полета ракеты производится контроль ее наведения и, в случае несанкционированного характера полета, имеется возможность ликвидации ракеты по условиям безопасности.

Основные характеристики первой системы из ряда С-300П

Канальность по цели	6
Дальняя граница зоны поражения самолетов	50 км
Ближняя граница зоны поражения	7 км
Максимальная высота поражения целей	25 км
Минимальная высота поражения целей	25 м
Максимальная скорость поражаемых целей	1100 м/с

В 1979 году первая система из ряда С-300П была принята на вооружение войск ПВО. Она была создана на сверхсовременной элементной базе и по своим характеристикам существенно превзошла ранее созданные системы ПВО. Были созданы условия для создания в стране аналогичных систем, промышленность поднялась на новый высокотехнологичный уровень.

Дальнейшее развитие систем ряда С-300П проходило более быстрыми темпами.

Наступил этап создания самоходного варианта системы — системы С-300ПМУ (рис. 3.10.11). Трудно переоценить такую характеристику системы как мобильность. Опыт локальных войн (Вьетнам, Египет, Югославия) показал, что именно быстрая смена позиций решающим образом обеспечивает сохранность жизней боевого расчета и боевых средств системы. Техническим заданием на самоходный вариант системы было задано: время готовности боевых средств к стрельбе с марша и время их свертывания после боевой работы и готовности к передислокации на новую позицию должно составлять 5 минут. Боевые средства системы были размещены на самоходных колесных шасси высокой проходимости МАЗ 543М (РПН 5Н63С, ПУ 5П85С(Д) (рис. 3.10.12), КПС 54К6С) и на автопоезде 74106-9988 (РЛО

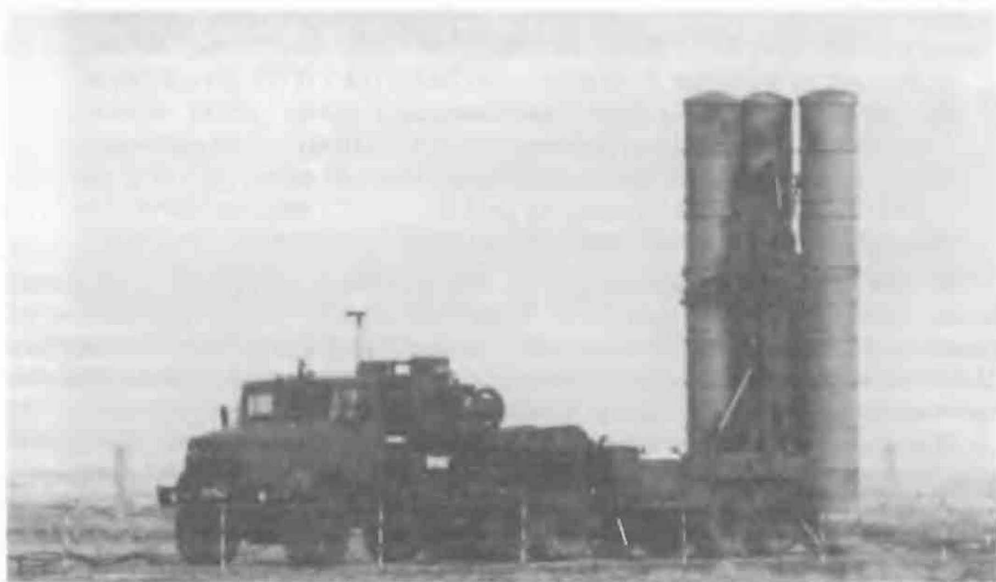


Рис. 3.10.12. Пусковая установка на самоходном шасси с четырьмя ракетами в ТПК (а), пусковая установка на полуприцепе с четырьмя ракетами в ТПК (б)

5Н64С). Автономное электропитание средств обеспечивалось размещенными на шасси газотурбинными системами 5С17, 5С18. Для топопривязки и ориентирования на местности применен штатный армейский топопривязчик типа 1Т12-2М, для связи между средствами системы — телекодированная радиосвязь «Эвольвента». При создании самоходного варианта системы была проведена и конструкторская модернизация, направленная на повышение технологичности изготовления аппаратуры и характеристик эксплуатации. Улучшено размещение аппаратуры внутри аппаратного контейнера Ф2К, в блоках применены врубные разъемы, обеспечившие подключение внешних соединителей непосредственно к объединительной плате блоков с размещенными на ней ячейками и др. Средства, модернизированные в ходе создания самоходного варианта системы, в дальнейшем были применены и в перевозимом, транспортно-контейнерном, варианте системы, а основные конструкторско-технологические решения сохранились и при дальнейших модернизациях средств системы.

В период 1983—1986 годов согласно «Комплексной программе» была проведена модернизация системы С-300ПМУ, направленная на повышение ее тактико-технических характеристик. В результате модернизации расширена зона поражения аэродинамических целей по высоте до 27 км, ближняя граница зоны уменьшена до 5 км, дальняя граница зоны по низколетящим целям увеличена до 38 км при параметре 36 км, существенно повышена помехозащищенность системы, обеспечено поражение ТБР типа «Ланс», в РПН расширен автономный сектор обнаружения низколетящих целей до 105 градусов. На базе системы С-300ПМУ в 1990 году был создан экспортный вариант системы.

Дальнейшее совершенствование системы в основном проводилось в направлении обеспечения поражения тактических и оперативно-тактических нестратегических баллистических ракет (ТБР и ОТБР), повышения помехозащищенности системы, увеличения ее дальности поражения. Для этого нужно было существенно повысить потенциальные характеристики радиолокационных средств, увеличить диапазон скоростей сопровождаемых целей, уменьшить время реакции системы и т. д. Согласно ТЗ модернизированная система должна обеспечивать поражение аэробаллистических ракет и ТБР, летящих со скоростями до 1800 м/с, увеличенную вдвое (до 150 км) дальнюю границу зоны поражения аэродинамических целей, повышенную помехозащищенность (в 10 раз для РПН и в 2—3 раза для РЛО), повышенную автономность боевых действий ЗРК и т.д., а также обеспечить существенное снижение трудоемкости изготовления средств системы. При модернизации в средствах системы были применены все имеющиеся на тот момент современные технические решения, разработан высокотехнологичный конструктив, применены микросхемы высокой интеграции и т.д. В РПН разработана новая конструкция ФАР, обеспечившая снижение вдвое трудоемкости при изготовлении и, соответственно, стоимости, в том числе за счет применения вновь разработанных модулей, объединивших в единую конструкцию 16 фазовращателей, разработаны малошумящие входные СВЧ-усилители принимаемых сигналов, разработан цифровой приемник, обеспечивший увеличение сектора автономного обнаружения примерно в 20 раз, применен высокопроизводительный цифровой вычислительный комплекс

40У6. Для повышения потенциальных характеристик полностью использована энергетика обоих передатчиков с суммарной средней мощностью ~10 кВт. Пусковые установки разработаны в двух вариантах: на самоходных шасси высокой проходимости МАЗ 543М и на автопоезде в составе оборудованного тягача КраЗ-260В и полуприцепа. Последний вариант имеет более низкую цену изготовления, но обладает несколько худшей мобильностью. Для повышения боевых возможностей ЗРК каждая пусковая установка оснащена аппаратурой подготовки и пуска ракет, разработанной на современной элементной базе в существенно меньших габаритах. В системе применена новая ракета 48Н6Е с дальностью полета до 150 км. Ракета оборудована бортовым радиопеленгатором, обеспечившим работу по высокоскоростным целям, а также более мощным боевым снаряжением. Существенно повышена помехозащищенность системы. Боевая работа системы С-300ПМУ1 показана на рис. 3.10.13.

Основные характеристики системы С-300ПМУ1

Канальность ЗРК по цели	6
Зона поражения, км:	
аэродинамических целей	5-150
аэробаллистических ракет и ТБР	5-40
Высота поражения целей, км:	
максимальная	27
минимальная	0,01
Максимальная скорость поражаемых целей, м/с	1800

В настоящее время системы С-300ПМУ, С-300ПМУ1 составляют основу ПВО страны. Поэтому поддержание «трехсотки» в эксплуатации и дальнейшее повышение ее тактико-технических и эксплуатационных характеристик (ТТХ) является первостепенной задачей, учитывая, что в современных экономических условиях в ближайшем времени нет перспективы ее замены на более современную массовую систему средней и большой дальности. Несмотря на большие модернизационные возможности «трехсотки», многие ее элементы, которые 20-25 лет назад были сверхсовременными, на сегодня безнадежно устарели, практически выработали свой ресурс и требуют замены.

Дальнейшее совершенствование системы С-300ПМУ1 проводилось в два этапа.

На первом этапе было обеспечено поражение ОТБР с дальностью запуска до 1000 км (максимальная скорость ОТБР 2800 м/с). Одновременно увеличена дальняя граница зоны поражения аэродинамических целей до 200 км, сокращено время реакции системы до 5–7 с, существенно повышены характеристики обнаружения баллистических целей в командном пункте системы за счет ввода специального сектора обнаружения.

Сегодня уже многие системы С-300ПМУ1, находящиеся на боевом дежурстве, доработаны по результатам испытаний и приобрели новое качество — борьбу с нестратегическими баллистическими ракетами.

На втором этапе модернизации были повышены эффективность поражения ОТБР, увеличена дальняя граница зоны поражения аэродинамических



Рис. 3.10.13. Боевая стрельба системы С-300ПМУ1

целей, помехозащищенность системы, автономность боевых действий ЗРК. Повышение тактико-технических и эксплуатационных характеристик до уровня, соответствующего современному и перспективному состоянию средств воздушного нападения, достигнуто путем совершенствования аппаратуры и программно-алгоритмического обеспечения боевых средств, испо-

льзования ракеты 48Н6Е2 с модифицированным боевым снаряжением, интеграции системы в единую систему ПВО, использования радиолокационной информации от нового придаваемого всевысотного обнаружителя 96Л6Е.

Успехи микроэлектроники, вычислительной техники, развитие антенных фазированных решеток привели к возможности создания мобильной унифицированной многоканальной системы нового поколения ряда С-300П.

В процессе модернизации в боевых средствах системы были применены новые высокопроизводительные вычислительные средства — комплекс «Эльбрус-90 микро», обладающий по сравнению с ранее применяемым ЦВК 40У6 увеличенной в 70 раз надежностью, практически неограниченными возможностями по реализации новых алгоритмов, применены вновь разработанные средства телекодовой и речевой связи «ТУФ-М», обладающие повышенной в 10 раз пропускной способностью, повышенной помехозащищенностью, применен современный комплексированный навигационный комплекс «Ориентир», имеющий три независимых системы навигации: спутниковую, одометрическую и радиотехническую, в рабочих местах операторов боевого расчета широко применены цветные индикаторы, выполненные на жидкокристаллических матрицах.

В ходе модернизации по существу была создана новая система — система С-300ПМУ2, с существенно более высокими характеристиками по сравнению с характеристиками системы С-300ПМУ1.

На базе системы С-300ПМУ2 в период с 1996 по 2006 год был создан экспортный вариант системы, имеющий большой спрос на мировом рынке вооружений. В настоящее время 8 ЗРК и 2 КПС закуплены и поставляются КНР, на поставку еще 7 ЗРК и двух КПС с КНР подписан контракт. В стадии подписания находятся контракты с другими странами на поставки ЗРС С-300ПМУ2. Экспортные поставки систем С-300ПМУ1 и С-300ПМУ2 обеспечили устойчивую загрузку предприятий промышленности в самый трудный перестроечный период нашей страны, и сегодня эти предприятия имеют все возможности по производству системы С-300ПМУ2 в необходимых для обороны страны количествах.

В заключение следует сказать, что системы ряда С-300П обеспечивали и обеспечивают в настоящее время надежную оборону страны от всех существующих средств воздушного нападения, в том числе средств пилотируемой авиации во всем диапазоне их боевого применения от предельно малых до предельно больших высот и в сложной помеховой обстановке, а также от нестратегических оперативно-тактических баллистических ракет с дальностью пусков до 1000 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Функциональные возможности радиоэлектронных средств в конце XX и в начале XXI века существенно возросли благодаря применению цифровых методов обработки информации и специализированных микросхем, микропроцессоров, а также интеграции их с приборами функциональной электроники. В эти годы особенно ярко проявилось их взаимовлияние на динамику развития радиоэлектроники.

Примерами реализации новых возможностей и достижений радиоэлектроники, в которых использованы перечисленные выше методы, могут служить сотовая связь, космическая навигационная система и «карманные» АСУ.

Концепция построения системы сотовой связи была предложена во второй половине XX столетия для реализации оперативного обмена информацией большого количества распределенных в пространстве абонентов, включая и подвижных. Построенная на первом этапе система с применением аналоговых сигналов имела ограниченные возможности как по количеству одновременно разговаривающих абонентов, так и по скорости поиска и обмена информацией. В качестве приборов абонента использовались довольно громоздкие переносные приемопередающие устройства (весом несколько килограмм и объемом до двух кубических дециметров). Развитие микропроцессорных схем, высокоэффективных преобразователей аналоговой информации в цифровую и цифровой в аналоговую, фильтров на поверхностных волнах, твердотельных изделий функциональной электроники, а также применение новых схемотехнических решений по цифровой обработке сигнала и программ управления привели к коренному изменению облика абонентских приборов с одновременным снижением их веса и невероятным расширением потребительских функций. В настоящее время в трубке мобильной связи объемом менее 100 см³ и весом 200-300 г наряду с функцией обеспечения качественной дуплексной связи реализованы и такие функции:

- запоминание большого количества номеров телефонов абонентов с фамилиями;
- автоматическое определение и запоминание номеров входящих звонков;
- прием и передача текстовых сообщений;
- калькулятор и игры;
- автоматический дозвон, таймер и будильник;
- записная книжка;

- диктофон;
- фото- и киносъемка с записью и воспроизведением изображения и звука;
- радиоприемник FM-диапазона;
- связь с Internet.

Развертывание глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАС и GPS, свободный доступ в систему потребителей, создание специализированных аналоговых и цифровых микросхем высокой степени интеграции, разработка программ информационного обеспечения и специальных схемных решений для малогабаритных приемников, включая встраиваемые модули-приемники, сделали общедоступной услугу получения навигационной информации различных объектов. Структурно приемный модуль GPS включает всего две специализированные интегральные схемы: высокочастотную ИС приемника (аналоговая часть) и GPS-процессора (цифровая часть). В приемной части производится фильтрация и усиление входных сигналов, а также их оцифровка, в цифровой части — дальнейшая цифровая (аппаратная и программная) обработка сигнала. Цифровая часть содержит многоканальный коррелятор, процессор, ПЗУ и ОЗУ. Напряжение питания 3,3 В, потребляемая мощность 0,65 Вт. Масса модуля 50 г, размеры $71 \times 51 \times 12$ мм. Модули способны работать в диапазоне температур от -40 до 85°C. Планируется дальнейшая миниатюризация приемного модуля и его реализация в сверхтонком исполнении с размерами $25,5 \times 25,5 \times 3$ мм со снижением энергопотребления до 0,015 Вт. Такой прибор обеспечивает определение местонахождения объекта как стационарного, так и подвижного с точностью до 5 м в реальном масштабе времени в любой точке земного шара.

В последние годы активно развивается технология «система в кристалле». Эта технология, совместно с технологией микродисплеев, имеет особое значение для создания автоматизированных систем управления средних и нижних уровней звеньев управления и объектов различных вариантов базирования. На ближайшие 10 лет практически нет альтернативы этим технологиям, которые кардинально решают важнейшие проблемы микроминиатюризации и существенного повышения надежности и долговечности этих видов технических средств.

По технологии «система в кристалле» уже созданы системные блоки для персональных компьютеров. Их тактовая частота от 200 до 500 МГц, потребляемая мощность от 200 до 800 мВт. На их основе разработаны и выпускаются «карманные компьютеры» размером $120 \times 80 \times 15$ мм, весом 170 г, с цветным индикатором 320×320 элементов и числом цветовых оттенков до 65000. Размеры компьютера определяются только размерами платы для разводки и установки необходимых разъемов для подключения различных периферийных устройств.

Активно развивается еще одно направление в области радиоэлектронного приборостроения — микросистемотехника, без которого невозможно комплексное решение назревших актуальных проблем в области конструирования и технологии радиоэлектронной аппаратуры, специализированной компонентной базы.

Микросистемотехника — это новая область науки и техники, изучающая принципы организации и построения микроминиатюрных функциональных устройств, преобразующих физические параметры среды в электронную форму информации или электрические сигналы в изменение физических параметров среды.

На основе современных достижений микроэлектроники, микромеханики, нанотехнологии, оптоэлектроники, акустоэлектроники и других критических технологий сегодня создаются микросистемотехнические (МСТ) устройства для систем навигации, автоматического контроля, управления, наведения в средствах вооружений, в промышленном оборудовании, в наземных транспортных средствах, для коммутации в высокоскоростных системах передачи информации, мониторинга, диагностики в различных сферах гражданского и оборонного применения.

В конце 1990-х годов в радиоэлектронике отмечается качественный скачок — создание радиокомплексов с искусственным интеллектом. Искусственный интеллект в аппаратуре предполагает решение не фиксированного набора ряда предопределенных задач и выполнения конкретных функций, а многообразных задач и функций, в том числе неожиданно возникающих в процессе адаптации к условиям боевого применения. Все это требует существенного функционального усложнения аппаратуры и резкого увеличения числа компонентов и изделий электронной техники в аппаратуре при сохранении ее живучести.

Перечисленные выше примеры характеризуют достижения радиоэлектроники за рубежом. Отечественная радиоэлектронная промышленность после спада в период с 1990 годов до начала XXI века практически не развивалась, что привело к существенному снижению ее технического уровня. Даже в 2005 году во вновь создаваемой и модернизируемой радиоэлектронной аппаратуре военного назначения использовалось до 60% импортной элементной базы. В последние годы положение несколько изменилось, однако и в настоящее время в перспективных разработках радиоэлектронной аппаратуры используется значительное количество отечественных изделий электронной техники, разработанных 20 лет назад, что не может не сказываться на техническом уровне, функциональных и надежности показателей аппаратуры. Такая ситуация ставит под угрозу национальную безопасность государства. Преодоление сложившегося положения возможно путем целенаправленного развития работ на основе специальных государственных программ.

Боев Сергей Федотович

Доктор экономических наук, профессор. Действительный член Академии военных наук и Международной академии связи, член попечительских советов Тверского суворовского училища и «Клуба адмиралов» России.

В 1978 году окончил Всесоюзный юридический заочный институт по специальности юрист. В 1984 году окончил Московский институт управления им. С. Орджоникидзе по специальности организация управления в машиностроительной промышленности.

С 1971 по 1988 год прошел путь от ученика слесаря до главного бухгалтера Радиотехнического института им. академика А.Л. Минца. С 1988 по 1996 год — исполняющий обязанности заместителя директора и генерального директора АООТ «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца», с 1996 по 1999 год — генеральный директор АООТ «Радиотехнический институт им. Академика А.Л. Минца», с 1999 по 2000 год — генеральный директор ЗАО «Научно-промышленная компания «Высокие технологии и стратегические системы», с 2000 года по настоящее время — генеральный директор ОАО «Концерн «РТИ Системы».

С.Ф. Боев внес большой вклад в разработку, создание, принятие на вооружение и постановку на дежурство РЛС «Днепр», «Дарьял», «Волга». В настоящее время под его руководством ОАО «Концерн «РТИ Системы» проводит работы в интересах национальной безопасности, имеющие важное государственное значение.

Награжден медалями: «В память 850-летия Москвы», «300 лет Российскому флоту», «За укрепление боевого содружества», медалью Федерации космонавтики России «За заслуги», медалью имени министра радиопромышленности В.Д. Калмыкова, знаком «Почетный радист». Присвоено почетное звание «Заслуженный экономист Российской Федерации».

Борисов Василий Иванович

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН.

С 1986 года возглавлял Воронежский научно-исследовательский институт связи. Генеральный директор ОАО «Концерн «Созвездие». В качестве генерального конструктора руководит разработками целого ряда автоматизированных систем и средств радиосвязи.

Автор пяти монографий, свыше 90 научных работ, имеет более 20 авторских свидетельств на изобретения.

Награжден орденами «Знак Почета», Трудового Красного Знамени, «За заслуги перед отечеством» IV степени.

Васильев Андрей Георгиевич

Доктор физико-математических наук, профессор.

В 1982 году окончил Московский институт электронной техники. С 1982 года работал в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, с 1983 по 1989 год — в Институте общей физики РАН, с 1989 по 1998 год — в Физико-технологическом институте РАН. В 1998 году переведен в Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики: декан факультета электроники. С 2005 — генеральный директор ФГУП «НПП «Пульсар».

Возглавляет комплекс работ по созданию сложных функциональных блоков для радиолокационных систем, СВЧ твердотельной элементной базы на традиционных и новых широкозонных материалах.

Область научных интересов: физика и технология микро- и нанoeлектроники.

Автор и соавтор более 100 научных трудов.

Иммураев Игорь Яковлевич

Доктор технических наук, профессор. Действительный член Международной академии информатизации, Академии инженерных наук Российской Федерации, Международной академии по информации, информационным процессам и технологиям.

В 1954 году закончил с отличием радиофакультет Ленинградского Высшего мореходного училища. С 1958 по 1991 год работал во Всесоюзном научно-исследовательском институте радиотехники Министерства радиопромышленности СССР, с 1985 года в должности заместителя директора по науке. Одновременно являлся научным руководителем и главным конструктором ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию современных радиолокаторов с фазированными антенными решетками (ФАР), активными ФАР, цифровыми ФАР.

С 1987 года И.Я. Иммореев заведует кафедрой аналоговых и цифровых радиоэлектронных систем Московского авиационного института. С 1998 года лаборатория кафедры выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию современных сверхширокополосных радиолокационных и связных систем. В 2007 году на базе лаборатории создан Научно-исследовательский центр сверхширокополосных технологий Московского авиационного института, директором которого назначен И.Я. Иммореев.

С 1993 года И.Я. Иммореев — член Экспертного совета при Правительстве Российской Федерации, где занимается проблемами науки и транспорта.

Область научных интересов: радиолокация, прикладные вопросы электродинамики и информатики. Автор и соавтор более 100 научных трудов, в том числе трех монографий.

Лауреат Государственной премии СССР. Имеет почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Канащенков Анатолий Иванович

Доктор технических наук, кандидат экономических наук, профессор, действительный член Международных академий.

С 1974 по 1979 год — директор завода БЭМЗ (г. Брянск), с 1979 по 1985 год — генеральный директор ПО «Радиоприбор» (г. Рязань). С 1985 по 2006 год — руководитель НПО «Фазотрон», сначала генеральный директор НПО «Фазотрон» и директор НИИ радиостроения, затем с 1997 года — генеральный директор, генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР». С мая 2006 года — заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» по науке, генеральный конструктор.

Лауреат Государственной премии РФ, имеет почетные звания «Заслуженный деятель науки РФ», «Заслуженный машиностроитель РФ».

Кузнецов Юрий Алексеевич

Кандидат технических наук, профессор.

В 1962 году окончил Московский энергетический институт. С 1962 года работает в ГУП «НПП «Пулсар». С 1982 года — заместитель генерального директора по науке.

Специалист по разработке приборов фотоэлектроники. В 1960 годах занимался разработкой методов эпитаксиального наращивания германия и созданием СВЧ германиевых транзисторов. В 1973 году возглавил работы по созданию отечественных изделий на основе приборов с зарядовой связью. Были разработаны и освоены в серийном производстве линейные и матричные фоточувствительные БИС на ПЗС, разработки приборов отмечены двумя медалями ВДНХ, золотой и серебряной медалями салона инноваций «Эврика» (г. Брюссель).

Автор более 100 научных работ и изобретений. Лауреат Государственной премии.

Кук Калью Иванович

Доктор технических наук, профессор. Действительный член четырех общественных технических академий: Международной академии связи, Международной академии информатизации, Российской академии естественных наук, Академии медико-технических наук Российской Федерации.

В 1955 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. академика В.Н. Образцова и получил специальность инженера-электрика. Трудовую деятельность начал в Конструкторском бюро Главного управления сигнализации и связи Министерства путей сообщения.

С 1960 по 1981 год и с 1984 по 1985 год работал в Московском научно-исследовательском радиотехническом институте (МНИРТИ) и прошел путь от ведущего инженера до директора.

При непосредственном участии К.И. Кука в период с 1960 по 1980 год создана целая серия народнохозяйственных и специальных радиорелейных и тропосферных систем связи, многие из которых до настоящего времени находятся на вооружении Российской армии (Р-404, Р-410, Р-414, Р-416, Р-417, Р-417С, Р-420, 5Я53/5Я54, 5Я662/5Я663, Р-444 и др.). В 1960–1970 годы разработан ряд мощных передающих устройств СВЧ различного назначения, в том числе для наземных станций спутниковой связи «Молния-1», «Молния-3».

В период с 1965 по 1982 год под техническим руководством К.И. Кука создаются Центральные узлы связи Единой Спутниковой Системы Связи Министерства обороны СССР и

другие наземные объекты космической связи. С 1982 по 1989 год как Главный конструктор руководил строительством международной системы тропосферной связи «Барс», участвовал в создании комплекса «Буран» и ряда других крупных специальных телекоммуникационных заказов по военной тематике.

С 1984 по 1990 год — заместитель, первый заместитель Министра промышленности средств связи СССР, а с 1990 по 1991 год — первый заместитель Министра связи СССР.

С 1994 года по настоящее время — вице-президент ОАО «Телеком».

Автор более 320 научных трудов, в том числе 10 монографий, 8 изобретений.

Лауреат Ленинской премии, премии Правительства Российской Федерации. Почетный доктор Всемирного технологического университета, почетный академик Международной академии связи.

Награжден орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и 8 медалями. Имеет знаки «Почетный радист СССР», «Почетный работник промышленности средств связи СССР».

Куклев Владимир Петрович

Кандидат технических наук, профессор.

В 1950 году окончил Ленинградский электротехнический институт. С 1950 по 1952 год работал в КБ-1 («Алмаз»), где занимался исследованием точности фазового метода измерений дальности. С 1954 по 1960 год — начальник Центрального бюро применения ЭВ и ПП. С 1960 года — начальник 3-го Управления ГКЭТ, а затем — начальник 8-го Управления по электронным приборам отображения. С 1965 по 1982 год В.П. Куклев — директор НИИ «Платан» и генеральный директор НПО «Платан».

Награжден боевыми и другими орденами и медалями.

Левин Владимир Константинович

Доктор технических наук, профессор, председатель диссертационного совета. Академик РАН.

В 1950 году окончил Московский энергетический институт по специальности инженер-физик. Работает с 1951 по 1967 год и с 1976 года по настоящее время в КБ промышленной автоматики, преобразованном в 1978 году в НИИ «Квант» Минрадиопрома (в настоящее время — ФГУП «НИИ «Квант» Роспрома).

Должности: 1960-1967 гг. — главный инженер, 1976-1998 гг. — директор, с 1996 по настоящее время — научный руководитель НИИ «Квант», с 1967 по 1976 гг. — заместитель директора по научной работе НИЦ ЭВТ.

Мажоров Юрий Николаевич

Кандидат технических наук, профессор, генерал-майор. В 1940 году был призван в Красную армию. В составе 490 Отдельного радиодивизиона в октябре прибыл на фронт, участвовал в обороне Москвы, разведчик-радист. Воевал на фронтах: Центральном, 1-м Белорусском, 1-м Украинском. Принимал участие в боях на Курской дуге, в освобождении г. Праги. В период 1946-1948 годов участвовал в изучении и освоении немецкой ракеты Фау-2, был участником первых пусков этих ракет в Капустинном Яре. В 1953 году закончил Военную Краснознаменную академию связи и был направлен в НИИ-108 (впоследствии ЦНИРТИ).

С 1961 по 1968 год был заместителем начальника института по научной работе — главным инженером. В период с 1968 по 1985 год — директор ЦНИРТИ, генеральный директор НПО «Пальма» (два института и два завода).

Автор более 25 изобретений, научных трудов.

Лауреат Ленинской премии и двух Государственных премий.

Награжден орденами Ленина, Отечественной войны 1 степени, Трудового Красного Знамени, двумя орденами Красной Звезды, медалями «За боевые заслуги», «За отвагу» и еще 25 медалями.

Осипов Борис Яковлевич

Кандидат технических наук.

В 1954 году окончил Воронежский государственный университет.

С 1958 года работает во ВНИИСе, ныне ОАО «Концерн «Созвездие». Прошел путь от старшего инженера до заместителя директора. В настоящее время — начальник научно-информационного центра ОАО «Концерн «Созвездие». На протяжении 30 лет был главным конструктором многих разработок по системам связи и управлению, в том числе главным конструктором отрасли по одному из направлений в области радиосвязи.

Автор более 50 изобретений.

Награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, Октябрьской революции.

Осокин Александр Николаевич

Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ.

Окончил в 1961 году Рязанский радиотехнический институт.

С 1961 по 1970 год работал на РКБ «Глобус» (г. Рязань), где прошел путь от инженера до заместителя главного конструктора разработки. С 1970 по 1974 год — заместитель начальника ОКБ ВТ Рязанского радиотехнического института. С 1974 по 1979 год — главный инженер филиала КБП (г. Рязань).

С 1977 года работал в КБ «Рубин», ныне НИИ «Рассвет» ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»», в создание и становление которого внес большой личный вклад. С 1979 года по настоящее время работает в НПО «Фазотрон» — ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» (г. Москва): с 1979 по 1980 год — заместитель главного конструктора разработки; с 1980 по 1985 год — заместитель генерального директора; с 1985 по 1994 год — начальник отдела стандартизации НПО — начальник базового отдела 4-го ГУ МРП; с 1994 по 2000 год — начальник комплекса научно-информационного обеспечения. С 2000 года по настоящее время — директор департамента информационных стратегий.

Перунов Юрий Митрофанович

Доктор технических наук, профессор, председатель ученого и диссертационного советов, действительный член академии МИА, РАЕН, АВН и др.

В 1960 году окончил Таганрогский радиотехнический институт. В НИИ автоматизации промышленных предприятий (г. Ростов-на-Дону) прошел путь от инженера до начальника тематического отделения. В период с 1975 по 1987 год — директор ЦКБ «Градиент» (с 1984 года — ВНИИ «градиент»). С 1987 по 2006 год — генеральный конструктор ЦНИРТИ, научный руководитель направления радиоэлектронной борьбы, председатель Совета главных конструкторов направления в НПО им. П.С. Плешакова. С 2006 года — генеральный конструктор ЗАО «Национальный научно-технический центр радиоэлектронной разведки и радиоэлектронной борьбы».

Автор более 150 трудов, книг и монографий. Имеет 85 патентов на изобретения.

Лауреат Государственной премии СССР, премии Совета Министров СССР. Награжден орденами Трудового Красного Знамени, Октябрьской революции. Медалью. Имеет почетное звание «Почетный радист СССР», «Заслуженный изобретатель РФ».

Ребров Сергей Иванович

Доктор технических наук, профессор.

После окончания в 1952 году Московского энергетического института работает в ФГУП «НПП «Исток» (г. Фрязино) Московской области. В 1953 году — начальник лаборатории, 1959 — начальник отдела. С 1962 по 1988 год — генеральный директор ФГУП «НПП «Исток», а с 1985 года и по настоящее время — генеральный конструктор этого предприятия.

В течение многих лет являлся главным конструктором разработок специальных электронных приборов и устройств для важнейших радиоэлектронных систем, в том числе для всемирно известных комплексов СЗООП и СЗООВ. Под его руководством и при непосредственном участии разработаны основные принципы системы обеспечения производственной надежности и качества продукции с использованием операционного контроля унифицированных технологических процессов в СВЧ-приборостроении. Он являлся родоначальником комплексированных устройств — нового класса радиоэлектронных изделий, оптимально сочетающих требования радиотехники с возможностями электроники. Впервые в нашей стране под его руководством осуществлена программируемая цифровая обработка радиосигнала в бортовых радиоэлектронных системах на основе отечественных быстродействующих процессоров и проведено картографирование земной поверхности с использованием антенны с синтезированной апертурой в реальном масштабе времени. Сформулированные им принципы системотехнического решения сложных радиоэлектронных комплексов нашли полное подтверждение в процессе полигонных испытаний и использованы при построении СВЧ части новейших видов радиоэлектронной аппаратуры.

Ребров С.И. является одним из организаторов выполнения Постановления Правительства Российской Федерации «О государственном оборонном заказе на 2002 год» от 21 февраля 2002 года по техническому перевооружению и реконструкции ФГУП «НПП «Исток» для обеспечения современными монолитными СВЧ микросхемами приоритетных радиоэлектронных систем, комплексов вооружения и военной техники.

Область научных интересов: вакуумная и твердотельная электроника сверхвысоких частот.

Автор двух монографий, около 100 научных трудов и 25 изобретений.

Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, Государственной премии СССР, премии Минобороны России.

Награжден орденом Ленина, Октябрьской революции, Почетной грамотой Президиума Верховного совета РСФСР. Имеет знак «Почетный радист РФ», почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РФ».



Рыжак Измаил Самуилович

Доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, член редколлегии журнала «Радиотехника и электроника» РАН РФ.

В 1953 году окончил с отличием МАИ по специальности «авиационная радиотехника».

В 1954 году начал трудовую деятельность в НИИ-17 в качестве разработчика канала помехозащиты, а затем ведущего инженера по бортовой РЛС. В 1955 году был переведен в ОКБ-15 (г. Жуковский). В 1958 году переведен в ОКБ-339 (в последующем — НИИ радиостроения, НПО «Фазотрон», ныне — ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР»), где работает по настоящее время.

С 1984 года И.С. Рыжак возглавляет в ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» лабораторию, а с 1987 — отдел перспективных научных исследований.

И.С. Рыжак с 1966 года преподает в МАИ. Автор 18 изобретений.

Имеет знак «Почетный радист РФ».

Рязанов Александр Владимирович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

После окончания в 1951 году Ленинградского авиационного техникума работает в ОАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина. В 1958 году окончил Московский авиационный институт. Последовательно занимал должности: техника, инженера, заместителя начальника лаборатории, заместителя главного конструктора, начальника отдела, заместителя главного конструктора, с 2002 года — главный конструктор системы С-300П — начальник СКБ. Принимал участие в разработках систем ПВО: С-25, С-75, С-200, С-300 и всех ее модификаций, в том числе экспортных аналогов.

Лауреат Государственной премии СССР, Государственной премии РФ и премии им. академика А.А. Расплетина Российской академии наук.

Награжден орденами: «Знак Почета» Трудового Красного Знамени, знаком «Почетный радист РФ».

Слока Виктор Карлович

В 1958 году окончил МАИ по специальности радиоинженера. Генеральный конструктор ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца».

Занимаемые должности: 1952-1964 гг. — техник, инженер, старший инженер, руководитель конструкторской бригады, ведущий конструктор, начальник лаборатории (организация п/я 2264), 1964-1997 гг. — старший научный сотрудник, начальник отдела, начальник научно-исследовательского отделения (ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца»), 1977-1996 гг. — директор института, с 1996 года по настоящее время — генеральный директор.

Лауреат Государственной премии, Герой Российской Федерации.

Награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалями «300 лет Российскому флоту», «В память 850-летия Москвы», знаками «Почетный радист РФ», «Почетный ветеран труда РТИ».

Сухарев Евгений Михайлович

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, Российской академии естественных наук, Международной академии связи, Академии военных наук и ряда других общественных академий.

После окончания в 1957 году Московского физико-технического института был направлен в КБ-1 (МКБ «Стрела») и сразу включился в полигонные испытания системы С-75. Следующей разработкой ЗУРО была система С-200, в 1966 году — экспериментальный комплекс «Омега» с применением лазеров. Впервые при участии Е.М. Сухарева был разработан и испытан оптический локатор, мощные импульсные твердожильные и молекулярные лазеры. С 1975 по 1977 год работал директором вновь созданного НИИ радиооптики. После завершения создания НИИ радиооптики вновь вернулся на предприятие, где занимал последовательно должности начальника лаборатории, отдела, заместителя главного инженера. Сфера научной и технической деятельности — обеспечение разработок предприятия современной элементной базой, создание гибких производственных систем для входного контроля и тренировки ИС, автоматизированного проектирования и изготовления БИС и СБИС. В настоящее время работает ученым секретарем НТС и ученых советов ОАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина, советником генерального конструктора.

Автор 37 авторских свидетельств на изобретения, более 100 статей.

Лауреат Государственной премии СССР. Награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалью «За трудовую доблесть».

Шлифер Эдуард Давидович

Доктор технических наук, действительный член Академии электротехнических наук РФ.

В 1952 году окончил с отличием Московский энергетический институт. Работает в ОАО «Плутон». С 1952 года по настоящее время — научный руководитель ОАО «Плутон» и начальник сектора ФГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина».

Присвоено почетное звание «Заслуженный машиностроитель Российской Федерации», «Почетный работник электронной промышленности СССР».

Штейнберг Виталий Носифович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор МТИЭМ, член-корреспондент Международной академии информатизации.

После окончания в 1964 году Московского лесотехнического института работал в НИЭМ-НИЦЭВТ-НИИ «Аргон» инженером, заместителем начальника отдела, отделения. С 1973 года заместителем главного инженера по спецтехнике — начальником космического отделения, с 1985 года — первым заместителем директора по научной работе — главным инженером, с 2001 года — директором, с 2006 года — главным конструктором ФГУП «НИИ «Аргон». Главный конструктор комплекса БЦВМ «Аргон», базовых БЦВМ А-30, А-40, А-5Д, БЦВМ Ритм-20, Бета-3М, 1Б529, 7146, ВК2РА-35, 65С728, ЕА2170. С 1991 года — директор и заместитель председателя правления Ассоциации заказчиков и потребителей унифицированных изделий электронной техники «Фонд УНИЭТ».

Автор свыше 60 научных трудов, изобретений, учебно-методических пособий.

Награжден орденами «Знак Почета», Трудового Красного Знамени, четырьмя медалями, Почетной грамотой Правительства РФ, знаком «Почетный радист». Имеет почетное звание «Заслуженный машиностроитель Российской Федерации».

Шубарев Валерий Антонович

Доктор технических наук, профессор, академик международной академии информатизации.

В 1965 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

С 1971 по 1979 год работал ведущим инженером, старшим научным сотрудником, начальником отдела НПО «Авангард». В 1979 году приказом министра радиопромышленности СССР назначен заместителем генерального директора по научной работе ЛНПО «Авангард». С 1998 года — генеральный директор ОАО «Авангард» Российского агентства по системам управления. Вся трудовая деятельность В.А. Шубарева связана с работой в области конструирования и технологии производства радиоаппаратуры. В последние годы при реализации федеральных целевых программ коллективом под руководством В.А. Шубарева созданы новые технологические процессы и радиоэлектронные устройства, не уступающие по технико-экономическим параметрам зарубежным аналогам.

Автор более 100 научных трудов, трех книг и учебных пособий, имеет 27 авторских свидетельств на изобретения.

Лауреат Государственной премии СССР, премии Совета Министров СССР, Гособорона прома России, награжден медалью «За трудовую доблесть».

Якубовский Сергей Викторович

Кандидат технических наук.

В 1956 году окончил Всесоюзный заочный энергетический институт. С 1956 по 1959 год работал в ЦНИИ-108 инженером, с 1959 по 1965 год — старший инженер, ведущий инженер в КБ-1. С 1965 по 1967 работал в НИИ микроприборов начальником лаборатории, начальником отдела. С 1967 года работает в ЦКБ «Дейтон» — заместителем директора по научной работе, директор, а с 1996 года по настоящее время — советник.

Автор более 100 научных трудов, имеет более 10 авторских свидетельств на изобретения.

Награжден орденами Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, Отечественной войны II степени.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosfera.ru
sales@technosfera.ru
факс: (495) 956 33 46

**В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!**

**Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosfera.ru>**

Динамика радиоэлектроники

Координатор проекта – И.Г. Титова
Редактор – И.В. Кокорева
Компьютерная верстка – В.Ю. Кознов
Дизайн – И.А. Куколева
Корректор – Н.И. Кононенко
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

Формат 70х100/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л 25. Тираж 3000 экз. Зак. № 2575
Бумага офсет №1, плотность 65г/м²

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ООО ПФ «Полиграфист»
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, дом 3

период и поколение радаров	1950-е годы	1960-е годы		1970-е годы	1980-е годы	Начало 1990-х — 2000-е годы	2000—2020 годы	
	1	2	2+	3	4	4+	5	
Наименование								
Вид бортового радиоэлектронного комплекса на основе радиолокационной системы (самолет-носитель)	РЛС «Изумруд» (МиГ-17)	РЛС «Тайфун» (Су-15ТМ) РЛС «Сапфир-21» (МиГ-21) РЛС «Орел» (Су-15) РЛС РП-1 «Сокол» (Як-25) РЛС «Изумруд-2» (МиГ-19)	РЛС «Смерч» (Ту-128) РЛС «Смерч-А» (МиГ-25)	РЛПК «Сапфир-23» (МиГ-23) РЛПК «Сапфир-25» (МиГ-25ПЛ)	СУВ С29 на основе РЛС Н019 (МиГ-29) СУВ С27 на основе РЛС Н001 (Су-27)	СУВ на основе РЛС «Копье-21И» (МиГ-21 БИС UPG) СУВ на основе РЛС «Копье-М» (Су-25М, Су-39) СУВ на основе РЛС «Жук-МЭ» (МиГ-29СМТ, МиГ-29К) СУВ на основе РЛС «Жук-МСЭ» (Су-30МКИ) СУВ на основе РЛС «Заслон» (МиГ-31)	ИРЭК СУВО-5 (истребители 5-го поколения)	
	Состав системы	РЛС + СРП (механ.) (РЛС — радиолокационная станция СРП — счетно-решающий прибор)	РЛС + СРП (аналог.)	РЛС + СРП (аналог.)	РЛС + ТП + СРП (аналог.) (ТП — тепlopеленгатор)	РЛПК+ОэПрНК+СРП (цифр.) (ОэПрНК — оптико-электронный прицельный навигационный комплекс)	РЛПК + ОэПрНК + СРП (цифр.) + комплексированные радиотехнические системы	ИРЭК СУВО-5 — интегрированный РЭК системы управления вооружением и обороной истребителя 5-го поколения
Функции	Перехват в свободном пространстве в задней полусфере							
	Добн = 11 км («Изумруд») Nц = 1/1	Добн = 50 км («Тайфун») Добн = 18 км («Сапфир-21») Добн = 28,5 км («Орел») Добн = 36 км («Сокол») Nн = 1/1	Добн = 40 км («Смерч») Добн = 71,5 км («Смерч-А»)	Добн = 50 км («Сапфир-23») Добн = 71,5 км («Сапфир-25»)	Добн = 80 км (Н019) Добн = 180 км (Н001)	Добн = 57 км («Копье-21И») Добн = 70 км («Копье-М») Добн = 120 км («Жук-МЭ») Добн = 180 км («Жук-МСЭ»)	режим «воздух-воздух» (Все дальности обнаружения пересчитаны для целей с $\sigma = 5 \text{ м}^2$)	
	(Nц — количество обнаруживаемых/атакуемых целей)	Использование ракет «воздух-воздух»						
		Всеракурсный перехват в свободном пространстве						
		Nц = 1/1	Nц = 1/1	Nц = 2/2	Nц = 10/4 Nц = 8/4 («Заслон») Nц = 8/2 («Копье»)		режим «воздух-воздух»	
		Перехват на фоне земли в задней полусфере						режим «воздух-воздух»
		Всеракурсный перехват на фоне земли						режим «воздух-воздух»
		Обеспечение групповых действий		Атака нескольких целей				
		режим «воздух-поверхность» Распознавание классов и некоторых типов целей и их атака (высокоточным оружием — ракетами и управляемыми бомбами) Обнаружение наземных и надводных объектов, в т.ч. подвижных, и их сопровождение Обход и облет препятствий (информационное обеспечение) Картографирование земной поверхности						
		Обнаружение на больших дальностях, сопровождение и атака большого количества целей с уменьшающейся заметностью Одновременное сопровождение и атака воздушных и наземных (надводных) целей при применении АФАР Автоматическое противодействие средствам РЭ, противника, в том числе адаптивное формирова-						

					(РЭБ — радиэлектронная борьба; СШС — сверхширокополосные сигналы)	в том числе многопозиционные Скрытность излучения (за счет использования СШС)
	Передатчик с воздушным охлаждением на магнетроне Механические СРП для расчета режимов атаки	Антенна Кассегрена, обеспечивающая моноимпульсную пеленгацию, защищающую от угловых помех. В ней используется компенсационный канал для защиты от некогерентных помех, а также поляризационная защита (в РЛС «Санфир-21», «Тайфун», «Смерч», «Смерч-А») Антенна с увеличенным до 1 м диаметром зеркала, что позволило существенно увеличить дальность действия РЛС («Сокол») Передатчик с жидкостным охлаждением на магнетроне Широкий диапазон частот, обеспечивающий совместимость работы РЛС и полсвета полуактивной РГС ракеты «воздух-воздух» (РГС — радиолокационная головка самонаведения) Дополнительный передатчик в вынесенном диапазоне частот («Смерч-А») Электронные блоки и узлы в модульном исполнении Аналоговый СРП для расчета режимов атаки	Система СДЦ с внешней когерентностью, использующая в качестве опорного сигнала отражения от земли для работы на фоне земли (СДЦ — селекция движущихся целей) Передатчик с жидкостным охлаждением на пролетном клистроне	Когерентный передатчик на 2-х режимной ЛБВ, обеспечивающий режимы излучения: НЧП, СЧП и ВЧП для РЛС и непрерывный для полсвета РГС (СЧП — средняя частота повторения ВЧП — высокая частота повторения) Цифровая обработка сигнала (с бинарным квантованием при ограниченном динамическом диапазоне) Использование «гребенки» узкополосных высокочастотных кварцевых фильтров, обеспечивающих перекрытие диапазона доплеровских частот Использование БЦВМ для формирования временной диаграммы режимов работы, управления блоками РЛС, определения координат целей, расчета зон атаки, выбора оружия и управления им. Использование ПО для реализации всех указанных задач (БЦВМ — бортовая цифровая вычислительная машина)	Унификация с использованием модульных конструкций Открытая архитектура построения РЛС ЩАР (шелевая антенная решетка) с большим коэффициентом усиления и низким уровнем боковых лепестков (это увеличило дальность действия РЛС по НЛЦ, в том числе при атаке в переднюю полусферу) БЦВМ для вторичной обработки информации и формирование режимов управления. Наличие процессора и БЦВМ позволило часть аппаратных функций реализовать с помощью ПО Передатчик с более высокой внутренней когерентностью Цифровой процессор для обработки первичной информации с использованием многократных АЦП и фильтрация с применением быстрого преобразования Фурье (АЦП — аналогово-цифровой преобразователь) Синтезирование апертуры антенны для повышения угловой разрешающей способности за счет обужения луча	Многофункциональная АФАР (в случаях: одновременной работы по большому количеству целей; одновременной работы по воздушным и наземным целям; адаптирующего противодействия средствам РЭБ; обеспечения высокой живучести; необходимости формирования диаграмм направленности с низким УБЛ) (УБЛ — уровень боковых лепестков; АФАР — активная фазированная антенная решетка) Использование в АФАР ЛПМ (приемо-передающего модуля) на основе монолитной технологии обеспечивающего высокие мощность и КПД в рабочем диапазоне частот Многофункциональный многорежимный и многочастотный задающий генератор Распределенная система питания с источниками обладающими высоким КПД, с максимальной надежностью и живучестью при минимальных габаритах и весе Использование АЦП нового поколения с высоким быстродействием, что расширяет динамический диапазон системы и обеспечивая обнаружение малозаметных целей на фоне земли
Впервые примененные технические решения						

				цифровая вычислительная машина; ЛО — программное обеспечение)			
Тип РЛС	Импульсные некогерентные РЛС с низкой частотой повторения (НЧП)		Импульсные квазикогерентные РЛС с НЧП («Сапфир-25)	Импульсная когерентная РЛС с тремя режимами излучения — НЧП, СЧП, ВЧП (Н019, Н001)	Импульсная когерентная РЛС с двумя режимами излучения (ВЧП и СЧП) в режиме «воздух-воздух» и режимом НЧП с синтезированием апертуры в режиме «воздух-поверхность» Импульсная когерентная РЛС с двумя режимами излучения — ВЧП и СЧП («Заслон»)	Импульсная когерентная РЛС с двумя режимами излучения (ВЧП и СЧП) в режиме «воздух-воздух» и режимом НЧП с синтезированием апертуры в режиме «воздух-поверхность», обеспечивающим формирование радиолокационных изображений в режиме «воздух-поверхность» с высоким разрешением по углам и дальности	
Элементная база и основные компоненты РЛС и комплексов	Электронные устройства на пальчиковых лампах СВЧ-генератор на магнетроне	Лампа типа «дробь» в модульных электронных устройствах. Магнетронные генераторы		Электронные устройства в виде узлов на микросхемах с транзисторами	Созданы параметрические ряды электронных устройств с высоким уровнем функциональной интеграции в виде унифицированных модулей Низкочастотные микросхемы с высокой степенью интеграции, СВЧ-микросхемы на основе гибридной и монокристаллической технологий Твердотельные микросхемы высокой интеграции с высоким быстродействием, а также ПЛИС		
		Пальчиковые лампы в электронных блоках («Изумруд-2», «Орел», «Сокол»)		СВЧ-тракт на параметрических усилителях			
				СВЧ-генератор на пролетном клистроне			
				Электромеханические фильтры аналоговых и цифровых микросхем (логические операции) для первичной обработки сигнала			БЦВМ 101 с применением логических микросхем
							Узкополосные кварцевые фильтры для первичной обработки сигналов
							Цифровые фильтры на логических элементах для первичной и вторичной обработки сигнала и формирования режимов управления с помощью БЦВМ
							Многофункциональные двухрежимные лампы бегущей волны (ЛБВ) для передатчика с СЖО
							Твердотельные микросхемы средней интеграции со средним быстродействием, а также ПЛИС