

А.Я. САВЕЛЬЕВ
В.А. ОВЧИННИКОВ

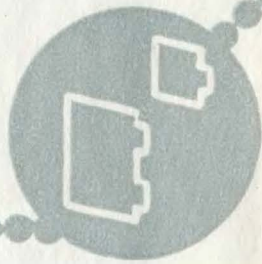
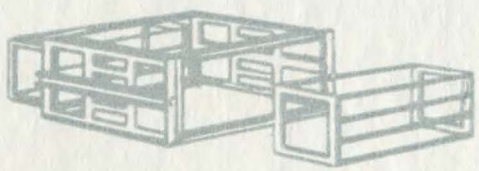
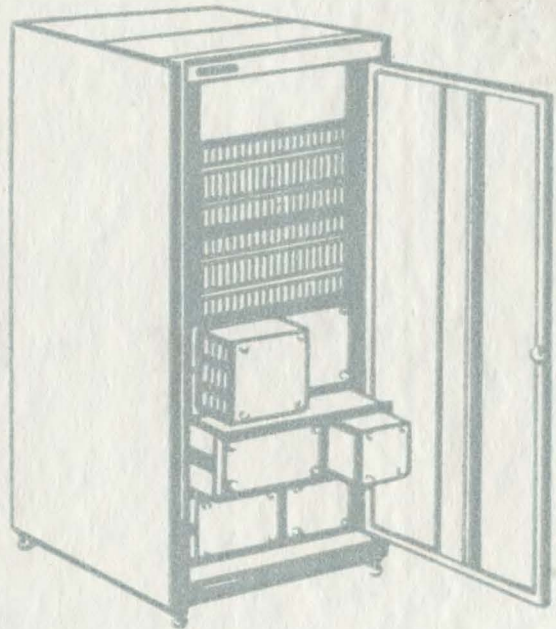
А.Я. САВЕЛЬЕВ
В.А. ОВЧИННИКОВ

А.Я. САВЕЛЬЕВ
В.А. ОВЧИННИКОВ

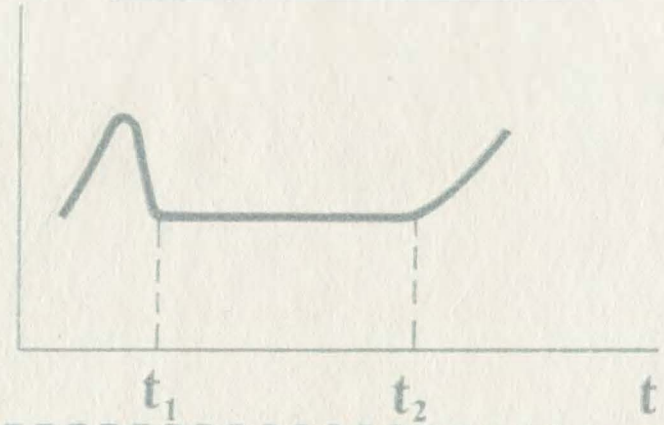
КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ И СИСТЕМ



• ВЫСШАЯ ШКОЛА •



$\lambda(t)$



$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}$$

А. Я. САВЕЛЬЕВ
В. А. ОВЧИННИКОВ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ И СИСТЕМ

Допущено
Министерством высшего
и среднего специального
образования СССР
в качестве учебника
для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Электронные вычислительные
машины»



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1984

ББК 32.973
С12
УДК 681.3

Рецензенты: проф. *А. М. Ларионов* (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики); кафедра вычислительной техники Пензенского политехнического института (зав. кафедрой проф. *Н. П. Вавкич*)

Савельев А. Я., Овчинников В. А.

С 12 Конструирование ЭВМ и систем: Учебник для техн. вузов по спец. «Электрон. выч. маш.» — М.: Высш. шк., 1984. — 248 с., ил.

В пер.: 1 р.

В книге рассмотрены вопросы создания конструкций современных ЭВМ. Большое внимание уделено геометрическому конструированию (компоновка и размещение элементов), определению паразитных влияний цепей друг на друга. Подробно обоснованы выбор и обеспечение тепловых режимов работы типовых конструкций и оценка надежности стационарных и нестационарных ЭВМ. Детально описаны стандартные задачи конструирования (компоновка, размещение и трассировка).

С $\frac{2405000000-199}{001(01)-84}$ 140—84

ББК 32.973
6Ф7.3

© Издательство «Высшая школа», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Влияние научно-технического прогресса на развитие электронно-вычислительной техники сказывается прежде всего в том, что происходит быстрая смена поколений ЭВМ. Это предъявляет повышенные требования к подготовке специалистов в области вычислительной техники. В материалах XXVI съезда КПСС указывается, что необходимо повысить технический уровень вычислительной техники, приборов и средств автоматизации на основе новейших достижений микроэлектроники, оптоэлектроники и лазерной техники. Особо отмечается необходимость широко применять при создании новых машин, оборудования, аппаратуры и приборов модульный принцип с использованием унифицированных узлов и агрегатов.

Предлагаемая читателю книга является развитием книги Б. В. Анисимова и А. Я. Савельева «Основы конструирования и производства ЭВМ», выпущенной издательством в 1972 г., с учетом последних достижений в области конструирования и технологии ЭВМ. Она предназначена в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности 0608. Содержание этой книги опирается на такие дисциплины, как «Схемотехника ЭВМ», «Теория и проектирование ЭВМ и систем», «Технология производства ЭВМ».

В гл. 1 в свете современных представлений определяются предмет, цели и задачи конструирования, описываются основные принципы конструирования модулей, ЭВМ, систем. В гл. 2 излагаются основные приемы геометрической компоновки, ставятся и решаются задачи выбора компоновочных схем и расчета размеров типовых элементов конструкции с целью сокращения потерь быстродействия из-за задержки сигналов в линиях межэлементных связей. Гл. 3 посвящена элементам конструкций модулей ЭВМ, используемых для электрических соединений, крепления и фиксации, в качестве несущих. В гл. 4 рассматривается проблема надежности стационарных ЭВМ. В гл. 5 излагаются вопросы электромагнитной совместимости и методы их решения при разработке конструкции для конкретной принципиальной электрической схемы. Описываются способы уменьшения различного рода помех, даются соотношения для расчета допустимых длин взаимодействующих линий связи. В гл. 6 описываются способы переноса тепловой энергии, формулируются основные теплофизические задачи, возникающие при конструировании модулей ЭВМ, дается методика расчета теплового режима многоблочной стойки с принудительной вентиляцией, показан пример расчета температуры корпуса интегральной схемы при жидкостном охлаждении и приводятся элементы конструкции, облег-

чающие условия теплообмена. Гл. 7 посвящена особенностям конструирования ЭВМ и систем, функционирующих в условиях интенсивных механических воздействий. Основное внимание уделено вопросам разработки конструкции, способной противостоять воздействию виброускорений. Значительная часть книги (гл. 8—11) посвящена автоматизированному проектированию. Излагаются вопросы формализации объектов и задач конструкторского проектирования (схемная компоновка, размещение и трассировка), алгоритмические методы решения этих задач, приводится ряд оригинальных моделей и алгоритмов.

Для более глубокого изучения отдельных вопросов, изложенных в учебнике, целесообразно использовать книги «Конструирование функциональных узлов ЭВМ на интегральных схемах» под ред. Б. И. Ермолаева (М., 1978), «Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры» А. П. Ненашева и Л. А. Коледова (М., 1981), «Переходные процессы в линиях связи быстродействующих схем ЭВМ» Ю. А. Чурина (М., 1975), «Автоматизация конструирования РЭА» Б. Н. Дендобренко и А. С. Малика (М., 1980), а также справочную литературу — «Справочник по конструированию ЭВМ» под ред. С. А. Майорова (М., 1975).

Все разделы книги написаны авторами совместно. Материал учебника содержит решение конкретных задач конструирования, которые поставлены в примерах, ряд вопросов выносятся в лабораторный практикум, в процессе которого студенты должны освоить методы машинного решения задач конструирования (задачи размещения, трассировки и т. д.).

Авторы выражают глубокую благодарность за большой и тщательный труд по рецензированию учебника, который позволил значительно улучшить его содержание, д-ру техн. наук, проф. А. М. Ларионову, а также коллективу кафедры вычислительной техники Пензенского политехнического института и ее заведующему д-ру техн. наук, проф. Н. П. Вашкевичу.

Замечания и пожелания читателей просьба направлять в издательство «Высшая школа» по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, изд-во «Высшая школа».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс науки и техники объективно приводит к расширению области применения ЭВМ, предъявляет к ним постоянно растущие требования. На июньском (1983 г.) Пленуме ЦК КПСС в речи Генерального секретаря партии, Председателя Президиума Верховного Совета СССР товарища Юрия Владимировича Андропова отмечалось, что предстоит осуществить автоматизацию производства, обеспечить широчайшее применение компьютеров и роботов, внедрить гибкую технологию, позволяющую быстро и эффективно перестраивать производство для изготовления новой продукции. Техничко-экономические, функциональные и структурные возможности ЭВМ и систем в значительной степени определяются конструкцией.

Конструкция ЭВМ (систем) — это совокупность электрически и механически соединенных элементов, в которой реализуется электрическая схема данной машины (системы). Исходными данными для конструктора являются электрическая схема ЭВМ и техническое задание на ее разработку. Конструктор должен определить форму, материалы, размеры конструктивного узла, способы механического и электрического соединения входящих в него элементов, обеспечения помехоустойчивости, теплового режима, защиты от внешних воздействий. Для оценки соответствия конструкции требованиям технического задания выполняются все необходимые расчеты.

Большое число разнообразных требований, которые предъявляются к конструкции ЭВМ, приводит к необходимости исследования нескольких ее вариантов, их сравнительной оценки и выбора оптимального. Следовательно, конструкторское проектирование включает синтез, анализ и оптимизацию конструкции как объекта, в котором реализована электрическая схема ЭВМ. Конструкция ЭВМ — система, состоящая из типовых сборочных единиц разных уровней иерархии.

Чтобы повысить эффективность процесса конструкторского проектирования, необходимо разработать формальное описание рангового состава конструкции и типовых сборочных единиц, знать методику их расчета, критерии для оценки соответствия типовых конструкций предъявляемым к ним требованиям, методы поиска решения.

Определение формы, взаимного расположения и способов перемещения сборочных единиц относительно друг друга является предметом задачи *геометрической компоновки*. Геометрическая компоновка должна обеспечить эксплуатационные, конструктивно-технологические требования и технические характеристики ЭВМ. Быстродействие современных ЭВМ все больше ограничивается задержками сигналов в линиях межэлементных связей. Сокращение потерь быстродействия

из-за этих задержек путем нахождения оптимальной геометрии конструкции — одна из основных целей геометрической компоновки.

Повышение уровня интеграции элементной базы ставит перед конструктором серьезные проблемы, основными из которых являются обеспечение достаточной повторяемости схемного содержания смесных конструктивных единиц и высокой плотности электро монтажа. Возрастает объем задач схемно-топологического конструирования, в том числе схемной компоновки, и важность методов проектирования соединений на многослойных печатных платах.


Конструктивная реализация межэлементных соединений в виде различного рода линий связи приводит к искажению сигналов и появлению помех из-за возникновения паразитных параметров. Искажения сигналов и уровни помех возрастают с увеличением плотности упаковки и монтажа. При проектировании электрических соединений элементов принципиальных схем необходимо обеспечить допустимые искажения сигналов и требуемую помехоустойчивость.

Повышение удельной мощности рассеяния активных элементов и плотности их упаковки предъявляет новые требования к системам охлаждения ЭВМ, которые являются составной частью ее конструкции. Чтобы обеспечить необходимые температурные условия работы элементов ЭВМ, используются системы принудительного воздушного, воздушно-жидкостного и жидкостного охлаждения, развиваются методы их расчета и конструирования.

Этап конструкторского проектирования характеризуется значительной трудоемкостью. Одним из основных средств снижения трудоемкости, сроков и стоимости конструирования и повышения его качества является автоматизация. В настоящее время в конструировании ЭВМ определился ряд задач—схемная компоновка, размещение, трассировка, выпуск технической документации, которые поддаются формализации и автоматизированному решению. Для формализации объектов и задач схемно-топологического конструирования используется аппарат теории множеств, математической логики и теории графов.

Процесс создания современных ЭВМ в значительной мере автоматизирован — выпуск конструкторской документации осуществляется с помощью средств вычислительной техники. Изменились и функции конструктора-разработчика типовых конструкций ЭВМ: он должен знать основные принципы работы элементов, составляющих вычислительную машину, уметь выбирать конструктивные решения из множества возможных вариантов путем оценки тепловых режимов работы, расчета надежности, паразитных связей и т. д. Это предопределяет необходимость использования большой справочной информации, которая обеспечивается с помощью ЭВМ, и умение разрабатывать предварительные варианты компоновки.

Таким образом конструирование — сложный и многообразный процесс. Поэтому конструктор кроме хорошо развитого пространственного воображения должен уметь одновременно учитывать множество самых разнообразных требований к конструкциям отдельных частей и машины в целом и использовать все то лучшее, что накоплено в процессе предшествующих работ.

$$K_{\text{повт}} = \left(1 - \frac{S \cdot m}{M}\right) \cdot 100\%$$


ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭВМ И СИСТЕМ

§ 1.1. ЭТАПЫ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Конструирование является одним из основных видов процесса проектирования ЭВМ и заключается в физическом воплощении принятых схемотехнических решений. От успешного решения задач конструирования зависят такие характеристики ЭВМ, как быстродействие, надежность, объем, вес, технологичность, удобство эксплуатации. Качество разработанной конструкции определяется степенью соответствия ее техническим требованиям. Неудачные конструкторские решения могут привести, например, к невозможности обеспечения работоспособности ЭВМ из-за несоблюдения теплового режима или к значительному снижению быстродействия.

Конструктор принимает участие в выполнении всех этапов процесса проектирования ЭВМ. Стадии разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности и этапы выполнения работ регламентирует ГОСТ 2.103—68. Этапы разработки конструкторской документации следующие: техническое задание — техническое предложение — эскизный проект — технический проект — разработка рабочей документации.

Техническое задание. Требования к техническому заданию (ТЗ) устанавливает ГОСТ 15.001—73. *Техническое задание* — это документ, в котором указывается: основное назначение, технические и тактико-технические характеристики, показатели качества, в том числе надежности, технико-экономические требования, необходимые стадии разработки конструкторской документации и ее состав, состав ЭВМ или системы.

В общих технических требованиях задаются условия эксплуатации, хранения и транспортировки, в частных — основные структурные, программные и другие технические характеристики (форма и точность представления информации, скорость ее преобразования, объем и быстродействие запоминающих устройств, максимальная потребляемая мощность и т. п.). В конструктивных требованиях указываются масса, габариты, требования к элементной базе, модульности и технологичности конструкции, к типоразмерам, уровню унификации, эргономике и технической эстетике, технике безопасности и т. д.

На основе общего технического задания могут составляться ТЗ на отдельные устройства, в которых уточняются соответствующие характеристики.

Техническое предложение. Совокупность конструкторских документов, содержащих технические и технико-экономические обоснова-

ния целесообразности разработки документации изделия, является *техническим предложением*. Обоснование делается по результатам анализа ТЗ и вариантов возможных решений изделия, сравнительной оценки этих решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Техническое предложение разрабатывается по ГОСТ 2.118—73, если это предусмотрено ТЗ, при этом могут определяться дополнительные или уточненные требования к изделию на основе необходимой конструкторской проработки вариантов изделия.

Эскизный проект. Комплекс конструкторских документов, содержащий принципиальные конструктивные решения и дающий общие представления об устройстве и принципе работы изделия, составляет *эскизный проект*. Основание для разработки эскизного проекта — ТЗ или протокол рассмотрения технического предложения. Требования к эскизному проекту устанавливает ГОСТ 2.119—73.

Технический проект. Совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, представляет собой *технический проект*. Объем работ на стадии технического проектирования определяет ГОСТ 2.120—73. Технический проект разрабатывают, если это предусмотрено предшествующими стадиями. После завершения каждой стадии разработки составляется перечень работ, которые необходимо выполнить на следующем этапе.

При разработке технического предложения и эскизного проекта подготавливают варианты изделия, которые сравнивают по показателям качества, и выбирают оптимальный. На стадии эскизного проектирования принимают принципиальные конструктивные и схемные решения изделия, определяют не установленные ранее технико-экономические показатели, выявляют новые изделия и материалы, которые должны быть разработаны другими предприятиями, прорабатывают вопросы технологии изготовления.

На этапе технического проектирования определяется конструкция изделия и его составных частей; выполняются все необходимые расчеты, подтверждающие показатели, установленные ТЗ; разрабатываются принципиальные схемы, технические решения, обеспечивающие требуемые показатели надежности; анализируется конструкция на технологичность с учетом условий конкретного предприятия-изготовителя.

На всех стадиях разработки, начиная с технического предложения, изделие проверяется на патентную чистоту и конкурентоспособность, оценивается его соответствие требованиям экономики, технической эстетики, техники безопасности и производственной санитарии, оформляются заявки на изобретения. На каждой из этих стадий возможно изготовление макетов, если это необходимо для сравнительной оценки, проверки принципов работы изделий, а также принятых конструктивных и схемных решений.

После выполнения каждого из рассмотренных этапов копии документов комплектуются по ГОСТ 2.106 —68 в техническое предложение, эскизный или технический проект и представляются заказчику на рассмотрение, согласование и утверждение (документам присваива-

ются соответственно литеры «П», «Э» и «Т»). В комплект включают документы в соответствии с ГОСТ 2.102—68, предусмотренные предшествующими стадиями разработки.

Разработка рабочей документации. Разработка документации проводится по ГОСТ 2.103—68 для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), установочных серий и установившегося серийного или массового производства. По результатам изготовления и заводских испытаний опытного образца выполняется корректировка конструкторских документов, которым присваивается литера «О». После проведения государственных, межведомственных, приемочных и других испытаний конструкторские документы могут вновь корректироваться с присвоением им литеры «О₁», при последующих изготовлении и испытаниях — соответственно литер «О₂», «О₃» и т. д.

Изготовление и испытание установочной серии происходит по рабочей документации установочных серий. Конструкторские документы корректируют по результатам изготовления, испытания и оснащения технологического процесса ведущих составных частей изделия. Документам присваивается литера «А».

По рабочей документации установившегося серийного или массового производства изготавливается и испытывается головная (контрольная) серия, после чего возможна корректировка конструкторских документов. После окончательной отработки и проверки в производстве изделий по зафиксированному и полностью оснащеному технологическому процессу конструкторским документам присваивается литера «Б».

При разработке конструкции элементов, узлов и устройств можно выделить две основные самостоятельные задачи: проектирование сборочных единиц как средств механического и электрического объединения входящих в них деталей и схемно-топологическое конструирование. Задачи схемно-топологического конструирования — определение схемного содержания конструктивных узлов, размещение их в монтажном пространстве, разработка связей между ними — решаются после разработки функциональных схем. Однако использование в современных ЭВМ однотипных и унифицированных элементов (типовых конструкций) позволяет совмещать проектирование функциональных и принципиальных схем с разработкой конструкции. Например, разработка конструкции блока или рамы может выполняться одновременно с разработкой электрических функциональных и принципиальных схем. На рис. 1.1 это отражено распараллеливанием процесса проектирования. Решения задач схемно-топологического конструирования

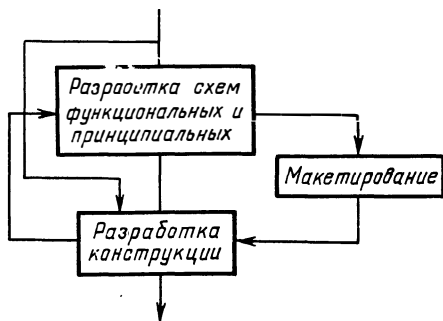


Рис. 1.1. Распараллеливание разработки типовой конструкции

могут вносить коррективы в функциональные и принципиальные схемы, что на схеме проиллюстрировано обратной связью.

Технологичность конструкции в значительной степени определяется принятыми разработчиком решениями. Конструктор должен хорошо разбираться в вопросах производства ЭВМ и участвовать в разработке технологии изготовления всех составляющих машину устройств. Разработка конструкции ЭВМ проводится с учетом требований схемотехники, технологии, монтажа и наладки. Это позволяет учитывать схемотехнические требования, получать конструкцию с высокими технологическими характеристиками и рациональным монтажом, обеспечить удобство наладки и эксплуатации.

§ 1.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭВМ И СИСТЕМ

В процессе развития электронной вычислительной техники сформировались два основных принципа конструирования: одноуровневый и многоуровневый. Выбор принципа конструирования определяется возможностями технологии обеспечить необходимый уровень интеграции аппаратуры и экономическими факторами (стоимость проектирования, изготовления и эксплуатации).

Одноуровневый принцип конструирования заключается в том, что вся принципиальная электрическая схема ЭВМ реализуется на одной плате, в идеале на одной подложке (машина — плата). Выход из строя одного элемента приводит к отказу всей машины. Работоспособность ЭВМ может быть обеспечена введением аппаратурной и информационной избыточности. В настоящее время этот принцип применим для конструирования ЭВМ невысокой сложности при их крупносерийном или массовом производстве. Основные достоинства этого принципа: обеспечение максимальной надежности (отсутствие или минимальное количество внешних соединений) и минимальная потеря быстродействия из-за задержек сигналов в линиях связи. С развитием технологии, усовершенствованием методов проектирования и увеличением потребности народного хозяйства в средствах вычислительной техники этот принцип будет находить более широкое применение.

Многоуровневый принцип конструирования. Конструкция ЭВМ состоит из типовых сборочных единиц, разбитых на несколько уровней. Под *типовой сборочной единицей* или *типовой конструкцией* понимается любой узел ЭВМ, который по конструктивному оформлению и технологии производства является самостоятельным и имеет стандартные средства электрического и механического сопряжения.

Уменьшение стоимости и увеличение надежности любых изделий возможно лишь при их массовом или крупносерийном производстве. Крупносерийное производство создает условия для использования прецизионного автоматизированного оборудования высокой производительности; прогрессивных технологических процессов обработки деталей, сборки и электрического монтажа; эффективных методов вход-

ного контроля изделий, поступающих со стороны, контроля и испытаний изделий на завершающей стадии производства.

Производство ЭВМ как высшего, так и среднего классов — мелкосерийно. Это, однако, не характеризует производство узлов и деталей, входящих в состав этих машин, как мелкосерийное. Определяющими факторами в оценке серийности производства узлов и деталей конструкции ЭВМ являются конструктивно-технологические особенности ЭВМ, достигнутый уровень унификации узлов и деталей и специализация их производства. Многоуровневый принцип конструирования ЭВМ дает возможность организовать производство типовых конструкций по независимым циклам, т. е. обеспечивает специализацию их производства.

Унификация конструктивных модулей идет по двум основным направлениям: конструктивно-технологическому и схемному. Построение конструкции ЭВМ из типовых сборочных единиц позволяет достичь высокой конструктивно-технологической унификации и стандартизации узлов и деталей проектируемой ЭВМ (размеры, методы обеспечения теплового режима и защиты от внешних воздействий, способы выполнения электрических и механических соединений, технология изготовления и технологическое оборудование, стендовая контрольно-испытательная аппаратура).

Параметры восстановления работоспособности ЭВМ в значительной степени зависят от ремонтпригодности конструкций. Высокая ремонтпригодность конструкции при многоуровневом принципе обеспечивается наличием в ее составе сменной единицы — типового элемента замены (ТЭЗ).

Объективной тенденцией развития элементной базы является повышение уровня интеграции, это приводит к снижению уровня схемной, т. е. функционально-логической унификации. Снижение уровня схемной унификации ведет, в свою очередь, к увеличению стоимости и сроков проектирования и изготовления аппаратуры, расширяет номенклатуру ТЭЗ, что повышает стоимость эксплуатации, снижает ремонтпригодность аппаратуры, поэтому следует выделить *функционально-узловой метод* конструирования ЭВМ, который заключается в разбиении общей электрической схемы машины на функционально-законченные части разной степени сложности с учетом требований по обеспечению высокого уровня схемной унификации и оформлению их в виде типовых сборочных единиц. Разбиение схемы ЭВМ на функционально-законченные части обеспечивает независимость электрической проверки схем типовых конструкций, создает предпосылки для построения достаточно простой системы контроля работы машины и локализации отказов, упрощает стендовую контрольно-испытательную аппаратуру.

Таким образом, многоуровневый принцип в сочетании с функционально-узловым методом конструирования позволяет сократить сроки проектирования; снизить стоимость проектирования, производства и эксплуатации; изготавливать типовые конструкции по независимым циклам; достичь высокой степени унификации и стандартизации узлов и деталей проектируемой ЭВМ; автоматизировать и механизировать

процессы изготовления и сборки деталей, контроля и ремонта типовых элементов замены.

При разработке проекта новой машины главная задача состоит в создании конструкции, обеспечивающей параметры ЭВМ, записанные в ТЗ, с учетом возможности изготовления этой конструкции в определенных производственных условиях, в возможно короткие сроки и при минимальных затратах.

Наиболее существенными, с точки зрения конструктора, тенденциями в развитии ЭВМ являются: рост сложности аппаратуры и плотности ее компоновки, повышение быстродействия элементной базы и уровня ее интеграции, снижение относительных габаритов активных элементов и энергетического уровня информационных сигналов, увеличение выделяемой удельной мощности активных элементов и потерь быстродействия из-за задержек сигналов в линиях межэлементных связей. Поэтому конструирование должно обеспечить: заданное быстродействие (габариты ЭВМ влияют на скорость ее работы); уровни помех меньше допустимых; требуемую или максимальную надежность при минимальной или заданной стоимости; тепловые режимы конструкции; способность конструкции противостоять внешним воздействиям.

Исходными данными для конструктора служат электрические схемы ЭВМ (функциональные или принципиальные) и техническое задание. Содержание этапа конструирования заключается в разбиении схемы ЭВМ на узлы разных уровней сложности и оформлении их в виде сборочных единиц. При проектировании конструктивных узлов как средств механического и электрического объединения входящих элементов можно выделить следующие задачи: выбор пространственной геометрии и компоновочной схемы; определение геометрических размеров типовых сборочных единиц; разработка деталей и сборочных единиц в целом.

При решении этих задач прорабатываются вопросы минимизации потерь быстродействия из-за конечной скорости распространения сигналов, обеспечения помехоустойчивости, надежности и механической прочности; определяются способы отвода тепловой энергии, методы защиты от внешних воздействий (механических, климатических, различного рода излучений), монтажная область конструктивного узла. Под *монтажной областью* понимается метрическое пространство, в котором размещаются конструктивные элементы, входящие в данный узел, и осуществляется их межконтактное соединение. Для монтажной области рассчитываются ее геометрические размеры, координаты мест расположения конструктивных модулей и полей их контактов. Задача определения содержания конструктивных узлов называется схемной *компоновкой*, она заключается в определении оптимального количественного состава конструктивных модулей и распределении схемы по ним. Цель задачи схемной компоновки — обеспечить высокую ремонтпригодность машины, унифицировать функциональные узлы в пределах одной или нескольких моделей ЭВМ, определить наименьшую сменную единицу — типовой элемент замены (ТЭЗ): от повторяемости ТЭЗ зависит уровень схемной унификации, ремонтпригодность машины, стоимость разработки, производства и эксплуа-

тации. Типовой элемент замены оформляется в виде легкоъемной сборочной единицы, его схемное содержание должно быть по возможности логически законченным и обеспечивать независимость электрической проверки. При формировании системы ТЭЗ должны учитываться следующие требования: высокий коэффициент повторяемости ТЭЗ или минимальное количество их типов; минимальное число внешних выводов ТЭЗ.

Эти требования противоречивы, что наглядно видно из рис. 1.2, на котором показаны зависимости числа внешних выводов N функционального узла, приходящихся на одну микросхему, и коэффициента его повторяемости $K_{повт} = (1 - Sm/M) 100\%$ от количества микросхем m в нем (здесь M — число микросхем в схеме, которая разбивается на функциональные узлы, S — количество типов функциональных узлов).

Конструирование узла завершается разработкой его топологии: в монтажной области конструктивного узла размещаются элементы и связи между ними. При этом должны быть учтены вопросы быстродействия, помехоустойчивости, теплового режима, надежности и особенности конкретной технологии производства конструктивных модулей.

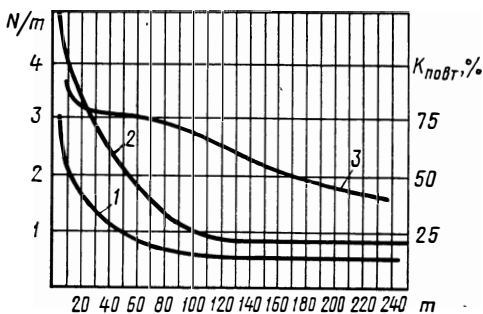


Рис. 1.2. Зависимости относительного числа выводов функционального узла по данным фирмы «IBM» (2), по результатам исследования отечественных схем на ИС серии 155 (1) и коэффициента его повторяемости (3) от числа микросхем в нем

§ 1.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНСТРУКЦИИ ЭВМ И СИСТЕМ

Конструктивное деление ЭВМ обладает иерархией, подобной иерархии функционального деления. Однако конструктивная иерархия определяется по принципу конструктивной законченности и в общем случае может не совпадать с функциональной. На рис. 1.3 показана общая схема конструктивной иерархии ЭВМ. В скобках указаны варианты названия (конструктивного исполнения) модуля данного ранга, который состоит из целого числа типовых конструкций предыдущего уровня и является конструктивно законченным. Геометрические размеры типовых конструкций должны обеспечивать принцип входимости модуля низшего уровня в модуль следующего ранга.

Нулевой уровень конструктивной иерархии составляют исходные схемотехнические компоненты (микросхемы различной степени интеграции и электрорадиоэлементы), для которых характерна конструктивная и техническая неделимость. Современные схемотехнические компоненты разрабатываются в виде элементов единых размерно-параметрических рядов в отношении номиналов, допусков, мощностей рассеивания и геометрических размеров корпусов радиоэлементов и

микросхем, что обеспечивает высокий уровень их унификации и стандартизации.

Типовые конструкции первого уровня иерархии (ячейки, субблоки) конструктивно объединяют на одной или нескольких печатных платах исходные схемотехнические компоненты, содержащие от десятков до сотен микросхем. Пример конструкции одноплатного субблока показан на рис. 1.4,а.

Ко второму уровню иерархии относится кассета, в которой на рамочной несущей конструкции объединяются две (или более) ячейки — субблоки. Кассета, как правило, используется для обеспечения функциональ-

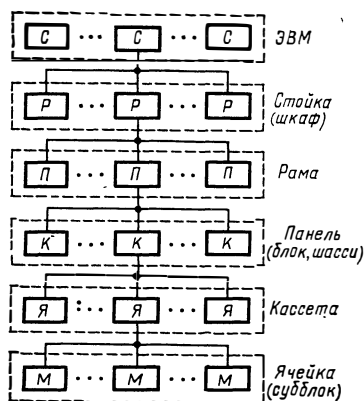


Рис. 1.3. Схема конструктивной иерархии ЭВМ {М — микросхема [ИС, СИС, ВИС], электрорадиоэлемент}

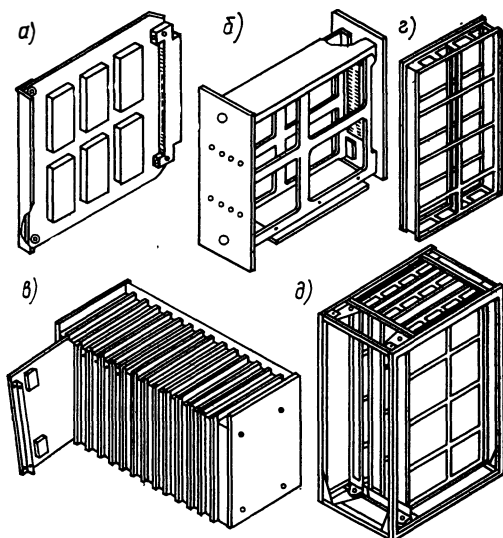


Рис. 1.4. Внешний вид одноплатного субблока (а), кассеты (б), блока (в), рамы (г) и трехрамной стойки (д)

ной законченности реализованной в ней схемы. Один из вариантов конструкции кассеты приведен на рис. 1.4,б.

Типовая конструкция третьего уровня (блок, панель, шасси) выполняется в виде сварного или сборного каркаса, в котором осуществляется механическое крепление и электрическое соединение ячеек или кассет. Пример блока разъемной конструкции дан на рис. 1.4,в.

Модули четвертого и пятого уровня иерархии (рама и стойка) представляют собой сварной или сборный каркас для конструктивного объединения панелей, блоков или непосредственно типовых конструкций первого уровня (субблоков, ячеек) в зависимости от варианта конструктивной иерархии, выбранного для данной ЭВМ. Конструкции рамы и трехрамной стойки показаны на рис. 1.4,г и д.

В универсальных ЭВМ в качестве ТЭЗ используется типовая конструкция первого уровня, например, в ЕС и СМ ЭВМ. В специализированных ЭВМ, в связи со специфическими требованиями к надежности,

ТЭЗ обычно является типовой конструкцией более высокого уровня (кассета или блок).

На рис. 1.5 приведена схема конструкции ЭВМ как n -уровневой иерархической системы. Каждому рангу конструкции ставится в соответствие уровень иерархии, а каждой типовой конструкции данного ранга — подсистема уровня. Формальное описание структуры конструкции ЭВМ имеет вид:

$$I_i^{i+1, j} \subset I_i;$$

$$I_i^{i+1, j} \cap I_i^{i+1, K} = \emptyset \text{ для } j \neq K (j, K \in I_{i+1});$$

$$\bigcup_{j \in I_{i+1}} I_i^{i+1, j} = I_i.$$

Здесь $i = 0, 1, 2, \dots, n$ — уровень иерархии; $I_i^{i+1, j} = \{M_i^j\}$, ($j \in I_{i+1}$); M_i^j — множество типовых конструкций i -го уровня, входящих в j -й типовой элемент конструкции $i+1$ -го уровня; $I_i = \{M_i\}$ — множество индексов-идентификаторов, поставленных в соответствие типовым конструкциям i -го уровня; M_i — множество типовых конструкций, составляющих i -й уровень иерархии.

Большое количество разнообразных требований, которым должна удовлетворять разрабатываемая конструкция, приводит к необходимости исследования нескольких вариантов ее исполнения.

Иерархический принцип построения конструкции позволяет вести проектирование типовых конструкций по каждому уровню иерархии независимо, оптимизируя типовые конструкции текущего ранга по своим частным критериям качества на том основании, что при переходе к более высокому рангу влияние отклонений, допущенных на предыдущих, от оптимального решения резко снижается. Однако так как параметры типовых конструкций текущего уровня зависят от результатов, полученных на предыдущих, задачу конструирования ЭВМ в целом необходимо решать с учетом взаимных связей всех типовых конструкций различных уровней.

Задачи определения схемного содержания типовой конструкции и оформления ее в виде сборочной единицы в значительной степени самостоятельны, но между ними существует определенная связь. Например, полученный при схемной компоновке оптимальный состав модуля может оказаться технически нереализуемым из-за невозможности выполнения трассировки на заданном геометрическом поле, по которому определялись характеристики варианта при компоновке. Изменение

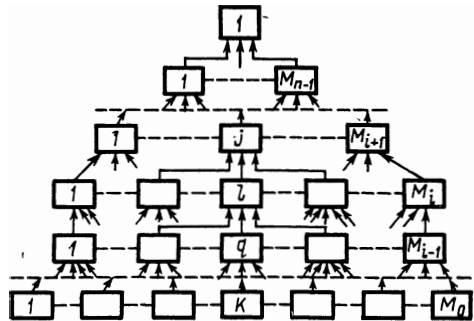
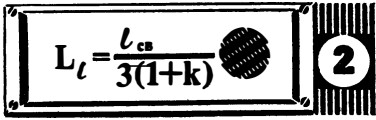


Рис. 1.5. Схема конструкции ЭВМ как n -уровневой иерархической системы

геометрического поля потребует возврата к задаче компоновки для оценки оптимальности варианта. Следовательно, поиск оптимального варианта типовой конструкции текущего ранга является итерационным процессом.

Конструкция ЭВМ должна удовлетворять требованиям ТЗ и определенным технико-экономическим параметрам. В связи с этим эффективность конструкции ЭВМ является многомерным вектором в пространстве обобщенных показателей качества. Иерархический принцип построения конструкции ЭВМ приводит к тому, что выбор оптимального модуля данного уровня оказывается подчиненным конструкциям следующего более высокого уровня. Поэтому возникает задача распределения количественных значений показателей качества на типовые конструкции всех уровней иерархии исходя из заданных значений этих показателей на ЭВМ в целом. Задача нормировки показателей обычно решается с помощью аппарата теории исследования операций. Определение оптимальных значений показателей качества типовых конструкций происходит сверху вниз по иерархической лестнице, а оптимальных параметров типовых конструкций — снизу вверх методом последовательного приближения.

Таким образом, основными свойствами конструкции ЭВМ как n -уровневой иерархической системы являются: возможность поиска в каждом уровне иерархии оптимального варианта типовой конструкции по своим локальным критериям качества; существование глобального критерия для всей системы в целом, который должен учитывать основные показатели ЭВМ, зависящие от конструкции; возможность итерационного поиска оптимального варианта типовых конструкций внутри рангов и между ними; осуществление связи между уровнями иерархии путем передачи обобщенной информации (функционалов, обобщенных показателей), а между подсистемами одного уровня — через информационные потоки о параметрах типовых конструкций.



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КОМПОНОВКА ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭВМ И СИСТЕМ

§ 2.1. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТИПОВЫМ КОНСТРУКЦИЯМ ЭВМ И СИСТЕМ

Кроме требований, перечисленных в ТЗ, разрабатываемые типовые конструкции должны удовлетворять конструктивно-технологическим и эксплуатационным требованиям.

К конструктивно-технологическим требованиям относятся: обеспечение возможности отдельного производства и контроля типовых конструкций; стремление к минимальной номенклатуре принятых изделий, крепежных деталей и материалов, которые должны быть, как правило, отечественного производства и соответствовать требованиям ГОСТов и нормалей; обеспечение серийного производства элементов типовых конструкций; использование прогрессивных методов изготовления типовых конструкций и высокая степень готовности их к внедрению в серийное производство; оформление одной из типовых конструкций (субблока, кассеты или блока) в виде легкокосяемой сборочной единицы; обеспечение быстрой замены неисправных узлов и деталей; предусмотрение мер защиты от разрушающего воздействия внешней среды (покрытие, пропитка, герметизация и т. п.); предотвращение неправильной установки и включения типовых конструкций; обеспечение минимальных габаритов и веса; соответствие состава комплекта конструкторской документации условиям приема и сдачи заказчику.

К эксплуатационным требованиям относятся: возможность обслуживания всех устройств машины персоналом соответствующей квалификации; удобный доступ ко всем частям машины, требующим регулировки или замены в процессе эксплуатации; предусмотрение различных мер обнаружения и сигнализации аварийных режимов работы; наличие специальных элементов для фиксации типовых конструкций в положении, удобном для осмотра и проверки, контрольных точек для подсоединения измерительной аппаратуры при настройке и контроле работы машины, аппаратуры, обеспечивающей профилактический контроль и наладку типовых конструкций; возможность установки типовых конструкций для контроля и ремонта на рабочем столе без повреждения схмотехнических компонентов и монтажа последних с применением при необходимости вспомогательной технологической оснастки.

§ 2.2. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ КОНСТРУКЦИЙ ЭВМ И СИСТЕМ

Вид конструкции ЭВМ определяется количеством уровней иерархии типовых модулей и их геометрической компоновкой. *Геометрическая компоновка* — это выбор формы, размеров, взаимного расположения типовых конструкций и способа их перемещения относительно друг друга. Цель геометрической компоновки — обеспечение технических характеристик ЭВМ, а также удовлетворение эксплуатационных и конструктивно-технологических требований.

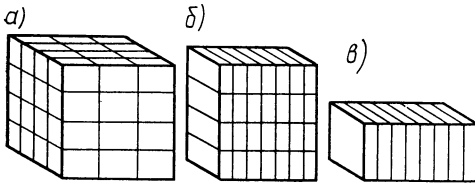


Рис. 2.1. Многомерные (а, б) и одномерная (в) схемы компоновки

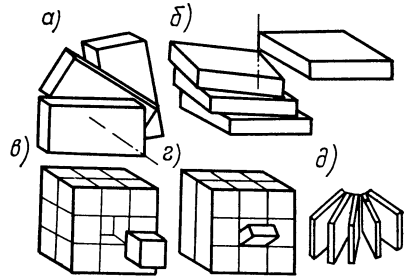


Рис. 2.2. Схема конструкции с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осями разворота, с выдвигающимися (в) и откидными (г) модулями и раскрытие типовых конструкций (д)

Основной технической характеристикой, которая должна быть обеспечена при геометрической компоновке, является заданное быстродействие. Быстродействие ЭВМ ограничивается не только задержками в элементах преобразования информации, но и конечной скоростью распространения сигналов в линиях связи этих элементов. Геометрическая компоновка должна обеспечивать оптимизацию критерия, снижающего потери быстродействия из-за задержек сигналов в линиях связи. На различных этапах разработки конструкции в качестве критерия могут быть использованы такие показатели, как минимум суммарного расстояния между всеми взаимосвязанными элементами, минимум длины линии связи, время прохождения сигнала по которой определяет длительность выполнения операции, или минимум расстояния между наиболее удаленными точками (элементами) конструкции. При геометрической компоновке типовой конструкции практически можно использовать только последний показатель.

Задача отыскания оптимальной формы типовой конструкции ставится следующим образом: найти плоскую фигуру заданной площади, ограниченную замкнутой кривой минимального периметра, или пространственную фигуру заданного объема, ограниченную замкнутой поверхностью минимальной площади. Площадь, или объем типовой конструкции, зависят от количества оборудования, которое необходимо в ней разместить. Типовые конструкции, входящие в данную, рассматрива-

ются как материальные точки. Искомыми фигурами являются круг и шар, которые теоретически обеспечивают минимум внешних элементов и их равноудаленность от центра.

Сферическая и цилиндрическая формы типовой конструкции не удовлетворяют указанным в § 2.1 требованиям и не обеспечивают высокой плотности упаковки, т. е. эффективного использования объема типовой конструкции следующего уровня. В связи с этим типовые конструкции рекомендуется разрабатывать в форме прямоугольного параллелепипеда. Отметим, что переход от круга к квадрату при усло-

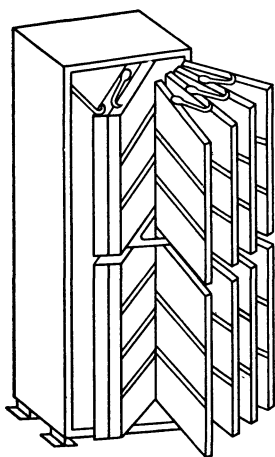


Рис. 2.3. Книжная конструкция стойки с вертикальной осью раскрытия

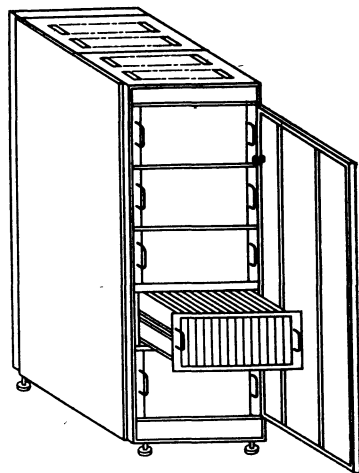


Рис. 2.4. Шкаф с выдвижными блоками

вию равенства их площадей приводит к увеличению длины максимальной линии связи в среднем на 25 %.

Под *компоновочной схемой* понимается взаимное расположение типовых конструкций. В стойке типовые конструкции могут повторяться в трех или двух главных геометрических направлениях, как показано на рис. 2.1, а, б. Для типовых конструкций остальных рангов характерна компоновочная схема, в которой модули повторяются в одном или двух направлениях. Одномерная компоновочная схема изображена на рис. 2.1, в.

Для удобства доступа к элементам, требующим регулировки, ремонта и замены в процессе эксплуатации, используются следующие способы перемещения типовых конструкций: разворот (веревная конструкция), выдвигание или откидывание и раскрытие (книжная конструкция) (рис. 2.2, а—д). Книжная конструкция стойки с вертикальной осью раскрытия рам и шкаф с выдвижными блоками показаны на рис. 2.3 и 2.4 соответственно.

Компоновка комплекса стоек стационарной ЭВМ может выполняться в объеме прямого круглого цилиндра. На практике применяют две основные компоновочные схемы: «крест» и «звезда». Внутренняя область R используется для прокладки межстоечных связей. Внешний вид комплекса стоек, скомпонованных по схемам «крест» и «звезда», схематично изображен соответственно на рис. 2.5, а, б.

При выборе формы нестационарной ЭВМ необходимо учитывать требование максимального использования объема контейнера, в котором она устанавливается. В этом случае целесообразны конструкции сферической или цилиндрической формы. На рис. 2.6 показана компоновка многогранной стойки книжной конструкции в объеме цилиндра

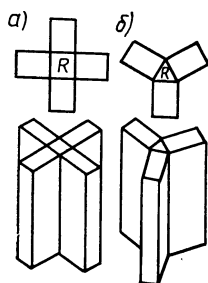


Рис. 2.5. Компоновка стоек по схеме «крест» (а), «звезда» (б) и их внешний вид

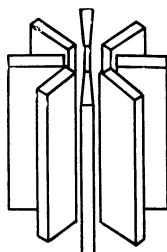


Рис. 2.6. Компоновка многогранной стойки в объеме цилиндрического контейнера

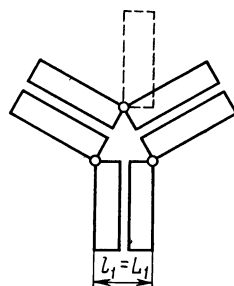


Рис. 2.7. Компоновка многогранной стойки по схеме «звезда» с внешними осями разворота рам в крыле

рического контейнера. В стойке, имеющей форму прямого круглого цилиндра, компоновка рам может быть выполнена по схеме «крест» или «звезда». При двухрамном крыле стойки внешние оси подвески рам обеспечивают лучшее использование объема контейнера.

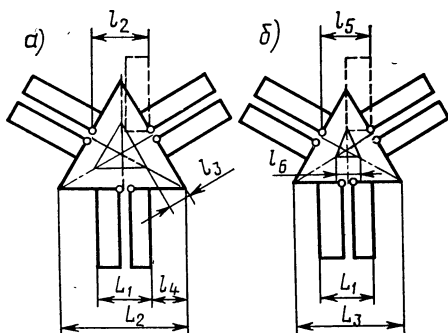


Рис. 2.8. Компоновка многогранной стойки по схеме «звезда» с внутренними осями разворота рам

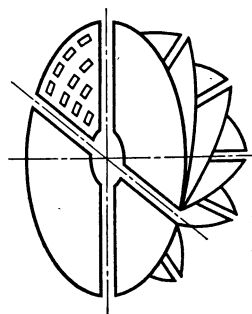


Рис. 2.9. Компоновка субблоков в объеме полусферы

На рис. 2.7 представлен вариант компоновки стойки по схеме «звезда» с внешними осями разворота рам в крыле. Жгуты межрамных соединений проходят в области оси подвески рам. Область монтажа (ответные части разъемов) располагается на наружной стороне рамы. Разворот рам при внешних осях не требует увеличения расстояния между ними. Максимальное расстояние между жгутами крыльев l_1 равно

длине стороны основания призмы ($l_1 = L_1$). Для обеспечения области межрамных связей при развороте рам с внутренними осями подвески необходимо увеличивать расстояние между крыльями стойки. На рис. 2.8,а изображена компоновочная схема стойки с внутренними осями разворота рам в крыле, причем рамы устанавливаются на таком расстоянии, что при их раскрытии длина стороны основания призмы межрамных связей равна L_1 , как и в случае внешних осей разворота. Такая компоновка приведет к увеличению длины межрамных связей. Длина

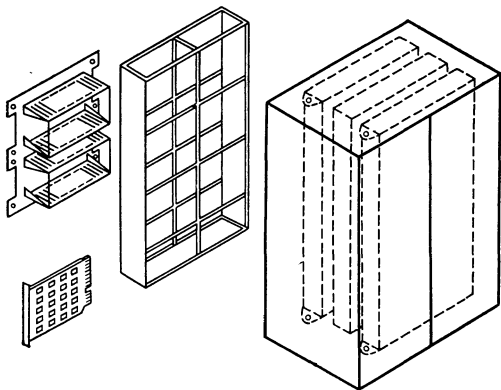


Рис. 2.10. Конструктивный состав ЕС ЭВМ

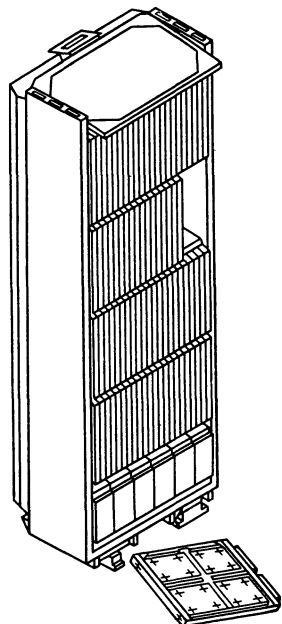


Рис. 2.11. Система типовых конструкций средних ЭВМ

стороны основания призмы (рис. 2.8,а), по боковым граням которой устанавливаются крылья, $L_2 = L_1 + 2l_4$, где $l_4 = l_3 \operatorname{tg}60^\circ$; $l_3 = 0,5 \times L_1 \cos 30^\circ$. Отсюда $L_2 = 2,5L_1$. Далее нетрудно оценить расстояние между жгутами $l_2 = 0,5L_2$ и окончательно $l_2 = 1,25L_1$, что превышает величину l_1 .

Разворот рам при внутренних осях подвески может быть обеспечен без увеличения расстояния между жгутами за счет уменьшения площади основания призмы межрамных связей, как показано на рис. 2.8,б. Для этой схемы расстояние между жгутами $l_5 = L_1$, а стороны оснований внутренней и внешней призм соответственно равны $l_6 = 0,5L_1$ и $L_3 = 2L_1$.

На рис. 2.9 схематично изображена конструкция нестационарной ЭВМ, предназначенной для установки в контейнер, имеющий форму полусферы. Соединения между платами могут выполняться как по внешней, так и по их радиальным сторонам. Подвод питания осуществляется в центральной полусфере.

Количество уровней конструктивной иерархии ЭВМ зависит от ее сложности, назначения и степени интеграции используемой элементной базы. На рис. 2.10 показан конструктивный состав ЕС ЭВМ. В общем случае применяют следующие конструктивные модули: типовой элемент замены (ТЭЗ), панель, раму, трехрамную стойку. В ЭВМ со сравнительно небольшим количеством оборудования число уровней типовых конструкций сокращается. На рис. 2.11 изображена система типовых конструкций, в которую входят субблок и стойка. Субблоки в стойке компонуются в несколько рядов по двум главным геометрическим направлениям.

К бортовым специализированным ЭВМ предъявляются повышенные требования по надежности, что приводит к необходимости уменьшения числа разъемных и неразъемных соединений между типовыми конструкциями. Объем оборудования у таких ЭВМ значительно меньше, чем у машин универсального назначения. Количество уровней конструктивной иерархии в бортовых ЭВМ невелико. Варианты типовых конструкций бортовых ЭВМ рассмотрены в гл. 7.

§ 2.3. ВЫБОР КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ И РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭВМ И СИСТЕМ

Одна из проблем, которые решаются при разработке конструкций ЭВМ, — сокращение потерь быстродействия из-за конечной скорости распространения сигналов по линиям межэлементных связей. Общая задержка сигналов при преобразовании информации складывается из задержек сигналов $t_{з.л.э}$ в логических элементах и времени распространения сигналов $t_{з.л.с}$ в линиях связи, т. е.

$$T_{з} = f(t_{з.л.э}, t_{з.л.с}).$$

При скорости распространения сигнала $v = 15 \div 20$ см/нс по линии связи межэлементная связь длиной 30 см дает задержку сигнала в 1,5—2 нс, что сопоставимо с задержкой быстродействующего логического элемента. Реальные потери быстродействия из-за задержек сигналов в линиях связи оказываются довольно значительными, например в вычислительных машинах фирмы «ИВМ» время распространения сигнала по линиям межэлементных связей составило 70—80 % длительности цикла.

Длина линии связи между наиболее удаленными участками типовой конструкции зависит от ее компоновочной схемы. В связи с этим возникает задача выбора такой пространственной геометрии конструктивного модуля, которая при данном его объеме обеспечивала бы минимальную длину линии связи между наиболее удаленными элементами.

Пространственная геометрия модулей прямоугольной конструкции. Наиболее общей компоновочной схемой конструктивного модуля высокого уровня является многомерная схема, показанная на рис. 2.12.

По этой схеме, как правило, выполняются стойки универсальных и специальных ЭВМ. В соответствии с рисунком длина линии связи между наиболее удаленными элементами

$$l_{\text{св}} = 2L_s + L_h + L_l + 2l_a, \quad (2.1)$$

где L_s — суммарная длина блоков; L_h — высота стойки; L_l — ширина стойки; l_a — часть линии связи, проходящая внутри блока в направлении, совпадающем с L_l .

Полагая $2l_a = kL_l$, уравнение (2.1) запишем в виде

$$l_{\text{св}} = 2L_s + L_h + (1 + k)L_l, \quad (2.2)$$

где k — коэффициент, зависящий от конструктивного обрамления блоков.

Для определения оптимального соотношения между пространственными параметрами модуля, обеспечивающего минимальную длину связи $l_{\text{св}}$ при данном его объеме $V = L_s L_h L_l$, воспользуемся методом геометрического программирования (см. [2]). Полагаем, что $U_1 = c_1 L_s$; $U_2 = c_2 L_h$; $U_3 = c_3 L_l$; $U_4 = c_4 L_s L_h L_l$, где $c_1 = 2$, $c_2 = 1$; $c_3 = 1 + k$; $c_4 = 1/V$; $L_s, L_h, L_l > 0$.

Целевая функция задачи примет вид

$$\min g_0 = \min (U_1 + U_2 + U_3) = \min (c_1 L_s + c_2 L_h + c_3 L_l)$$

при ограничении

$$g_1 = c_4 V = 1.$$

Минимальное значение

$$l_{\text{св min}} = (c_1/\delta_1)^{\delta_1} (c_2/\delta_2)^{\delta_2} (c_3/\delta_3)^{\delta_3} (c_4)^{\delta_4} = g_0^*, \quad (2.3)$$

где δ_i — веса, подчиняющиеся условиям ортогональности: $\delta_1 + \delta_4 = 0$; $\delta_2 + \delta_4 = 0$; $\delta_3 + \delta_4 = 0$ и условию нормализации $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$. Эти условия образуют систему из четырех линейных уравнений с четырьмя неизвестными, которая имеет единственное решение:

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1/3; \quad \delta_4 = -1/3.$$

Подставив в (2.3) значения c_i и δ_i , получим

$$l_{\text{св min}} = \sqrt[3]{54V(1+k)}; \quad (2.4)$$

$$t_{\text{з.п.с min}} = \tau_{\text{з.п}} l_{\text{св min}}, \quad (2.5)$$

где $\tau_{\text{з.п}}$ — задержка распространения сигнала на единице длины линии связи.

Для однорамной стойки минимальная длина линии связи

$$l_{\text{св min}} = 3\sqrt[3]{V}. \quad (2.6)$$

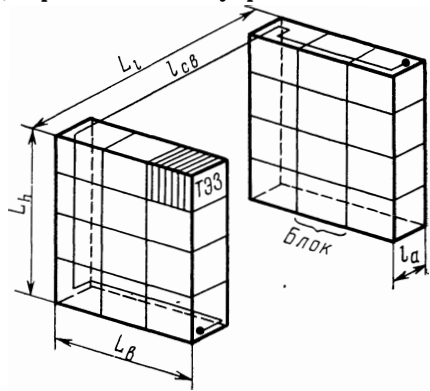


Рис. 2.12. Схема связи в трехмерной типовой конструкции высокого уровня

В точке оптимума коэффициенты $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ представляют собой относительные величины членов U_1, U_2, U_3 , т. е.

$$U_i = \delta_i g_0^* \quad (2.7)$$

Отсюда $U_i/U_j = \delta_i/\delta_j$ и, учитывая, что $U_1 = 2L_a, U_2 = L_h, U_3 = (1+k)L_l$, получим оптимальное соотношение между пространственными параметрами стойки:

$$L_a : L_h : L_l = 1 : 2 : 2/(1+k) \quad (2.8)$$

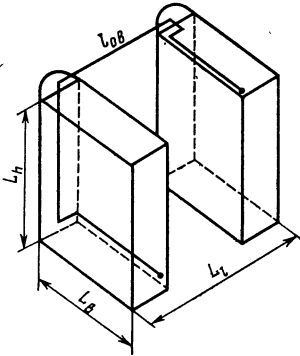


Рис. 2.13. Компоночная схема многогранной стойки

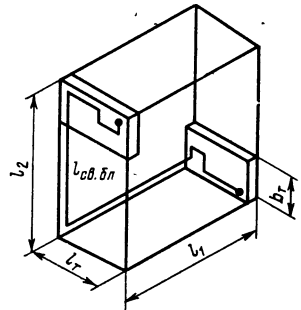


Рис. 2.14. Двухмерная компоновка субблоков

При заданном значении $g_0 = l_{св}$ на основании (2.7) можно вывести формулы для расчета геометрических размеров стойки:

$$L_a = l_{св}/6; L_h = l_{св}/3; L_l = l_{св}/[3(1+k)], \quad (2.9)$$

где $l_{св} = t_{з.л.с. доп}/\tau_{з.р}$; $t_{з.л.с. доп}$ — допустимая задержка сигнала в линии связи.

Выражение (2.5) позволяет на этапе эскизного проектирования получить оценку снизу ожидаемой задержки сигнала в линиях связи разрабатываемой типовой конструкции i -го уровня на основе априорных представлений о количестве входящих в нее элементов ($i-1$ -го уровня и плотности их компоновки. Анализ выражений (2.4) и (2.6) показывает, что двухмерная компоновка типовых элементов, т. е. однорамная стойка (рис. 2.11), обеспечивает меньшую длину линии связи между наиболее удаленными элементами стойки, чем трехмерная. Рассмотрим пример расчета геометрических размеров стойки.

Пример 2.1. Оценить минимальную задержку распространения сигнала между наиболее удаленными элементами устройства, которое предполагается выполнить в виде многогранной стойки прямоугольной формы (рис. 2.13). Рассчитать геометрические размеры стойки. В разрабатываемом устройстве количество микросхем $N = 80\,000$, объем корпуса микросхемы $V_0 = 0,48 \text{ см}^3$, плотность компоновки оценивается коэффициентом заполнения объема $k_V = 0,06$, погонная задержка распространения сигнала $\tau_{з.р} = 5,5 \text{ нс/м}$.

Решение. Объем устройства

$$V = NV_0/k_V = 64 \cdot 10^4 \text{ см}^3.$$

По (2.4) при $k = 0$ длина линии связи

$$l_{св \text{ min}} = \sqrt[3]{54V} = 325 \text{ см}.$$

Минимальная задержка распространения сигнала

$$t_{з.л.с \min} = l_{св \min} \tau_{з.р} = 3,25 \cdot 5,5 = 18 \text{ нс.}$$

Используем $l_{св \min}$ для расчета геометрических размеров стойки. Заметим, что при этом будет получена их оценка снизу, так как $l_{св \min}$ определялась как минимальная длина линии связи между наиболее удаленными ТЭЭ, а не микросхемами ($k = 0$). По (2.9) получим $L_s = 325/6 = 54$ см; $L_h = L_l = 325/3 = 108$ см.

Ответ. Длина, высота и ширина стойки равны соответственно $L_s = 54$ см; $L_h = L_l = 108$ см.

Для обеспечения минимальной потери быстродействия в линиях связи внутри функциональных устройств, размещаемых в панелях или блоках, необходимо решить задачу определения их оптимальной геометрии. Общей компоновочной схемой субблоков в блоках стационарных ЭВМ является двухмерная, показанная на рис. 2.14.

Сформулируем задачу определения оптимальной геометрии блока как задачу геометрического программирования. Длина части линии связи, проходящая внутри типового элемента замены, зависит от качества решения задачи трассировки соединений между микросхемами. В некоторых случаях при размерах типового элемента замены 140×150 мм длина линии связи в блоке достигает значения 600 мм. Запишем ее в виде $k_{тр} l_T$, тогда

$$l_{св. бл} = l_1 + l_2 + k_{тр} l_T, \quad (2.10)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент, учитывающий качество трассировки (при отсутствии ограничений на длину связей в ТЭЭ $k_{тр} \leq 4$, см. [8]).

Объем блока

$$V_{бл} = l_1 l_2 l_T. \quad (2.11)$$

На основании (2.10) и (2.11) целевая функция задачи будет:

$$\min g_0 = \min (l_1 + l_2 + k_{тр} l_T),$$

$$\text{при ограничении } g_1 = l_1 l_2 l_T / V_{бл}.$$

Решение задачи дает следующие результаты: минимальная длина линии связи блока

$$l_{св. бл \min} = 3 \sqrt[3]{V k_{тр}}, \quad (2.12)$$

оптимальное соотношение геометрических размеров блока

$$l_1 : l_2 : l_T = 1 : 1 : 1 / k_{тр}. \quad (2.13)$$

Выражения для расчета размеров l_1 , l_2 , l_T при заданном значении длины линии связи будут:

$$l_1 = l_2 = l_{св}/3; \quad (2.14)$$

$$l_T = l_{св}/(3k_{тр}). \quad (2.15)$$

Отметим, что (2.14) и (2.15) совпадают с выражениями, полученными в работе [8].

Пример 2.2. Рассчитать размеры основания панели и платы типового элемента замены и выбрать компоновочную схему панели. Длительность такта синхронизации функционального устройства, которое конструктивно оформляется в виде панели, $T_c = 40$ нс. Задержка сигнала между наиболее удаленными микросхемами устройства должна составлять не более $0,18 T_c$.

Решение. Допустимая задержка сигнала в линии связи

$$t_{з.л.с.доп} = 0,18T_c = 7,2 \text{ нс.}$$

Считая, что внутрипанельные связи, в том числе и на ТЭЗ, выполнены печатными проводниками на многослойной печатной плате, примем $\tau_{з.р} = 8 \text{ нс/м}$ и рассчитаем допустимую длину линии связи

$$l_{св.доп} = t_{з.л.с.доп} / \tau_{з.р} = 0,9 \text{ м.}$$

По (2.14) размеры основания панели

$$l_1 = l_2 = l_{св}/3 = 0,9/3 = 0,3 \text{ м.}$$

Пусть $k_{тр} = 2$, тогда в соответствии с (2.15) длина ТЭЗ

$$l_T = l_{св}/6 = 0,9/6 = 0,15 \text{ м.}$$

Расчет ширины платы ТЭЗ и выбор компоновочной схемы панели выполним для двух вариантов соотношения длины ТЭЗ к его ширине l_T/b_T (см. рис. 2.14).

В а р и а н т 1. $l_T/b_T = 1$. Из выражения (2.13) имеем $l_1 : l_T = 1 : 0,5$, т. е. $l_1 = 2b_T$. Получаем компоновочную схему панели с двумя рядами ТЭЗ.

В а р и а н т 2. $l_T/b_T = 3/2$, тогда $b_T = 2l_T/3 = 0,1 \text{ м}$. С учетом $l_1/l_T = 2$ получим $l_1 : b_T = 3 : 1$. В этом случае компоновку ТЭЗ в панели целесообразно выполнить в три ряда.

Ответ. Размеры основания панели $l_1 = l_2 = 0,3 \text{ м}$, длина ТЭЗ $l_T = 0,15 \text{ м}$, ширина $b_T = 0,15 \text{ м}$ при двухрядной компоновке и $b_T = 0,1 \text{ м}$ — при трехрядной.

Выбор компоновочной схемы многорамной стойки (конструкция типа ЕС ЭВМ). Выше было отмечено, что при одном и том же объеме устройства однорамная конструкция стойки обеспечивает меньшую длину линии связи между наиболее удаленными микросхемами, чем многорамная. Однако при большом количестве оборудования, размещаемого в стойке, размеры платы ТЭЗ могут оказаться слишком большими и не позволят обеспечить механическую прочность и надежность ТЭЗ. В примере 2.1 для устройства объемом 80 000 микросхем подсчитано, что $L_l = 1080 \text{ мм}$. При однорамной компоновке стойки это значение будет соответствовать длине ТЭЗ, а максимально допустимый размер стороны платы ТЭЗ равен 470 мм. В связи с этим стойки основных устройств универсальных ЭВМ, в которых число микросхем достигает нескольких десятков тысяч, приходится делать многорамными при большом числе блоков в раме.

Определим оптимальное соотношение $N_1 : N_2 : N_3$, где N_1 и N_2 — количество вертикальных и горизонтальных рядов блоков в раме; N_3 — количество рам в стойке.

Для выбора компоновочной схемы многорамной стойки используем соотношение (2.8), приняв $k = 0$ на том основании, что связи между блоками являются внутрирамными. Выражение (2.8) примет вид

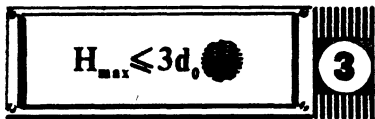
$$L_s : L_h : L_l = 1 : 2 : 2. \quad (2.16)$$

Запишем $L_s = N_1 l_1$; $L_h = N_2 l_1$; $L_l = N_3 l_T$. Из формул (2.14) и (2.15) имеем $l_T = l_1/k_{тр}$.

Подставив в (2.16) выражения для L_s , L_h , L_l , получим оптимальное соотношение

$$N_1 : N_2 : N_3 = 1 : 2 : 2 k_{тр}. \quad (2.17)$$

В частном случае при $k_{тр} = 2$ приходим к соотношению, приведенному в работе [8], т. е. $N_1 : N_2 : N_3 = 1 : 2 : 4$.



ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭВМ И СИСТЕМ

§ 3.1. СУББЛОКИ

Типовые конструкции ЭВМ предназначены для механического крепления и электрической коммутации входящих в них конструктивных узлов предыдущих уровней. В общем случае в типовой конструкции можно выделить следующие составные части: несущие детали типовой конструкции, которые служат для размещения и защиты от внешних воздействий деталей, входящих в данную сборочную единицу; элементы крепления, стыковки и расстыковки типовой конструкции с конструктивным модулем следующего уровня; детали крепления и фиксации конструктивных элементов, входящих в данную типовую конструкцию; элементы внешней и внутренней электрической коммутации; лицевую панель; элементы индикации и контроля. В зависимости от уровня конкретной типовой конструкции, назначения и вида ЭВМ некоторые из перечисленных выше составных частей могут отсутствовать.

Субблоки конструктивно объединяют на одной или нескольких монтажных платах исходные схемотехнические компоненты — микросхемы разной степени интеграции и электрорадиоэлементы (ЭРЭ). На субблоках могут размещаться от десятков до сотен микросхем. Различают субблоки каркасного и бескаркасного исполнения. В общем случае субблок включает в себя: каркас, который является несущим элементом; монтажную плату с установленными на ней микросхемами и ЭРЭ; лицевую панель с элементами индикации и контроля; элементы внешней и внутренней электрической коммутации.

Каркасные конструкции субблоков применяют в ЭВМ, работающих в условиях интенсивных механических воздействий, или в многоплатных субблоках. Количество плат в субблоках зависит от объема реализуемой схемы, плотности ее компоновки и допустимых размеров печатных плат. Субблоки рекомендуется делать одноплатными с целью упрощения их конструкции. Каркасы используются штампованные из стали или литые из алюминиевых сплавов. В бескаркасных субблоках роль несущей детали выполняет сама монтажная печатная плата.

Конструкция двухплатного каркасного субблока разъемного типа приведена на рис. 3.1. Для фиксации субблока в типовой конструкции следующего уровня (блоке или панели) используются невыпадающие винты 4, расположенные на лицевой панели 3. Вилка разъема 5 осуществляет внешнюю электрическую коммутацию. Соединения внутри монтажной платы 2 выполняются печатными проводниками. Межплатные связи и связи к вилке разъема осуществляются проводным монтажом от контактных площадок. Каркас 1 данного субблока показан на рис. 3.2.

выделены зона установки микросхем и краевые поля. Краевое поле y_1 предназначено для элементов контроля и крепления лицевой панели, на поле y_2 устанавливаются элементы внешней электрической коммутации, краевые поля x_1 и x_2 являются конструктивно-технологическими по ним, например, может осуществляться фиксация в направляющих блока. Рекомендуемые значения краевых полей: $y_1 > 10$ мм, $y_2 \geq 12,5$ мм, $x_1 = x_2 \geq 2,5$ мм.

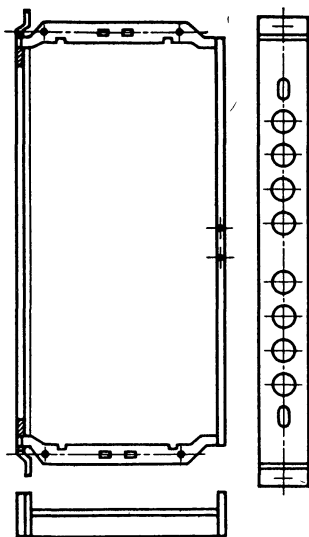


Рис. 3.2. Конструкция каркаса субблока

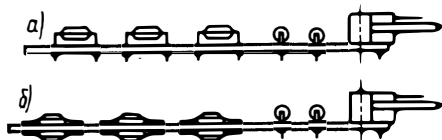


Рис. 3.3. Установка микросхем со штырьковыми (а) и планарными (б) выводами

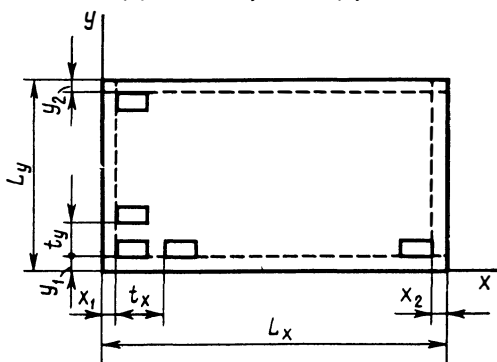


Рис. 3.4. Схема установки микросхем на печатной плате

Шаг установки микросхем на печатной плате зависит от размеров их корпусов, требуемой плотности компоновки, температурного режима и метода разработки топологии печатных плат (ручной или машинный). При соблюдении теплового режима микросхемы рекомендуется ориентировать относительно краевого поля внешней электрической коммутации, как показано на рис. 3.5,а. Для учета направления воздушного потока допускается их поворот на 90° (рис. 3.5,б).

Крепление микросхем и ЭРЭ осуществляется в основном пайкой их выводов, причем незадействованные контакты должны запаиваться для повышения жесткости крепления. Микросхемы с планарными выводами можно устанавливать с использованием клея и лака. Их выводы припаиваются к контактным площадкам.

Корпуса микросхем, устанавливаемые с зазором (рис. 3,6,а), крепятся за счет пайки или приварки выводов к контактным площадкам. Корпус микросхемы с планарными выводами приклеивается непосредственно на монтажную плату (рис. 3.6,б) или на прокладку (рис. 3.6,в). Прокладка может быть из тонкого стеклотекстолита толщиной $h =$

$= 0,3$ мм или металлическая (медь, алюминий, их сплавы), $h = 0,2 \div 0,5$ мм. Металлическая прокладка служит также в качестве теплоотводящей шины. Для ее изоляции от поверхности печатной платы используют специальную пленку. При высоких требованиях к постоянству температурного градиента и большой удельной мощности, выделяемой микросхемами, вместо металлических прокладок можно применять металлическую пластинку толщиной 2 мм с окнами для выводов микросхем. Фрагмент такой конструкции показан на рис. 3.7. Гибридные микросхемы повышенной степени интеграции рекомендуется крепить компаундом. Навесные ЭРЭ следует устанавливать в посадочных местах микросхем. Микросхемы со штырьковыми выводами монтируются с зазором 1÷2 мм, допускается их установка на изоляционных прокладках толщиной 1,5 мм, которые крепятся с

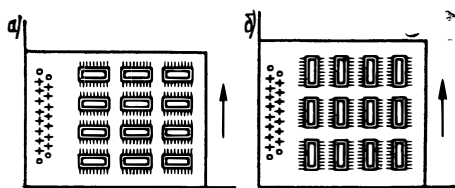


Рис. 3.5. Ориентация микросхем относительно выходных контактов без учета направления воздушного потока (а) и с учетом направления воздушного потока (б)

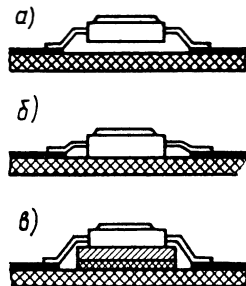


Рис. 3.6. Установка микросхем с планарными выводами на печатную плату с зазором (а), без зазора (б), на металлическую прокладку (в)

помощью клеев или лаков. Штырьковые выводы микросхем и ЭРЭ вплавляются в металлизированные отверстия, используемые как переходные и для реализации внешних разъёмных и неразъёмных электрических соединений (см. § 3.5).

Центры металлизированных и крепежных отверстий на печатной плате должны располагаться в узлах координатной сетки. Последнюю применяют для определения положения печатного монтажа и других элементов субблока (микросхем, ЭРЭ, контактов печатных разъёмов и т. д.). Основной шаг координатной сетки равен 2,5 мм, допускается шаг, равный 1,25 и 0,5 мм. На рис. 3.8,а показана разметка посадочного места для микросхем со штырьковыми выводами при расстоянии между их осями, равном шагу координатной сетки ($h = 2,5; 1,25$ мм; n_1, n_2 — число рядов выводов). Центры отверстий под выводы микросхем при расстоянии между их осями, не кратном шагу координатной сетки, располагаются согласно размерам, указанным в чертежах на данные элементы. При этом должны соблюдаться следующие требования: отверстие, в которое вплавляется первый вывод, должно совпадать с узлом сетки, как показано на рис. 3.8,б, центры других отверстий должны находиться на одной из вертикальных или горизонтальных линий координатной сетки. Отверстия, служащие для электромонтажа, должны иметь контактные площадки. Микросхемы в

корпусах с планарными выводами устанавливаются на плате в соответствии с их разметкой с учетом симметричного расположения выводов относительно контактных площадок (рис. 3.8, в). Контактная площадка или металлизированное отверстие под первый вывод микросхемы должны иметь «ключ».

Габаритные размеры и присоединительные размеры ряда корпусов современных микросхем приведены в [13].

Для повышения ремонтпригодности субблоков микросхемы высокой степени интеграции устанавливают в розетку специального

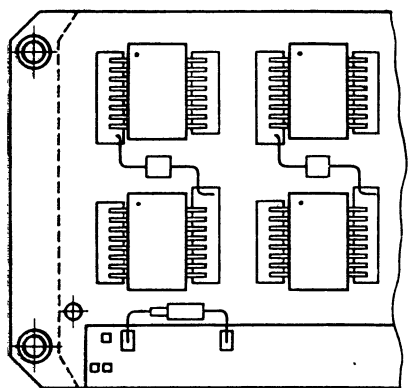
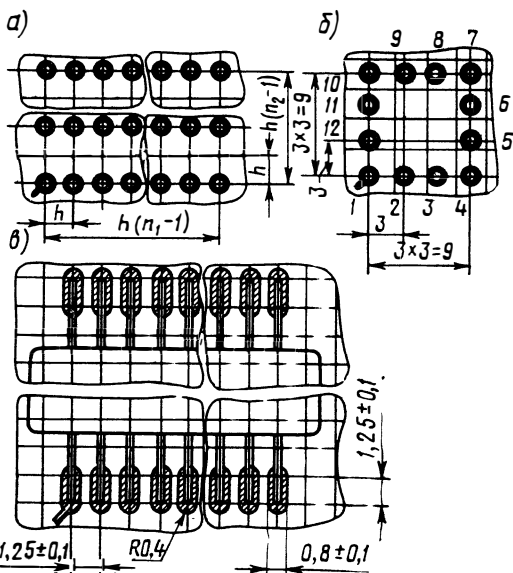


Рис. 3.7. Установка микросхем с планарными выводами на металлическую пластину

Рис. 3.8. Разметка места установки корпусов



разъемного соединителя. Электрический соединитель крепят и спаивают на монтажной плате.

Лицевая панель (планка). Предназначена для предотвращения утечки охлаждающего воздуха в случае принудительной вентиляции. На передней панели субблока могут устанавливаться элементы контроля и индикации. В субблоках каркасной конструкции лицевая планка — часть каркаса (см. рис. 3.1). В бескаркасных субблоках передняя панель является отдельной деталью и изготавливается из листовой стали, алюминиевых сплавов или пластмасс. В типовом элементе замены лицевая планка используется для его установки и съема. Конструкция лицевой панели в виде колодки из пресс-материала с гнездовыми контактами показана на рис. 3.9. На рис. 3.10 изображена конструкция передней панели с элементами индикации. На этих панелях имеются отверстия для захватов съемников. Если усилие расчленения довольно велико, на лицевой панели монтируется специальное устройство для облегчения установки и съема ТЭЭ. Пример таких устройств представлен на рис. 3.11.

Для подвода питания и «земли» в многослойных печатных платах (МПП) имеются специальные слои, которые играют также роль экранов.

Подробнее этот вопрос рассматривается в § 3.2. В двусторонних печатных платах (ДПП) ширина печатных проводников питания и «земли» выбирается из следующего предпочтительного ряда размеров: 1,2; 1,9; 2,1; 2,4; 2,8; 5,0 мм. Для разгрузки печатного монтажа допу-

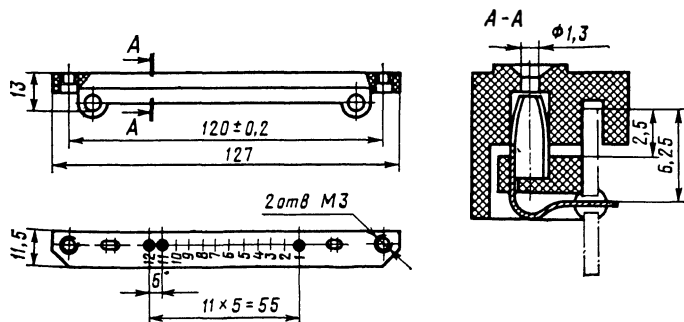


Рис. 3.9. Конструкция лицевой панели с гнездовыми контактами

скается установка навесных шин питания и «земли». На рис. 3.12 изображена конструкция ТЭЗ ЕС ЭВМ с навесными шинами «земли» 1, питания 2 и лицевой планкой 3. Заземление подводится печатным

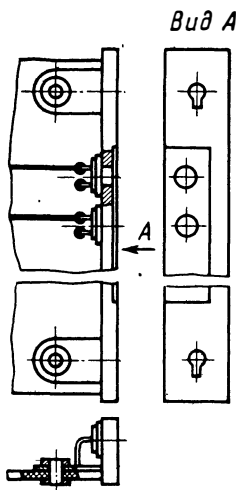
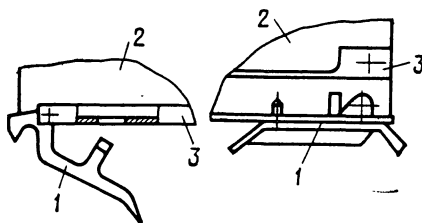


Рис. 3.10. Конструкция передней панели с элементами индикации

Рис. 3.11. Устройства для облегчения установки и съема ТЭЗ:

1 — рычаг; 2 — печатная плата; 3 — лицевая панель



проводником по стороне установки микросхем, питание — по противоположной стороне платы. Навесные шины питания и «земли» впаяются в металлизированные отверстия, отводы от них к соответствующим выводам микросхем делаются печатными проводниками. Использование навесных шин ухудшает технологичность конструкции.

Внешняя электрическая коммутация в ТЭЗ. Осуществляется с помощью разъемных соединений. Разъемная часть ТЭЗ может быть выполнена в виде вилки или розетки контактного соединителя. В суб-

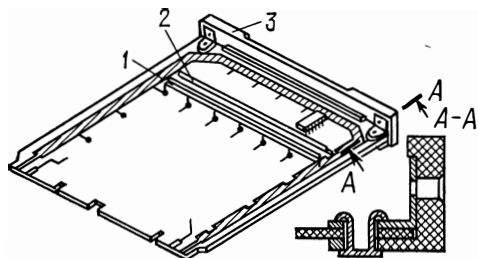


Рис. 3.12. Конструкция типового элемента замены ЕС ЭВМ

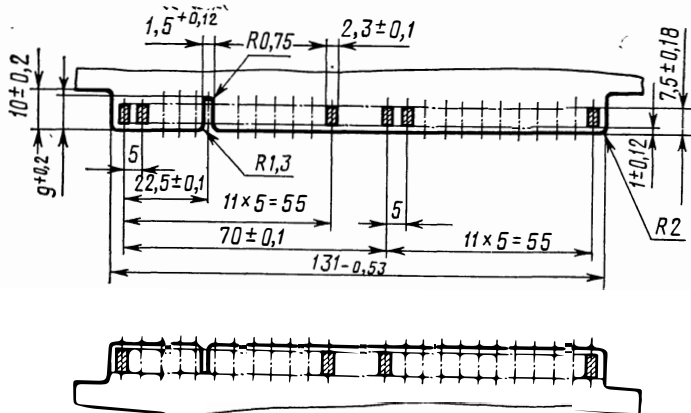


Рис. 3.13. Разметка печатных ламелей двусторонней платы ТЭС под розетку РППМ17-48

блоке, показанном на рис. 3.1, установлена вилка разъема. В одноплатных ТЭС с ДПП в качестве вилки может использоваться крайнее поле самой платы с печатными ламелями. Пример разметки печатных ламелей ДПП типового элемента замены ЕС ЭВМ под розетку РППМ17-48 представлен на рис. 3.13. Печатные ламели выполнены на обеих сторонах ДПП. Допускается одностороннее расположение печатных контактов. Количество печатных ламелей определяется числом контактов розетки, используемой для сопряжения. В субблоках неразъемной конструкции внешние электрические соединения осуществляются проводным монтажом и гибкими кабелями. Элементы разъемных и неразъемных внешних электрических соединений подробнее будут рассмотрены в § 3.5.

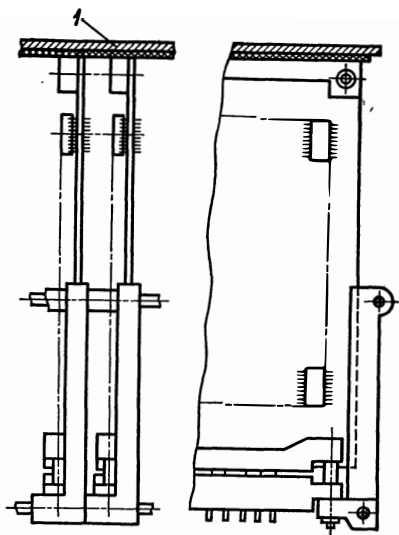


Рис. 3.14. Групповое крепление субблоков в блоках разъемной конструкции (1 — прижимная планка)

ТЭЗ фиксируется за счет усилий сопряжения в разъемах и в направляющих панели или блока. В технически обоснованных случаях могут применяться невыпадающие винты (см. рис. 3.1) или прижимные планки (рис. 3.14, деталь 1).

В конструкции ТЭЗ должен быть предусмотрен «ключ», предохраняющий от неправильной ориентации в рабочем гнезде типовой конструкции следующего ранга. В качестве «ключа» может использоваться несимметричность разъема (рис. 3.12), штыри-ловители, установленные на каркасе (рис. 3.1), или несимметричность установки разъема относительно плоскости монтажной платы (см. рис. 3.3).

§ 3.2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Печатная плата предназначена для электрического соединения элементов схемы. Она представляет собой изоляционное основание, на котором имеется совокупность печатных проводников, контактных площадок и металлизированных отверстий или переходов. По конструктивному исполнению различают односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП) и гибкие (ГПП) печатные платы. ГОСТ 10317—79 рекомендует использовать платы прямоугольной формы, размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными: 2,5; 5 и 10 при длине соответственно до 100; до 350 и свыше 350 мм. Максимальный размер любой из сторон не должен превышать 470 мм, соотношение сторон — не более 3:1. На свободном месте печатной платы наносится условный шифр или обозначение платы, в МПП маркируется каждый слой. Многослойные печатные платы целесообразно применять при высоких требованиях к плотности электрического монтажа, а также при необходимости получения электрических параметров линий связи. Материалы и методы, используемые для изготовления печатных плат по ГОСТ 23751—79, указаны в табл. 3.1. При выборе толщины печатных плат учитывается метод изготовления и предъявляемые к ним механические требования.

Сечение МПП по металлизированным отверстиям показано на рис. 3.15. На рис. 3.16 изображен пример структуры двенадцатислойной печатной платы, в которой шесть слоев ($X1, Y3, X2, Y2, X3, Y1$) предназначены для трассировки сигнальных связей, четыре слоя (E_0, E_2, E_1, E_0) — разводки питания и два наружных слоя ($T1$ и $T2$) являются технологическими (защитными). Потенциальные слои (питания и заземления) обычно делаются сетчатыми (рис. 3.17). Вокруг металлизированного отверстия, которое не должно иметь контакта с экраном, в последнем делается вырез с расстоянием до кромки отверстия, равным 1,0 — 1,5 мм. Толщина МПП зависит от толщины основного материала, числа слоев, толщины прокладок между слоями, их количества и технологии склеивания. Ориентировочно толщина МПП

$$H = \Sigma H_c + (0,5 \div 1) \Sigma H_{пр}, \quad (3.1)$$

где H_c , $H_{пр}$ — номинальная толщина материала слоя и прокладки по стеклоткани, причем последняя должна быть не менее двух толщин печатных проводников, мм.

Таблица 3.1

Материал	Марка	Тип печатной платы	Метод изготовления
Фольгированный гетинакс	ГФ-1-35 ГФ-2-35 ГФ-1-50 ГФ-2-50	ОПП и ДПП	Химический
Фольгированный стеклотекстолит	СФ-1-35 СФ-2-35 СФ-1-50 СФ-2-50 СФ-1Н-50 СФ-2Н-50 СФ-1-35Г СФ-2-35Г СФ-1-50Г СФ-2-50Г СФ-1Н-50Г СФ-2Н-50Г		Комбинированный позитивный
Фольгированный стеклотекстолит повышенной нагревостойкости	СФПН-1-50 СФПН-2-50	ОПП и ДПП повышенной нагревостойкости	Комбинированный позитивный
Стеклотекстолит	СТЭФ-1-2ЛК	ДПП	Электрохимический
Фольгированный диэлектрик для полупроводниковой технологии	Слофадит		
Фольгированный диэлектрик	ФДМ-2	ГПП	Комбинированный позитивный
Теплостойкий фольгированный стеклотекстолит	СТФ-1 СТФ-2	ДПП, ГПП, МПП	Комбинированный позитивный, металлизация сквозных отверстий
Фольгированный травящийся стеклотекстолит	ФТС-1 ФТС-2	МПП и ГПП	Металлизация сквозных отверстий
Прокладочная стеклоткань	СПТ-3	МПП	

Примечание. Толщина фольги 35; 50 мкм, фольгированного диэлектрика 0,1; 0,2; 0,25; 0,5 мм, фольгированного стеклотекстолита 0,5—3,0 мм, фольгированного гетинакса 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

На рис. 3.18 показан фрагмент наружного слоя печатной платы. Проводники рекомендуется выполнять прямоугольной формы, допускается произвольная форма и скругление перегибов. Ось печатного проводника, проходящего между двумя соседними контактными площадками или отверстиями, должна быть перпендикулярна линии,

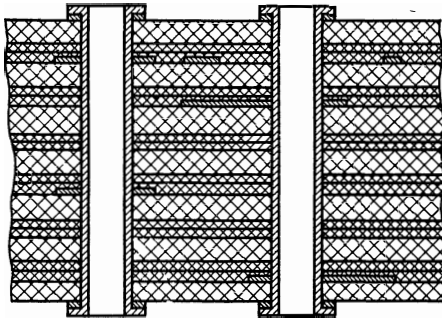


Рис. 3.15. Сечение многослойной печатной платы по металлизированным отверстиям

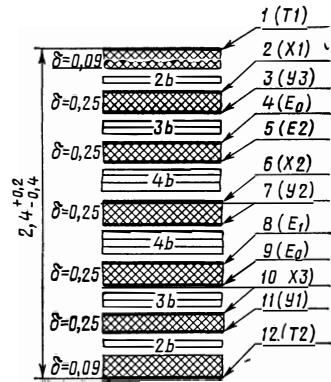


Рис. 3.16. Структура двенадцатислойной печатной платы

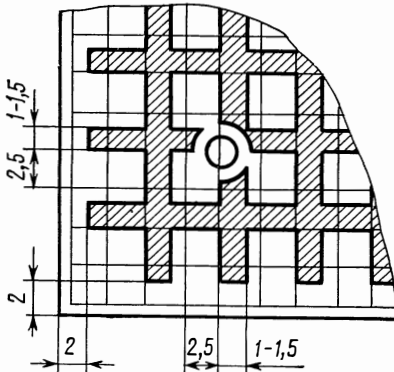


Рис. 3.17. Пример сетчатого выполнения слоя питания и заземления в МПП

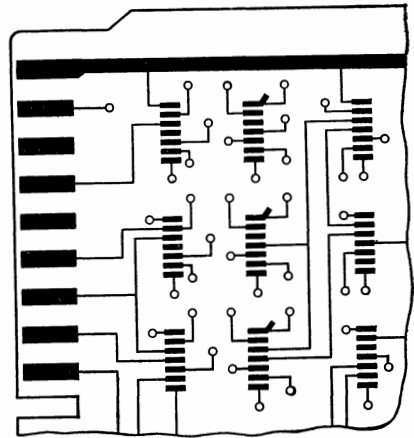


Рис. 3.18. Фрагмент наружного слоя печатной платы

соединяющей их центры. Ширину печатных проводников необходимо выдерживать одинаковой по всей длине. Классы плотности печатного рисунка по ГОСТ 23751—79 приведены в табл. 3.2.

При разработке конструкции печатной платы необходимо рассчитывать такие элементы печатного монтажа, как минимальный и максимальный диаметр контактных площадок, минимальное расстояние

Таблица 3.2

Параметры и их условное обозначение	Размеры (мм) элементов проводящего рисунка для классов плотности		
	1-го	2-го	3-го
Ширина проводника T	0,500	0,250	0,150
Расстояние между проводниками, контактными площадками, проводниками и контактными площадками или проводниками и металлизированными отверстиями S	0,500	0,250	0,150
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки данного отверстия B_m	0,050 (0,15 для штамповки)	0,035	0,025
Отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы j	0,400	0,330	0,330

Примечание. Для печатных плат размером более 240×240 мм допускается только 1-й класс плотности, для плат размером меньше 240×240 мм и больше 170×170 мм — 1-й и 2-й классы.

для прокладки n -го числа проводников между двумя соседними отверстиями, диаметр отверстия до и после металлизации. При конструировании многослойной печатной платы дополнительно нужно определять число ее слоев, их структуру и расстояния между слоями. Основные соотношения и исходные данные для расчета печатного монтажа приведены в [8, 9] и ГОСТ 23751—79.

Расчет элементов печатного монтажа. Основными исходными данными для расчета элементов печатного монтажа являются: класс плотности, шаг координатной сетки, установочные характеристики компонентов и допуски на отклонения размеров и координат элементов печатного монтажа от номинальных значений. Последние определяются уровнем технологии, применяемым оборудованием и используемыми материалами.

Область печатного монтажа между двумя соседними контактными площадками показана на рис. 3.19, где D_k — диаметр контактной площадки; T — ширина печатного проводника; n — число проводников между соседними контактными площадками; S — расстояние между соседними элементами печатного монтажа; $t_{тр}$ — шаг трассировки. Исходя из рис. 3.19 расстояние между осями двух соседних площадок

$$l = 0,5 (D_{к1} + D_{к2}) + nT + (n + 1)S \leq kh, \quad (3.2)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ — число шагов координатной сетки между осями соседних контактных площадок; h — шаг координатной сетки.

На рис. 3.20 изображена контактная площадка с учетом погрешности $\delta_{\text{ш}}$ расположения элементов проводящего рисунка относительно координатной сетки на фотошаблоне, погрешности $\delta_{\text{э}}$ расположения элементов при экспонировании и значения отклонения δ_0 центра отверстия при сверлении, обусловленного точностью станка. Здесь O — номинальное положение центра контактной площадки и отверстия; O_1 — возможное положение центра контактной площадки из-за неточности изготовления фотооригинала; O_2 — возможное положение центра контактной площадки в готовой плате или на слое МПП; O_3 — возможное положение центра отверстия. На данном рисунке показана

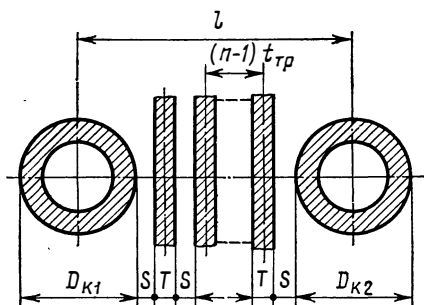


Рис. 3.19. Область печатного монтажа между соседними контактными площадками

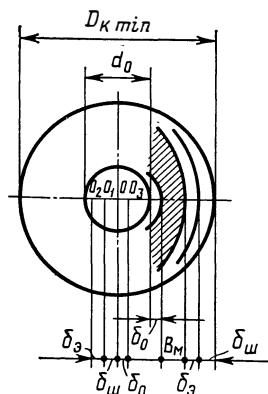


Рис. 3.20. Схема определения минимального диаметра контактной площадки

только часть погрешностей, их вид и количество зависят от метода производства печатных плат. Для ДПП, изготавливаемых электрохимическим методом, а также внутренних и наружных слоев МПП, получаемых соответственно химическим и комбинированным позитивным методами, кроме указанных учитываются следующие погрешности: $\Delta D_{\text{ш}}$ — изготовления окна или линии на фотошаблоне; $\delta_{\text{п}}$ — положения базового отверстия в фотошаблоне; Δd — диаметра отверстия (определяется точностью изготовления и заточки сверла, пуансона); $\delta_{\text{э}}$ — расположения базовых отверстий на заготовке; $\delta_{\text{с}}$ — базирования плат на сверлильном станке, штампе; $\delta_{\text{м}}$ — положения контактной площадки на слое из-за нестабильности линейных размеров; $\Delta_{\text{э}}$ — диаметра контактной площадки фотокопии при экспонировании.

С учетом этих погрешностей минимальный диаметр контактной площадки, обеспечивающий заданное расстояние $B_{\text{м}}$ от края просверленного отверстия до края контактной площадки данного отверстия, будет

$$D_{\text{к min}} = 2B_{\text{м}} + d_0 + 1,5h_{\text{ф}} + 2\delta_{\text{п}} + C_6, \quad (3.3)$$

где d_0 — номинальный диаметр металлизированного отверстия (выбирается по ГОСТ 23751—79); $h_{\text{ф}}$ — толщина фольги; $\delta_{\text{п}} = \delta_{\text{м}}L/100$ —

изменение длины печатной платы из-за нестабильности линейных размеров (L — размер большей стороны печатной платы); $C_6 = \Delta d + 2\delta_0 + 2\delta_\delta + 2\delta_{\text{ш}} + 2\delta_3 + \delta_{\text{п}} + \delta_3 + 0,1$ (для первого класса плотности $C_6 = 0,65$ мм, для второго и третьего $C_6 = 0,3$ мм).

Значение $B_{\text{м}}$ определяется из табл. 3.2 для заданного класса плотности монтажа. Максимальный диаметр контактной площадки

$$D_{\text{к max}} = 2B_{\text{м}} + d_0 + 1,5h_{\phi} + 2\delta_{\text{л}} + C_7, \quad (3.4)$$

где $C_7 = C_6 + 2\Delta_3 + \Delta D_{\text{ш}}$ ($C_7 = 0,77$ мм для первого класса плотности и $C_7 = 0,35$ мм для второго и третьего классов плотности).

Минимальное расстояние для прокладки n проводников между двумя контактными площадками металлизированных отверстий должно обеспечиваться при максимальных диаметрах контактных площадок и максимальной ширине печатного проводника с учетом погрешности $\delta_{\text{ш}}$. На основании выражения (3.2) минимальное расстояние для прокладки n проводников

$$l_{\text{min}} = 0,5 (D_{\text{к1max}} + D_{\text{к2max}}) + 2\delta_{\text{ш}} + (T_{\text{max}} + \delta_{\text{ш}}) n + S (n + 1) \leq kh, \quad (3.5)$$

где $T_{\text{max}} = T + \Delta D_{\text{ш}} + 2\Delta_3$ — максимальная ширина печатного проводника.

Значения T и S для заданного класса плотности печатного монтажа берут из табл. 3.2: $\delta_{\text{ш}} = 0,06$ мм для первого, $0,05$ мм для второго и $0,03$ мм для третьего классов плотности. При прокладке проводников между двумя контактными площадками неметаллизированных отверстий в (3.5) вместо $D_{\text{к1max}}$ и $D_{\text{к2max}}$ подставляют $B_{1\text{max}}$ и $B_{2\text{max}}$ — максимальные ширины подрезанных контактных площадок неметаллизированных отверстий.

Проектирование структуры МПП. Структуру МПП можно рассматривать как совокупность сигнальных и потенциальных слоев, чередующихся в определенном порядке. При разработке структуры МПП необходимо обеспечить заданное число сигнальных слоев, удовлетворить требования по помехозащищенности и электрическим параметрам линий связи. В МПП сигнальные слои чередуются с потенциальными, которые снижают волновое сопротивление сигнальных линий связи и экранируют смежные монтажные слои. Структуру МПП можно считать совокупностью отдельных независимых звеньев, возможные варианты которых показаны на рис. 3.21.

На рис. 3.22 показана структура десятислойной печатной платы, состоящая из трех сигнально-потенциальных звеньев: звена с односторонним расположением потенциального слоя (E_0) и одним сигнальным ($X1$), звена с двусторонним расположением потенциальных слоев (E_1, E_2) и двумя сигнальными слоями ($Y1, X2$) и звена с односторонним расположением потенциального слоя (E_0) и одним сигнальным слоем ($Y2$). Структура двенадцатислойной печатной платы, показанная на рис. 3.16, включает в себя: сигнально-потенциальное звено с односторонним расположением потенциального (E_0) и двумя сигнальными ($X1, Y3$) слоями, звено с двусторонним расположением потен-

циальных слоев (E_2, E_1) и двумя сигнальными слоями (X_2, Y_2) и звено с односторонним расположением потенциального слоя (E_0) и двумя сигнальными слоями (X_3, Y_1).

Расчет структуры МПП заключается в определении вида звеньев, их числа, расположения относительно друг друга и расстояния между слоями. Исходные данные для расчета структуры МПП: необходимое число сигнальных слоев, электрические параметры линий связи (собственная емкость на единицу длины или волновое сопротивление), возможные значения геометрических параметров элементов печатного монтажа (ширина сигнальных проводников, толщина сигнальных и потенциальных слоев, диаметр металлизированных отверстий, толщина фольги и прокладочной стеклоткани).

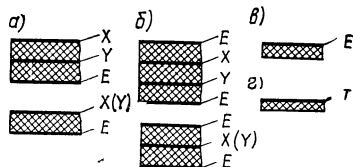


Рис. 3.21. Сигнально-потенциальные звенья МПП с одно- (а) и двусторонним (б) расположением потенциальных слоев, потенциальное (в) и технологическое (z) звенья МПП соответственно

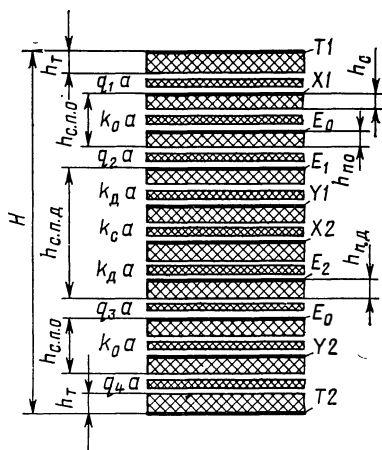


Рис. 3.22. Вариант структуры МПП при четырех сигнальных слоях с тремя сигнально-потенциальными звеньями

При расчете структуры МПП необходимо, чтобы максимально допустимая толщина МПП

$$H_{\max} \leq 3d_0, \quad (3.6)$$

где d_0 — диаметр отверстия до металлизации.

Зависимость толщины МПП от ее структуры описывается выражением (см. рис. 3.22):

$$H = 2h_T + ph_{\pi} + mh_{c.p.o} + nh_{c.p.d} + \sum_{i=1}^Z q_i a \leq H_{\max}, \quad (3.7)$$

где $H = H_{\max} - \Delta H$ — номинальная толщина МПП; ΔH — разброс номинальной толщины из-за отклонений толщины слоев и изоляционных прокладок; p — число потенциальных звеньев (в данной структуре $p = 0$); h_T и h_{π} — соответственно толщина технологического и потенциального звеньев; m и $h_{c.p.o}$, n и $h_{c.p.d}$ — соответственно число и толщина сигнально-потенциальных звеньев с односторонним и двусторонним расположением потенциальных слоев; $Z = p + m + n + 1$ — число прокладочных зон между структурными звеньями; q_i — минимально допустимое число слоев изоляционной прокладки в

i -й прокладочной зоне, т. е. между двумя соседними структурными звеньями; a — толщина одного слоя изоляционной прокладки.

В зависимости от вида толщина сигнально-потенциальных звеньев

$$h_{с.п.о} = n_{с.о} h_c + h_{п.о} + [k_o + k_c (n_{с.о} - 1)] a; \quad (3.8)$$

$$h_{с.п.д} = n_{с.д} h_c + 2h_{п.д} + [2k_d + k_c (n_{с.д} - 1)] a, \quad (3.9)$$

где $n_{с.о}$ и $h_{п.о}$, $n_{с.д}$ и $h_{п.д}$ — число сигнальных слоев и толщина потенциального слоя в сигнально-потенциальном звене с одно- и двусторонним расположением потенциальных слоев соответственно; h_c — толщина сигнального слоя. Смысл параметров k_o , k_d и k_c понятен из рис. 3.22.

Расстояния между сигнальным и ближайшим экранирующим (потенциальным) слоем должны обеспечивать заданные электрические параметры печатных проводников сигнальных слоев. Зависимость электрических параметров печатных линий связи от их геометрии, конструкции и электрических параметров среды рассмотрена в гл. 5.

Порядок расчета структуры МПП следующий. Из (3.6) определяют максимальную толщину МПП. С учетом заданного допуска ΔH находят номинальную толщину H . На основании выражений (3.7) — (3.9) вычисляют толщину сигнально-потенциальных звеньев, число прокладок и расстояния между сигнальными слоями и ближайшими экранирующими. Проверяют, обеспечивает ли данная конструкция требуемые электрические параметры. Если электрические параметры печатных линий связи не обеспечиваются, то изменяют структуру МПП или пересматривают исходные данные, например, ширину печатных проводников, требуемое значение емкости или волнового сопротивления.

§ 3.3. ПАНЕЛИ И БЛОКИ

Блок и панель предназначены для размещения субблоков и представляют собой пространственный сборный или сварной каркас, на котором устанавливают ответные части разъемов и узлы подвода потенциалов питания и «земли», крепят направляющие для субблоков и элементы внутри- и межблочного монтажа. В качестве последних могут использоваться многослойные печатные и соединительные платы, разъемы, переходные колодки, плоские кабели, объемный монтаж.

Конструкции блока и панели должны быть удобными в сборке, наладке и эксплуатации, удовлетворять требованию ремонтпригодности, обеспечивать защиту от внешних воздействий и возможность выполнять внутренний монтаж до их установки в стойку или раму, обладать достаточной прочностью, жесткостью, иметь минимальную массу. Блоки и панели стационарных ЭВМ рекомендуется делать прямоугольной формы и использовать разъемный вариант конструкции, при котором ТЭЗ является субблок. Субблоки (ТЭЗ) в блоках и панелях следует ориентировать вдоль направления воздушного потока системы охлаждения. Рассмотрим варианты конструктивного исполнения панелей и блоков.

Панели. Типичная конструкция панели ЕС ЭВМ показана на рис. 3.23. Это законченный конструктивно-монтажный узел, несущей де-

талью которого является основание 2, изготовленное из листовой стали, с окнами для установки ответных частей соединителей ТЭЗ. Жесткость основания обеспечивается отбортовкой по краям и вытяжкой в центре. На лицевой стороне основания устанавливаются ответные части разъемных соединителей и литые кронштейны 4 с направляющими 6 для ТЭЗ. Крепят кронштейны через металлические сухари 7. Для повышения жесткости узла направляющих кронштейны стягиваются угольниками 5. ТЭЗ ориентированы вертикально, используется двухрядная схема их компоновки. По боковым сторонам панель закрывается стенками для уменьшения потери охлаждающего воздуха. На основание панели устанавливают коммутационную печатную плату 1. В качестве монтажной платы может использоваться ДПП или МПП. В данной конструкции ввод потенциала «земля» в ДПП осуществляется по ее периферии с помощью специальных клемм 8, потенциал питания подводится по шине 9. В коммутационной плате имеются отверстия для выводов ответных частей разъемов. Электрические связи между ТЭЗ осуществляются проводным монтажом накруткой или пайкой к хвостовикам разъемов. Экранирующий провод витой пары присоединяют к лепесткам гребенки, которая припаивается к металлизированному слою «земля». Внутрипанельные связи могут выполняться печатным монтажом, реализованным в МПП. Для электрического соединения с другими панелями по периферии основания устанавливаются переходные колодки 3.

Основные элементы конструкции панели высокопроизводительной ЕС ЭВМ (рис. 3.24) — несущее металлическое основание 1 и кожух. К основанию 1 крепят многослойную печатную плату 2 и вилки 3 разъемов СНП34-135, расположенные в двух горизонтальных рядах, так как на ТЭЗ устанавливается по две розетки. В данной конструкции использована однорядная схема компоновки ТЭЗ.

Кожух панели состоит из верхнего и нижнего каркасов 4, на которые устанавливают штампованные направляющие 7, и боковых стенок 5. Кожух съемный, он крепится к основанию панели винтами 6. Для зацепления с панелью специальными рычажными устройствами, смонтированными на ТЭЗ, в верхнем и нижнем каркасах имеются пазы (рис. 3.25).

Внутрипанельные сигнальные связи выполняются навесным монтажом методом накрутки к хвостовикам вилок соединителей СНП34-135. Внешние связи с панели выводятся плоскими кабелями и проводным монтажом, например витыми парами типа МНВ. Для подключения плоских кабелей используют восемь крайних соединителей, предназначенных для установки ТЭЗ. К одному разъему можно подключать до четырех тридцатиконтактных соединителей плоского кабеля. Для вывода внешних связей витыми парами используют хвостовики соединителей ТЭЗ с монтажной стороны панели. Витые пары подсоединяются методом накрутки.

Многослойная печатная плата панели содержит семь слоев и используется для разводки потенциалов питания и «земли». Структура МПП панели показана на рис. 3.26. Слои питания и «земли», кроме наружного «земляного» слоя, — сетчатые, ширина проводника сетки

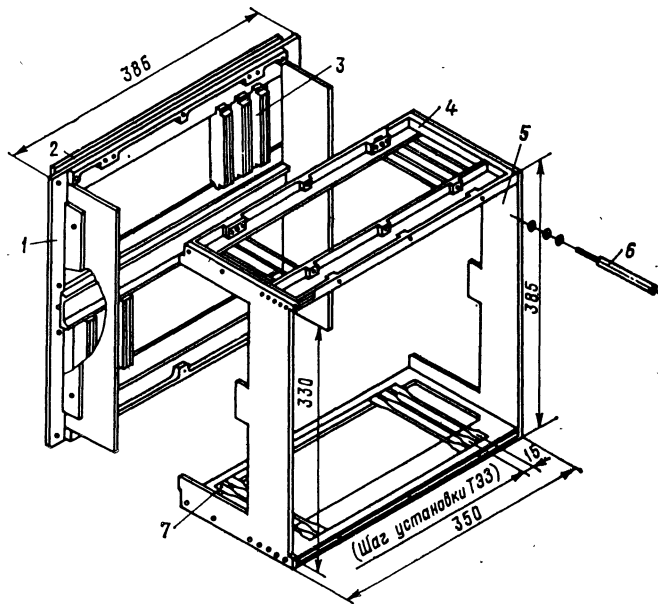
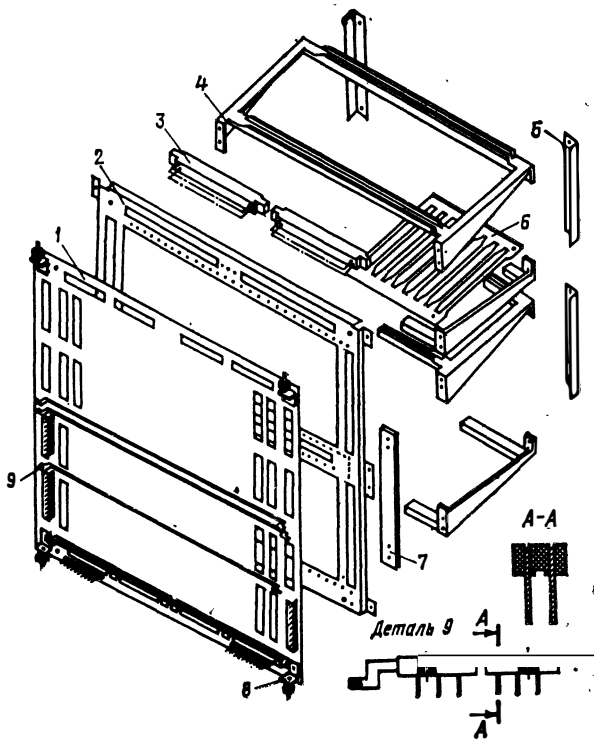


Рис. 3.24. Панель высокопроизводительной ЕС ЭВМ

Рис. 3.23. Конструкция панели

0,3—0,1 мм. Цепь нулевого потенциала на наружном слое изготовлена в виде сплошных мощных шин, занимающих максимально возможную площадь. Фрагмент наружного «земляного» слоя панели показан на рис. 3.27. Узлы подвода потенциалов питания и «земли» расположены по периферийным горизонтальным сторонам МПП (рис. 3.28). Типовой элемент замены получает питание через определенные выводы разъема, имеющие электрический контакт с соответствующими слоями питания. На наружной стороне МПП панели предусмотрена возможность установки трех навесных шин.

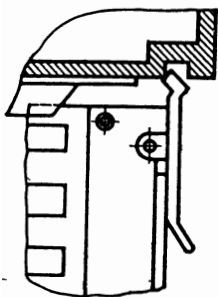


Рис. 3.25. Устройство для установки и съема ТЭЭ

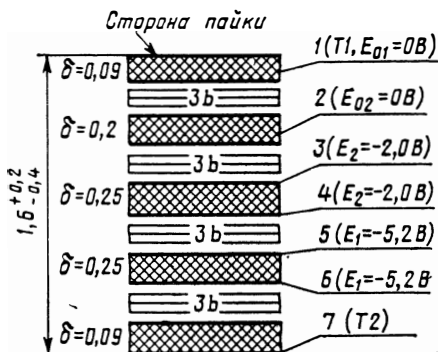


Рис. 3.26. Структура МПП панели ЭВМ

Иногда панель является частью рамы или стойки, например, в ЭВМ со смешанным воздушно-жидкостным охлаждением (рис. 3.29). Направляющие для субблоков каркасной конструкции 2 выполнены фрезеровкой кронштейнов 1. Место контакта каркаса субблока с фрезерованным пазом кронштейна образует тепловой разъем. Ответные части электрических разъемов субблоков монтируются на кронштейнах 1. Питание разводят проводниками или с помощью шин. Кронштейны и полка стойки 3 показаны на рис. 3.30, а, б соответственно. Полка крепится к каркасу стойки.

Блоки. На рис. 3.31 представлена конструкция блока выдвижного типа. Боковые стенки 1 стягиваются планками 2 и угольниками 3, образуя замкнутую жесткую конструкцию — каркас, который является несущей деталью блока. К каркасу крепится коммутационная плата 4. Для установки и фиксации субблоков служат индивидуальные направляющие 5, изготовленные из пресс-материала. Электрические соединения между субблоками выполняются с помощью коммутационной печатной платы 4, разъемов 6 и монтажных проводов. Блок выдвигается по направляющим 7 и фиксируется невыпадающими винтами 8.

Для внешней электрической коммутации блоков могут использоваться разъемные соединители. Блочные врубные разъемы должны быть механически разгружены за счет «плавающего» крепления розеток.

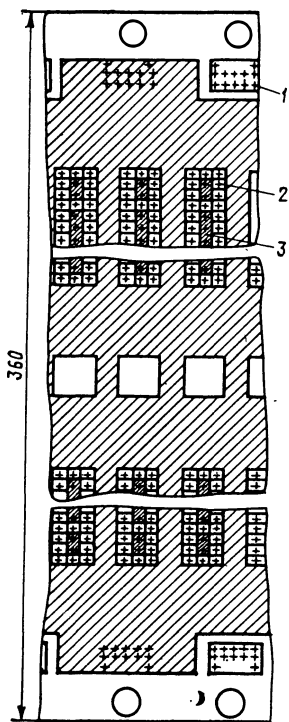


Рис. 3.27. Фрагмент наружного слоя МПП панели:

1 — зоны размещения металлизированных отверстий под узлы подвода питания; 2 — места металлизированных отверстий под выводы разъемов ТЭЭ; 3 — печатная перемычка

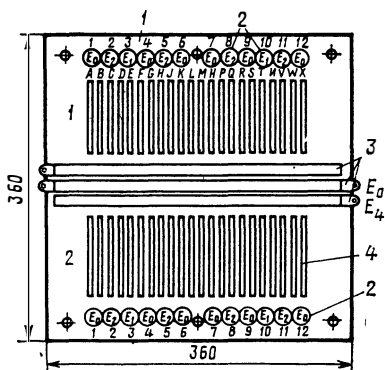


Рис. 3.28. Схема размещения элементов конструкций с монтажной стороны панели:

1 — МПП панели; 2 — узлы подвода питания (E_1 и E_2) и земли (E_0); 3 — навесные шины питания; 4 — вилка соединителя ТЭЭ

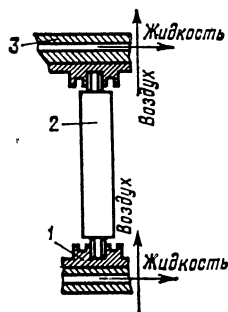


Рис. 3.29. Фрагмент конструкции с воздушно-жидкостным охлаждением

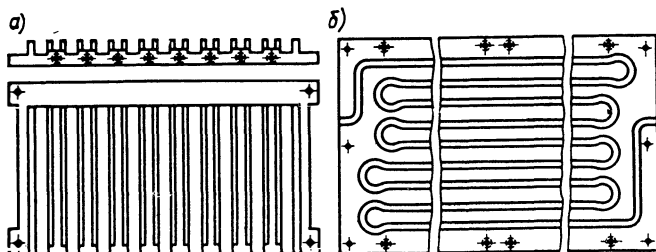


Рис. 3.30. Кронштейн (а) и полка стойки (б)

разъемов. В конструкции таких блоков (рис. 3.32) предусматривают переднюю панель с элементами индикации, контроля и управления. Индивидуальные направляющие 2 субблоков стягиваются шпильками через переднюю 3 и заднюю 1 панели. Розетки разъемов субблоков установлены на направляющих. Субблоки крепят невыпадающими винтами к угольнику 4. На задней панели установлены межблочные разъемы 6 и фиксаторы 5. Электрическое соединение субблоков осуществляется с помощью разъемов и монтажных проводов. Проводники собирают в жгуты и распаивают на разъемы блока.

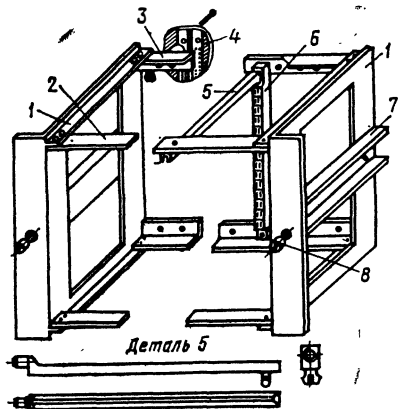


Рис. 3.31. Блок выдвижного типа

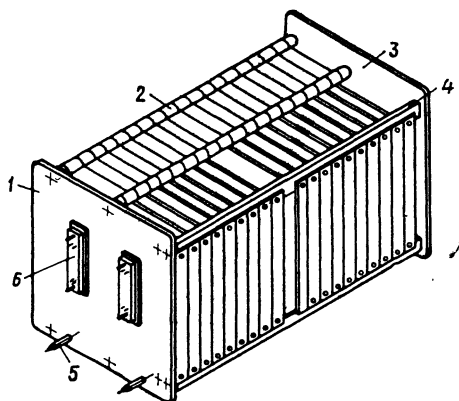


Рис. 3.32. Блок с врубными разъемами

мы 6 и фиксаторы 5. Электрическое соединение субблоков осуществляется с помощью разъемов и монтажных проводов. Проводники собирают в жгуты и распаивают на разъемы блока.

§ 3.4. РАМЫ И СТОЙКИ

Рамы. Используются для размещения и электрического соединения панелей или блоков. Рамы устанавливают в стойки. В зависимости от компоновочной схемы стойки рамы могут быть подвижные и неподвижные. Базовая конструкция поворотной рамы ЕС ЭВМ показана на рис. 3.33. Несущая деталь рамы — сварной каркас 1 из нормализованного профиля. Для каркасов рам в основном используют профили ПК 14990, ПК 15912 и ПК 15913, изготовленные из алюминиевого деформируемого сплава 1915. Каркас имеет перемычки 2 и направляющие 3 для установки панелей 8 с монтажной стороны рамы. С противоположной (лицевой) стороны панели закрываются специальными крышками 4, которые служат для предотвращения утечки охлаждающего воздуха.

Для подключения внешних связей на раме имеются разъемы, устанавливаемые на кронштейнах 7, для монтажа связей внутри рамы предусмотрены специальные кабельные каналы. Внутрирамный монтаж и вывод внешних связей рамы выполняются жгутами. Соседние панели между собой соединяются прямыми перемычками, подсоединяемыми к выводам переходных колодок 3 (см. рис. 3.23). Монтаж жгутами выполняется упорядоченно с двух сторон рамы. Жгуты с ограниченной

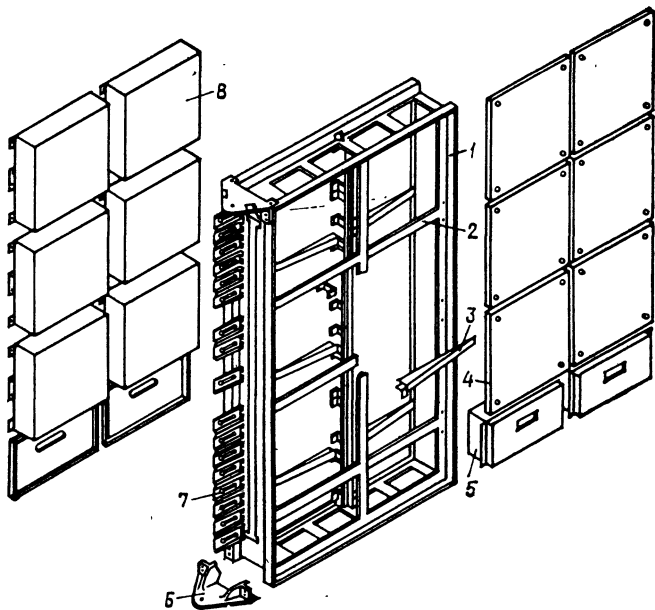


Рис. 3.33. Поворотная рама ЕС ЭВМ

подвижностью располагаются на лицевой стороне рамы и занимают в основном вертикальные межпанельные каналы, неподвижные жгуты—главным образом на монтажной стороне, как правило, в горизонтальных каналах.

Поворотная рама имеет два кронштейна *б* (верхний и нижний) для установки в шарниры при сборке стойки. К неподвижной раме на двух выносных кронштейнах крепится соединительная панель с разъемами, гнездами и переходными колодками для межрамного монтажа. Для охлаждения находящихся внутри рамы электронных блоков в нижних проемах рамы установлены блоки вентиляторов *б*, а в верхней и нижней частях ее сделаны окна.

Стойки. Предназначены для установки и электрического соединения типовых конструкций предыдущего уровня — рам или непосредственно панелей и блоков. Схема размещения основных элементов типовой стойки ЕС ЭВМ показана на рис. 3.34. В стойке установлены три рамы *А*, *В* и *С*, из которых две крайние поворотные, а средняя — неподвижная. Стойка

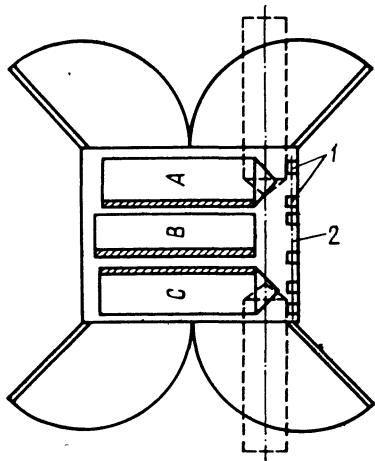


Рис. 3.34. Схема размещения основных элементов стойки

имеет кабельный ствол 2, в котором размещаются жгутовые соединения (проводные или кабельные) между рамами и выходными разъемами 1 стойки и устройств, подключаемых к ней. Штриховкой показана монтажная сторона рам.

Основой стойки служит несущий каркас (рис. 3.35), состоящий из сварных рам 1, 2, 5, соединенных сваркой или болтами. Для повышения жесткости используются косынки 6. Каркас и все силовые детали стой-

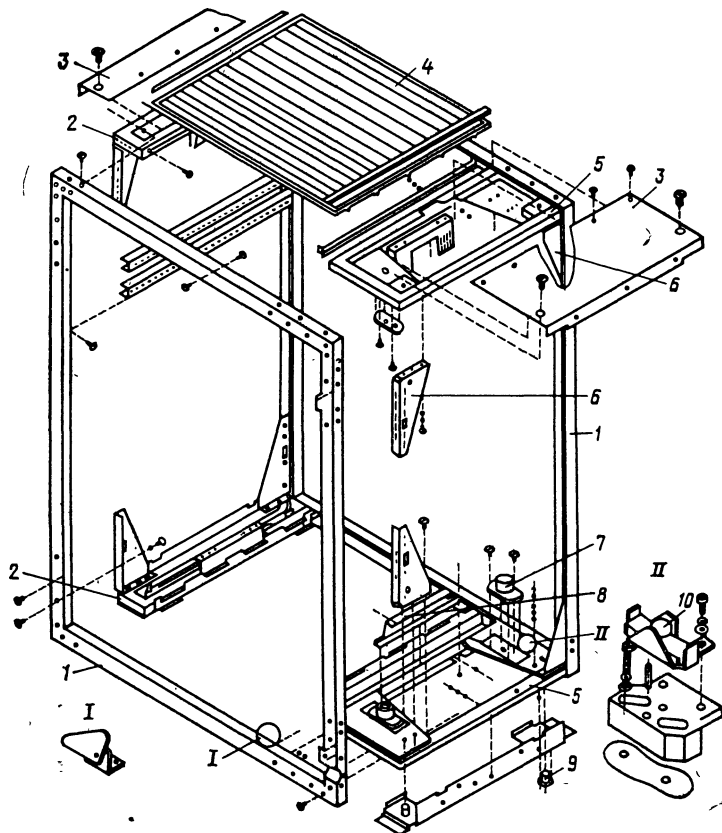


Рис. 3.35. Каркас стойки ЕС ЭВМ

ки изготавливают из профилированного проката. На основаниях 5 устанавливаются втулки 7 для подвески поворотных рам и кронштейны 8 для крепления неподвижной рамы. Неподвижное соединение средней рамы с каркасом стойки повышает ее жесткость. Подшипники-шарниры для подвески поворотных рам показаны на рис. 3.36. Закрытое положение поворотных рам фиксируется замками, раскрытие ограничивается фиксаторами 10 (выноска I, см. рис. 3.35).

Сверху стойка (см. рис. 3.35) закрывается решеткой 4 и обшивкой 3. На нижних рамах 2, 5 установлены регулируемые опоры стойки (деталь 9). Боковые стороны стойки закрываются обшивкой, а с двух

других сторон подвешиваются двустворчатые двери, закрываемые специальным замком.

Схема расположения основных элементов в типовой стойке быстродействующей ЕС ЭВМ изображена на рис. 3.37. Основой стойки является сварной каркас 4 из стального трубчатого профиля квадратного сечения. В стойке устанавливаются две неподвижные рамы — верхнюю 3 и нижнюю 1. Нижняя рама повернута на 180° относительно верхней в вертикальной плоскости и смещена по горизонтали. Благодаря этому

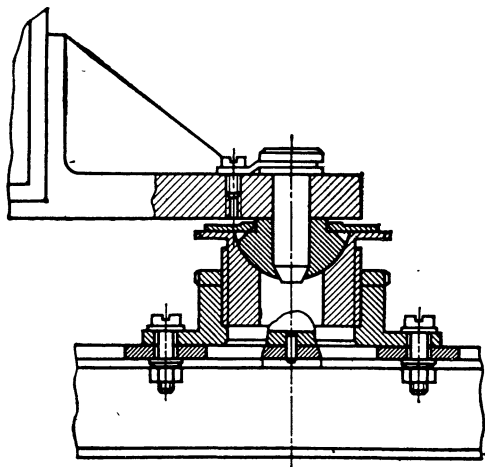


Рис. 3.36. Шарнир для подвески рамы

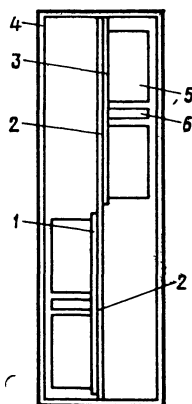


Рис. 3.37. Схема расположения основных элементов в типовой стойке быстродействующей ЕС ЭВМ

межрамные связи выполняют на общей монтажной плоскости 2. В раме с монтажной стороны размещены панели 5 по две в верхнем и нижнем ряду. В средней части каждой рамы имеются вентиляторы 6 автономной системы охлаждения.

Электросоединения в раме выполняют с помощью опрессованного плоского кабеля ПВП мс $75-60 \times 0,2$ и дискретных кабельных изделий, например витых пар МНВ $2 \times 0,05$ или одиночных монтажных проводов типа МНВ. Кабель ПВП мс $75-60 \times 0,2$ имеет волновое сопротивление 75 Ом и состоит из 60 медных посеребренных жил диаметром 0,2 мм, расположенных с шагом 0,5 мм. Все жилы разделены на группы, состоящие из трех проводников, в каждой тройке боковые проводники являются «земляными», а средний — сигнальным. Этим достигается хорошее экранирование соседних сигнальных связей. Для снижения помех все проводники в кабеле должны передавать сигналы в одном направлении.

Схема трассировки связей плоским кабелем на лицевой стороне рамы показана на рис. 3.38,а. В качестве внешних соединителей 3 могут использоваться до 20 разъемов СНП34-135 или соединители

типов «Набор» и СР-50-73Ф. Электромонтаж плоскими кабелями может осуществляться и между прилегающими горизонтальными сторонами панелей. При выполнении электрических связей между панелями в раме и между панелями и внешними соединителями рамы дискретными кабельными изделиями последние упорядоченно укладываются в

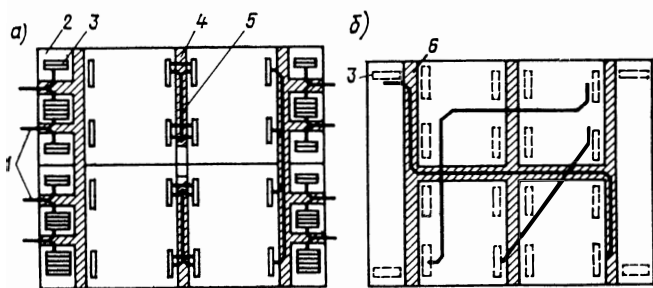


Рис. 3.38. Схема трассировки связей в раме:

1 — внешние рамные соединения; 2 — зона размещения внешних соединителей рамы; 3 — внешние соединители рамы; 4 — специальные кабельные каналы; 5 — межпанельные соединения плоским кабелем; 6 — монтажный канал для дискретных кабелей

специальные вертикальные и горизонтальные каналы 6 с монтажной стороны рамы (рис. 3.38, б). Для критичных связей в пределах рамы допускается проводить соединения по кратчайшему пути.

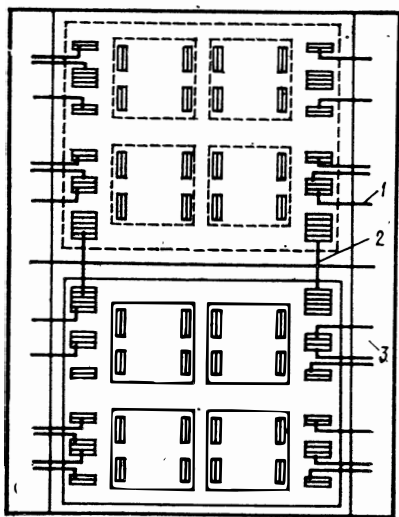
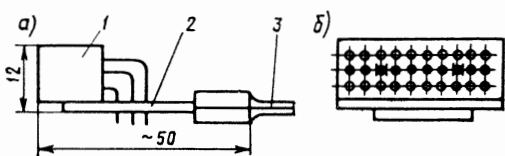


Рис. 3.39. Выполнение межрамных и межстоечных связей плоским кабелем

Рис. 3.40. Общий вид кабельного соединителя (а) и назначение контактов розетки (б)



Межрамный 2 и стоечный 1 монтаж осуществляют плоским кабелем типа ПВП мс с волновым сопротивлением 100 Ом. Плоские кабели подключаются к внешним соединителям рамы с ее лицевой стороны и укладываются в вертикальные кабельные каналы, располагаемые в кросс-шкафу 3 (рис. 3.39).

Контактирование кабеля ПВП мс с вилкой соединителя СНП34-135 осуществляется с помощью 30-контактной розетки СНП34-30Р. Конструкция этих соединителей позволяет к одной вилке СНП34-135

подсоединить четыре розетки СНП34-30Р. Конструкция кабельного соединителя схематично изображена на рис. 3.40. Переходная печатная плата 2 служит для крепления жил кабеля ПВП и розетки СНП34-30Р (элементы 3 и 1 соответственно), а также для их электрического соединения. «Земляные» жилы плоского кабеля ПВП объединены на печатной плате и подключены к среднему ряду контактов розетки СНП34-30Р.

Сборочный чертеж стойки (вид сбоку) приведен на рис. 3.41. Питание к электронному оборудованию подводится с помощью четырех вертикальных и четырех горизонтальных пакетов шин питания: Вертикальные пакеты шин питания 1 расположены по два в боковых зонах стойки. Рам-

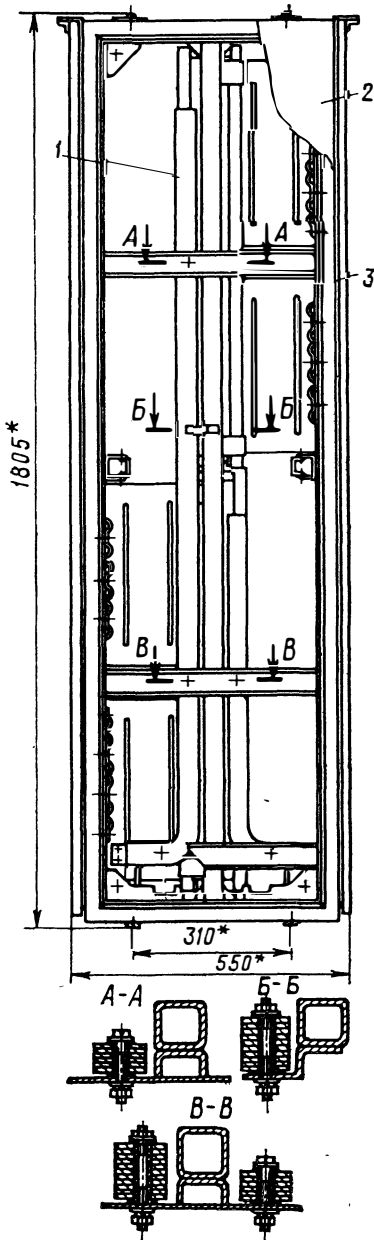


Рис. 3.41. Стойка высокопроизводительной ЕС ЭВМ

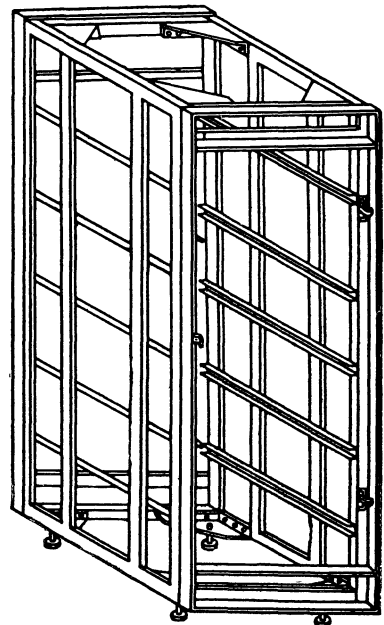


Рис. 3.42. Конструкция каркаса стойки для выдвижных блоков

ные пакеты шин питания устанавливаются горизонтально на раму. Каждый пакет может содержать до 13 медных шин. Соединение стоечного пакета шин питания с рамным выполняется проводом БПВЛ сечением 35 мм^2 . Рамные шины к узлам подвода питания на панели подключаются перемычками из провода БПВЛ сечением $2,5 \text{ мм}^2$ симметрично с двух сторон для уменьшения «перекосов» питания. Конструкция вертикального пакета шин питания *1* и способы его крепления

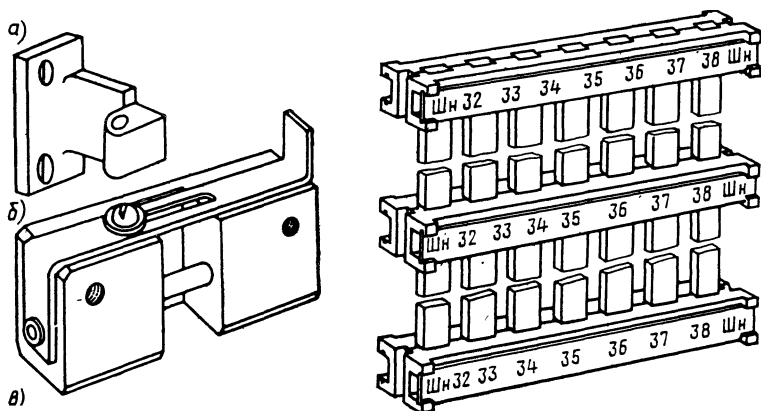


Рис. 3.44. Группа шин

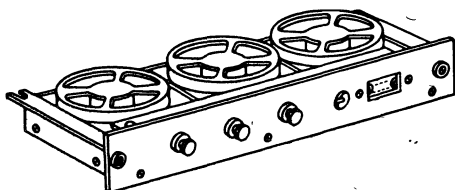


Рис. 3.45. Блок вентиляторов

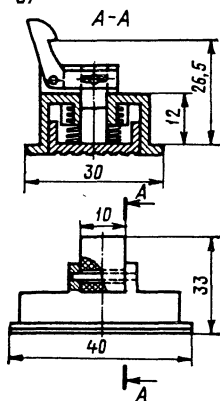


Рис. 3.43. Петля подвески дверей (а), держатель (б) и защелка (в)

показаны на сечениях А—А, Б—Б и В—В. С боковых сторон стойка закрывается съемными щитами 2, с передней и задней сторон навешиваются открывающиеся двери 3.

Каркас стойки (рис. 3.42), предназначенной для установки выдвижных блоков, собран из уголковых нормализованных профилей, сочлененных в углах литыми тройниками. Блоки вставляются по направляющим. С передней и задней сторон стойки навешиваются одностворчатые двери. Петля (а) и держатель (б) используются для подвески дверей, которые фиксируются защелками (в) (рис. 3.43). Для разводки питания 220 В и номиналов постоянного напряжения для электронного оборудования, размещенного в стойке, применяют группы шин (рис. 3.44). Оборудование стойки охлаждается вентиляторами (рис. 3.45).

Типовые конструкции от воздействия внешней среды защищают лакокрасочными покрытиями; элементы, устанавливаемые на ТЭЗ (кроме разъемной части), а также сами платы — лаком УР-231. Покрытие получается влагостойкое, глянцевое, твердое, механически прочное, обладает хорошей адгезией к черным, цветным металлам и пластмассам, выдерживает температуру от 213 до 393 К, обладает электроизоляционными свойствами. Для окраски стоек применяют эмали на перхлорвиниловой основе типа ХР-12416. Покрытие получается полуматовое, средней твердости, механически прочное, эластичное, негорючее, выдерживает температуры от 213 до 363 К.

§ 3.5. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Повышение сложности и плотности компоновки ЭВМ, увеличение уровня интеграции элементной базы приводит к возрастанию числа выводов на единице площади и усложнению монтажа электрических соединений. Электрические соединения должны иметь: высокую надежность; требуемые значения электрических параметров и их постоянство; минимальные габаритные размеры и массу; высокую ремонтпригодность, а также обеспечивать: нормальную работу электронных схем в условиях механических и климатических воздействий; помехоустойчивость конструктивной реализации схемы; удобство и безопасность работы при ремонте и эксплуатации.

Исходным документом для выполнения электрических соединений являются электромонтажные схемы. Электрические соединения должны полностью соответствовать техническим условиям, принципиальным и электромонтажным схемам, а также монтажным таблицам. Электромонтажные работы проводят по соответствующим инструкциям, в которых указываются применяемое оборудование и оснастка, режимы работы оборудования, требования к элементам электромонтажа. Метод монтажа должен быть технологичным и позволять автоматизировать его выполнение.

Все электрические соединения можно разделить на два вида: неразъемные и разъемные. Неразъемные электросоединения в свою очередь делят на постоянные, выполняемые сваркой, полупостоянные — пайкой, накруткой и обжимкой, и временные — типа «лепесток — винт».

Способ электромонтажа и его элементы выбирают с учетом назначения ЭВМ, конструктивно-технологических и эксплуатационных требований, предъявляемых к ЭВМ и ее типовым конструкциям. По виду используемых проводников монтаж можно разделить на печатный и объемный. Основные элементы печатного монтажа были рассмотрены в § 3.2. Печатный монтаж снижает трудоемкость монтажно-сборочных работ и создает условия для их механизации. В то же время печатный монтаж имеет и ряд недостатков, к ним относятся: возможность только плоского расположения печатных проводников на плате; необходимость одновременной запайки выводов всех элементов, установленных на печатной плате; трудоемкость проектирования; низкая ремонтпри-

годность; недостаточно высокая надежность МПП при больших ее габаритах.

Проводной монтаж. Объемный монтаж широко применяют в типовых конструкциях, начиная с панелей (блоков) или кассет, и реже — в субблоках. В ряде ЭВМ для внутрипанельных соединений используют МПП, однако это требует создания уникальных печатных плат высокой сложности, что не всегда экономически оправдано. Мягкий (жгутовой) монтаж внутрислоежных соединений выполняют многожильным (реже одножильным) проводом. Проводник приваривают к запрессованному в плату металлическому штырям (рис. 3.46, а). Способы

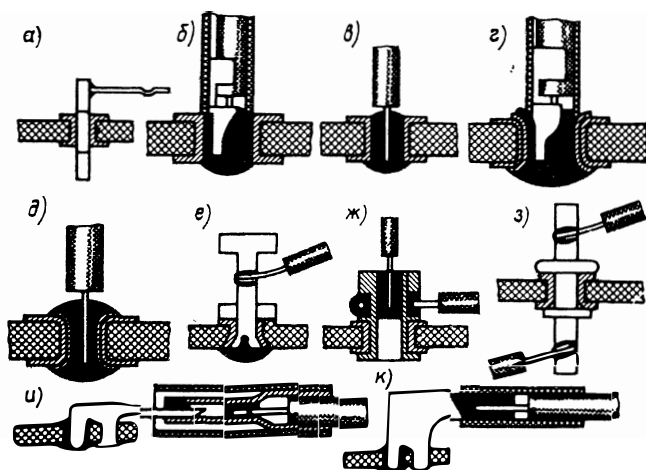


Рис. 3.46. Способы монтажа проводов

пайки проводников к печатным платам изображены на рис. 3.46: пайка объемного провода в металлизированное отверстие с использованием кабельного наконечника (б) и без него (в), переходных пистонов (г и д), монтажных лепестков (е, ж, з) и специальных контактов (и, к).

Монтаж методом накрутки производится одножильным проводом на металлические штыри с острыми кромками (рис. 3.47, а, б). Выводы рекомендуется делать квадратного или прямоугольного сечения из бронзы, допускается другая форма сечения при наличии не менее двух острых кромок. Заборная часть штыря должна иметь конусную или сферическую форму. Накручивают провод с натягом, что обеспечивает хороший электрический контакт. Накрутка легко автоматизируется и характеризуется высокой надежностью. Зависимость числа витков в накруточном соединении от диаметра жилы провода приведена ниже:

Диаметр жилы провода, мм	до 0,3	0,31—0,4	0,41—0,5	0,51—0,60	0,61—1,2	более 1,2
Количество вит- ков	8—10	7	6	5	4	3

При бандажировании, так же как и при накрутке, электрическое соединение обеспечивается за счет холодного контактирования. Бандаж

осуществляют проволокой (не менее восьми витков) или пружинными захватами (рис. 3.47, в, г). Расстояние между выводами при бандажировании и накрутке не менее 2,5 мм. На одном выводе следует выполнять не более трех соединений накруткой или двух бандажированием. Накруточное и бандажное соединения характеризуются высокой ремонтпригодностью. Для внутрисанельных и межпанельных связей используются как одиночные провода, так и витые пары. В витой паре один провод сигнальный, другой экранирующий, оба его конца заземляются. Проводной монтаж подсоединяется к выводам ответных частей соединителей ТЭЗ пайкой или накруткой.

При выборе проводника необходимо учитывать условия эксплуатации, нагрузку по току и допустимое

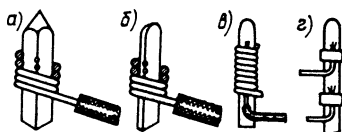


Рис. 3.47. Соединение накруткой и бандажное

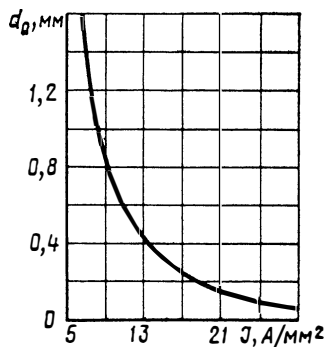


Рис. 3.48. Зависимость допустимого диаметра проводника от плотности тока

падение напряжения. Исходя из допустимого падения напряжения по постоянному току $[U]_{п}$, диаметр сигнального провода (мм)

$$d_{min} \geq \sqrt{\rho 4l I_{п} / (\pi [U]_{п})}, \quad (3.10)$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника, Ом · мм²/м; l — длина проводника, м; $I_{п}$ — ток через проводник, А.

Рассчитанное значение d_{min} необходимо уточнить с учетом его допустимого перегрева. На рис. 3.48 показана зависимость диаметра проводника от плотности проходящего по нему тока, вызывающего перегрев проводника на 20° относительно температуры окружающей среды. Плотность тока

$$J = 4I_{п} / (\pi d_{min}^2). \quad (3.11)$$

Затем по графику находят значение диаметра d_0 , обеспечивающее допустимый перегрев. Если $d_0 > d_{min}$, то в качестве требуемого принимается значение d_0 .

Длинные и тонкие проводники имеют небольшую жесткость и устойчивость, поэтому при динамических нагрузках меняется их расположение. Критерием жесткости проводника может служить соотношение

$$\sqrt{l^3/d} \leq 300. \quad (3.12)$$

Одножильные проводники рекомендуется применять либо в стационарных ЭВМ, либо при условии их жесткой фиксации. В специали-

зированных ЭВМ, работающих при интенсивных механических воздействиях, целесообразно использовать многожильные проводники или принимать специальные меры их фиксации (рис. 3.49) посредством пропускания проводников в неметаллизированные отверстия (а) или прижимом с помощью планки (б). В нестационарных ЭВМ для крепления проводников используются гибкие (резиновые) ремни с перфорированными отверстиями (рис. 3.49, в).

Для внутрипанельных соединений и для подвода питающих напряжений можно использовать жесткий (струнный) монтаж. На монтажных платах во взаимно перпендикулярных направлениях устанавливают перфорированные планки (рис. 3.49, г), в которых крепят жесткие проводники.

Перспективным, в том числе и для межсоединений в субблоках, является метод монтажа запрессовкой проводников. Суть метода в следующем: сторона платы, свободная от элементов, покрывается адгезионным слоем. Устройство с программным управлением в соответствии с таблицей соединений раскладывает и фиксирует изолированные проводники, которые могут пересекаться. Затем проводники запрессовываются и заливаются компаундом. Этот метод монтажа характеризуется простотой проектирования, высокой плотностью и надежностью соединений, прочностью и устойчивостью к климатическим воздействиям.

Плоские кабели. В стационарных ЭВМ плоские кабели используют преимущественно для связей между панелями, рамами и стойками. В специализированных ЭВМ плоскими кабелями могут выполняться электрические соединения между субблоками. Применение плоских кабелей облегчает сборочные операции, повышает надежность монтажных соединений и их устойчивость к климатическим воздействиям, приводит к снижению объема и веса ЭВМ, позволяет осуществлять монтаж в трех плоскостях за счет изгиба и скручивания. В настоящее время существуют гибкие печатные, тканые и опрессованные кабели.

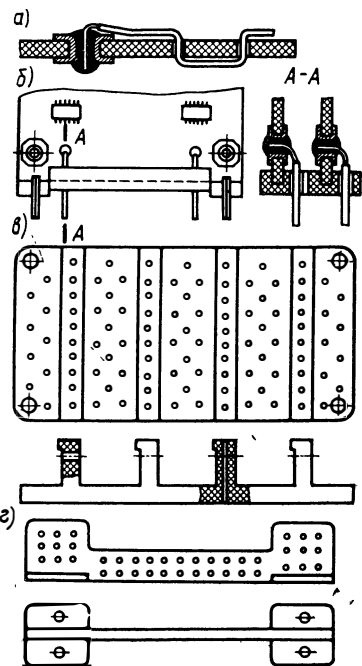


Рис. 3.49. Способы фиксации проводов

Гибкие печатные кабели (ГПК), изготавливаемые на основе тонкого фольгированного диэлектрика, могут оканчиваться металлизированными контактными площадками с отверстиями и без них (рис. 3.50, а, б) или контактными лепестками (рис. 3.50, в). Шаг расположения контактных площадок или лепестков должен быть кратен 1,25 мм. Для крепления ГПК с отверстиями в металлизированных площадках используются переходные колодки, штырьковые выводы которых соединяют пай-

кой с печатными проводниками ГПК и металлизированными отверстиями печатной платы (рис. 3.51, а). Крепление ГПК, оканчивающихся контактными площадками без отверстий или лепестками, может осуществляться с помощью прижимной планки (б) или скобы (в). Электрическое подсоединение ГПК производится пайкой их выводов к контактным площадкам печатной платы. Длину ГПК рекомендуется выбирать в пределах 350 мм, а ширину — до 150 мм.

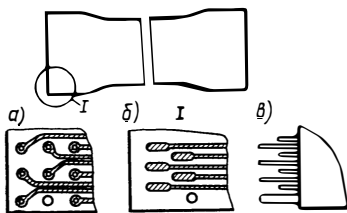


Рис. 3.50. Гибкий печатный кабель

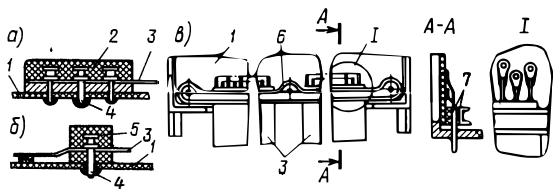


Рис. 3.51. Крепление гибкого печатного кабеля переходной колодкой (а), планкой (б) и скобой (в): 1 — плата печатная; 2 — колодка; 3 — кабель гибкий печатный; 4 — крепежный штырь; 5 — планка; 6 — скоба; 7 — прокладка

Гибкий опрессованный кабель изготавливают запрессовкой проводов в гибкий диэлектрик. Тканые кабели получают переплетением проводов лавсановой или капроновой нитью. При необходимости тканые кабели могут составлять различные линии связи (одиночные провода, витые пары, коаксиальные кабели). В тканых кабелях легко делать ответвления в необходимых местах. Гибкие опрессованные и тканые кабели крепят к печатным платам колодками (рис. 3.52) и прижимными скобами. Плоские кабели рекомендуется использовать при длине соединения более 40 мм.

Разъемы. Контактные разъемные соединители применяют для быстрой замены субблоков, кассет и блоков при наладке и эксплуатации ЭВМ. Электрическое соединение в разъеме осуществляется за счет холодного контактирования пары штырь — гнездо. Разъем состоит из двух деталей: вилки и розетки. Вилка (розетка) — это совокупность штырей (гнезд) контактных пар, имеющая законченное конструктивное оформление. Разъем должен обеспечивать высокую надежность электрических соединений, иметь небольшие габариты, массу, ключ и элементы крепления. В некоторых конструкциях предусматриваются ловители, например отверстия и штыри в вилке (а) и розетке (б), как в разъеме ГРПМ9 (рис. 3.53). В качестве ключа могут использоваться различные выступы и пазы в корпусе разъема, разные диаметры штырей-ловителей и т. п.

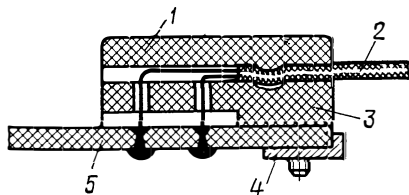


Рис. 3.52. Крепление опрессованного кабеля колодкой:

1 — крышка; 2 — опрессованный кабель; 3 — корпус колодки; 4 — захват; 5 — печатная плата

Разъемы характеризуются интенсивностью отказов, предельным числом сочленений, усилием сочленения и расчленения, диапазоном рабочего тока и напряжения. К электрическим параметрам контактных пар относятся переходное сопротивление, собственная индуктивность, взаимные емкость и индуктивность. Контакты в разьеме могут иметь одно-, двух-, трех- и четырехрядное расположение. Шаг контактов

равен или кратен шагу координатной сетки, т. е. 1,25 мм. Выводы разъемов с печатными платами соединяют пайкой в металлизированные отверстия или к контактным площадкам.

В ЭВМ третьего поколения широко используются разъемы с гиперболоидными контактами типа ГРПМ, ГРППМ и разъемные соединители типа СНП. Перечень и краткая характеристика некоторых из них приведены в табл. 3.3.

В разъемах типов ГРПМ (разъем прямоугольный малогабаритный с гипербо-

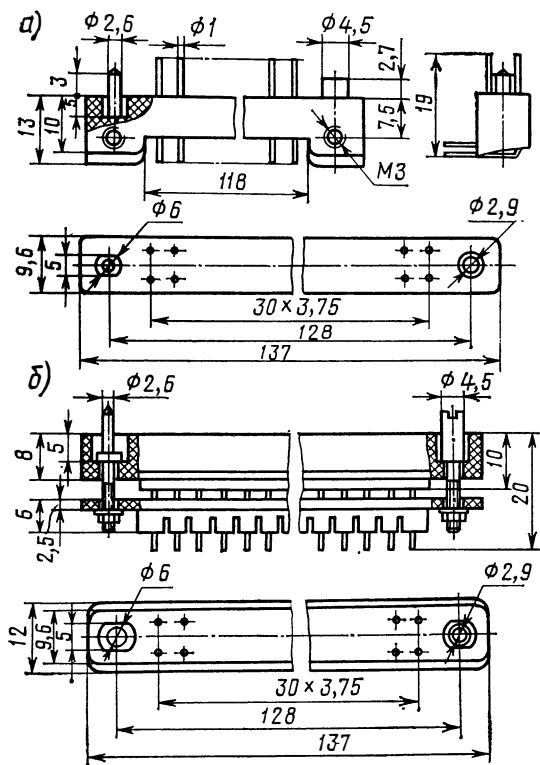


Рис. 3.53. Конструкция вилки (а) и розетки (б) разъема ГРПМ9-62

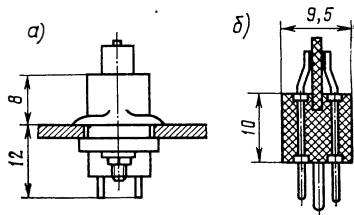


Рис. 3.54. Установка розетки ГРПМ9-6С (а) и вилки ГРПМ9-3Н (б)

идными контактами) и ГРППМ (разъем прямоугольный для печатного монтажа малогабаритный с гиперболоидными контактами) цифры после букв обозначают номер разъема, число после дефиса — количество контактов, первая буква после числа — вид части разъема (Ш — вилка, Г — розетка), далее указывается условное обозначение конструктивного исполнения. Например, ГРПМ9-30ГС — розетка на 30 контактов для струнного монтажа, ГРПМ1-45ШУ — вилка на 45 контактов с угловыми выводами под печатный монтаж (выводы запаиваются в металлизированные отверстия), ГРПМ9-42ШН — вилка на 42 контакта (выводы припаиваются к контактным площадкам печатной

Таблица 3.3

Тип разъема	Число контактов	Назначение		Рядность, рас- положения контактов	Установочный размер L , мм
		Вилка	Розетка		
ГРПМ1	31; 45; 61	Под печатный монтаж	Под печатно- объемный монтаж	2	61; 92; 120
	90	То же		3	120
	122	Под печатно- объемный монтаж		4	120
ГРПМ2	30; 46; 62; 90; 122	Под объемный монтаж	—	4	40; 54; 68; 92; 120
ГРПМ9	18; 30; 42; 52; 62	Под печатный монтаж	Под печатно- объемный (струн- ный) монтаж	2	45; 68; 90; 110; 129
ГРПМ5	18; 35	То же	Под объемный монтаж пайкой	2	50,5; 93
ГРПМ7	18; 30; 48; 64; 90	Под печатный и объемный монтаж (накруткой и пайкой)	Под печатный монтаж	2	31; 46; 68,5; 88,5; 125
ГРПМ8	16; 32; 48	Под печатный монтаж и объем- ный монтаж на- круткой	То же	2	46; 88,5; 125
ГРПМ10	18; 30; 48; 64; 90	Под печатный монтаж	Под печатный монтаж и объем- ный монтаж пай- кой	2	35; 50; 72,5; 92,5; 125
СНП34	20; 30; 46; 69; 90; 113; 135	Под печатный монтаж и объем- ный монтаж на- круткой	Под печатный монтаж	2 или 3	125
РППМ17	12; 16; 20; 24; 30; 36; 44; 52; 56	В качестве вил- ки используется печатная плата толщиной $1,5 \pm$ $\pm 0,2$ мм	Под объемный монтаж накруткой	2	$L = B + 15$, где $B = 5 \times$ $\times (m/2 - 1)$, m — число контактов

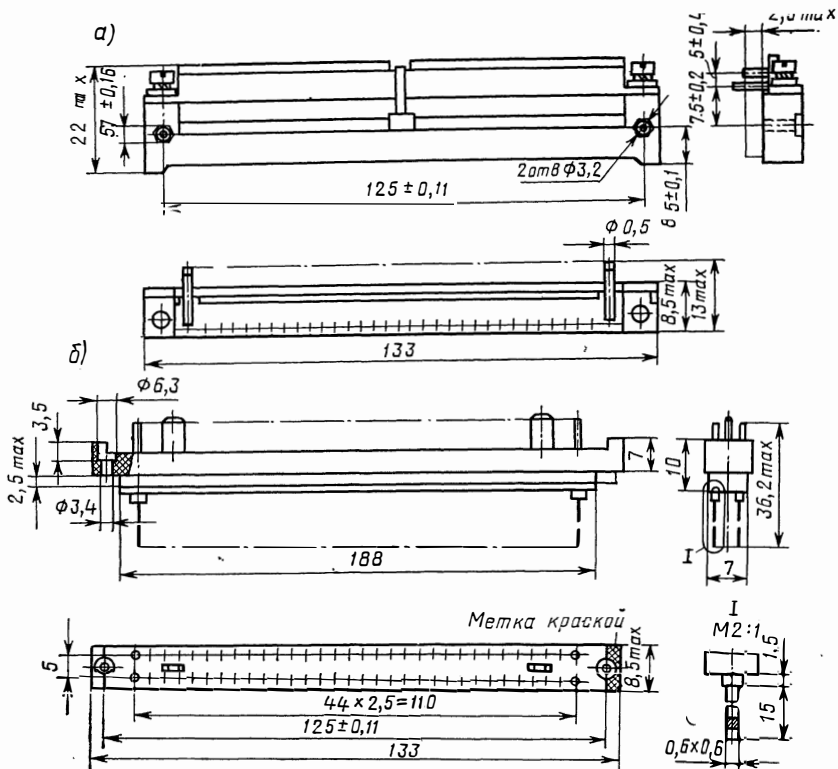


Рис. 3.55. Навесной штепсельный разъем ГРППМ7-90

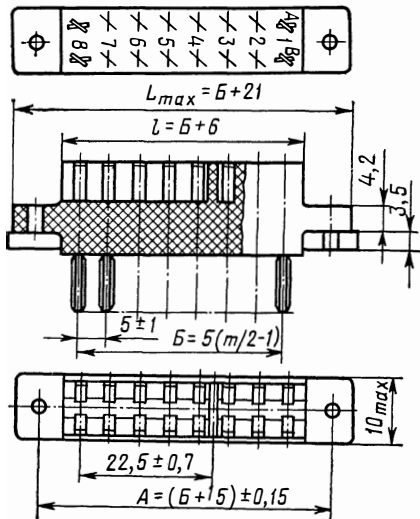


Рис. 3.56. Розетка соединителя РППМ17

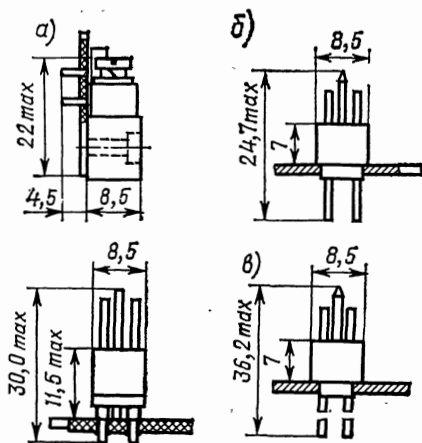


Рис. 3.57. Установка разъема ГРППМ7: а — розетка ГРППМ7-Г и вилка ГРППМ7-Ш; б — вилка ГРППМ7-ШО; в — вилка ГРППМ7-ШН

платы). Установка розетки ГРПМ9-ГС и вилки ГРПМ9-ШН показана на рис. 3.54, а, б соответственно.

В разъемах типа ГРПМ для различного конструктивного исполнения используются обозначения: О — розетка неплавающая и вилка с контактами под объемный монтаж пайкой, ПЛ — розетка плавающая с контактами под объемный монтаж пайкой, А — вилка с удлиненными хвостовиками штырей, Н — вилка с хвостовиками под объемный монтаж накруткой, Б — вилка с уменьшенным межрядным расстоянием хвостовиков штырей. Навесной штепсельный разъем ГРПМ7-90 [розетка (а) и вилка (б)] показан на рис. 3.55, розетка РППМ17 под печатную вилку — на рис. 3.56, установка разъема ГРПМ7 и розетки РППМ17 — на рис. 3.57 и 3.58 соответственно.

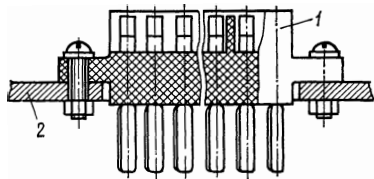


Рис. 3.58. Установка розетки РППМ17:

1 — розетка; 2 — шасси

В обозначении разъема СНП после дефиса указывается число контактов, буквой — вид части разъема (В — вилка, Р — розетка). Например, СНП34-69Р — розетка на 69 контактов, СНП34-135В — вилка на 135 контактов. Конструкция вилки (а) и розетки (б) соединителя СНП34 представлена на рис. 3.59 соответственно. Пример установки розетки соединителя СНП34 дан на рис. 3.60.

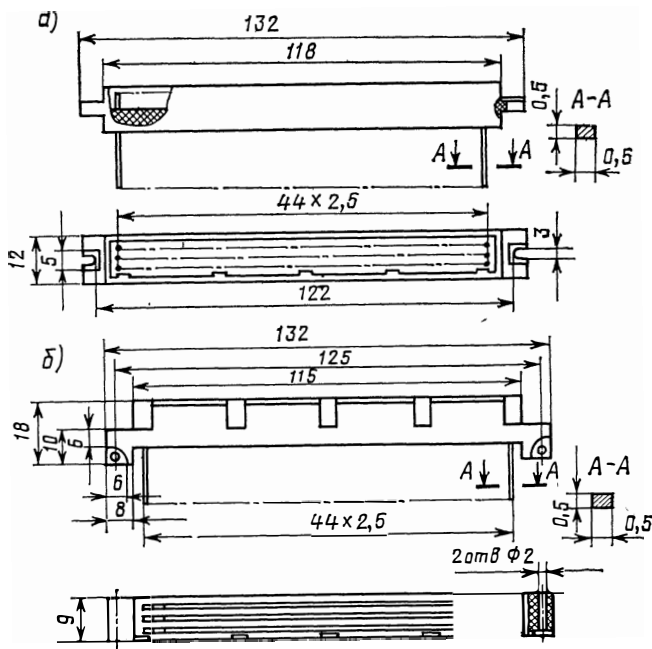


Рис. 3.59. Вилка (а) и розетка (б) соединителя СНП34

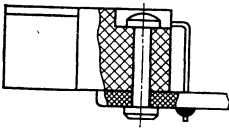


Рис. 3.60. Установка розетки соединителя СНПЗ4

Для электрических межблочных соединений используют также разъемы РПКМ, 2РМТ-А1, 2РМДТ-А1, ГРПМ-2, МР1 и т. д. Резьбовые соединители обеспечивают высокую надежность контактирования в условиях интенсивных механических воздействий.

Соединительные платы и гребенки. Для электрического соединения субблоков и монтажных проводов с коммутационной платой применяют соединительные платы (переходники) и гребенки. Выводы переходников и гребенок могут запаиваться в металлизированные отверстия печатных плат или припаиваться к контактным площадкам. Подсоединя-

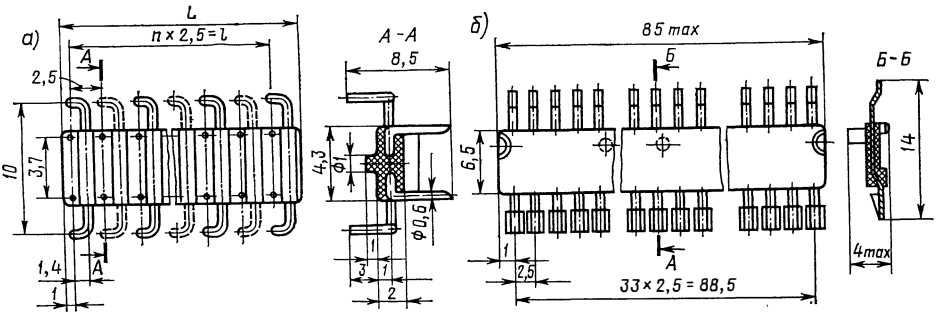
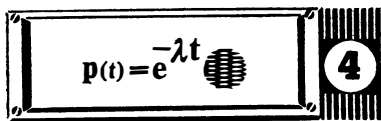


Рис. 3.61. Плата соединительная со штырьковыми (а) и лепестковыми (б) выводами

ются монтажные провода пайкой или накруткой. Соединительные платы и гребенки рекомендуется располагать по краям печатных плат, допускается их установка в зоне печатного монтажа. Шаг контактов переходников и гребенок должен быть кратен 1,25 мм. Лепестки соединительных плат могут использоваться для подключения элементов контроля работоспособности. На рис. 3.61, а показана плата соединительная со штырьковыми выводами на 7, 14, 28, 35 контактов. Плата соединительная с лепестковыми выводами на 33 контакта изображена на рис. 3.61, б.

Рис. 3.62. Установка гребенки на коммутационную плату

На рис. 3.62 представлена гребенка для подсоединения экранирующего провода витой пары и способ ее установки на коммутационную ДПП подвода потенциала «земли» к ТЭЗ панели ЕС ЭВМ.



КОНСТРУИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

§ 4.1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Одна из важнейших задач, стоящих перед конструкторами, — разработка ЭВМ и систем, обладающих высокой экономической и технической эффективностью, которая в значительной степени определяется их надежностью.

Надежность системы или отдельных ее элементов — свойство системы (элементов) выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в необходимых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования (ГОСТ 13377—75). Система или ЭВМ может находиться в одном из двух состояний: исправном и неисправном. Если система соответствует всем требованиям нормативно-технической документации (в том числе и второстепенным, характеризующим внешний вид и удобство эксплуатации), то она *исправна*, при несоответствии хотя бы одному требованию — *неисправна*.

Состояние системы, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя требуемые значения определенных параметров, называется *работоспособным*. Система находится в *неработоспособном* состоянии, если хотя бы один параметр, характеризующий способность системы выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Событие, состоящее в частичной или полной утрате работоспособности ЭВМ и приводящее к невыполнению или неправильному выполнению тестов или задач, называется *отказом* (ГОСТ 16325—76).

Временная утрата работоспособности ЭВМ или системы, характеризующаяся возникновением ошибки при выполнении тестов или задач, определяется как *сбой*. Различают объекты невосстанавливаемые и восстанавливаемые. К невосстанавливаемым относятся комплектующие электрорадиоэлементы и некоторые специализированные ЭВМ, к восстанавливаемым — ЭВМ общего назначения и большинство специализированных. Для невосстанавливаемых объектов случайной величиной является наработка до первого отказа, а для восстанавливаемых — время работы между отказами и время восстановления работоспособности. Для восстановления работоспособности ЭВМ при отказе требуется проведение ремонта или регулировки устройств, а при сбое — повторное решение теста или задач или повторных их загрузок для решения.

Отказы по своему характеру делятся на *внезапные* и *постепенные*. Внезапные отказы характеризуются резким скачкообразным измене-

нием параметра. Устраняют внезапные отказы заменой отказавшего элемента или его ремонтом. Постепенные отказы возникают в результате изменения параметров элементов до тех пор, пока значение хотя бы одного из них не выйдет за установленные пределы. Устранение постепенного отказа возможно заменой, ремонтом отказавшего элемента или регулировкой соответствующего параметра. Внезапные отказы обуславливаются скрытыми технологическими, конструкторскими и другими дефектами, постепенные — старением элементов, воздействием окружающей среды и т. п.

Признаки отказов — непосредственные или косвенные воздействия на органы чувств наблюдателя явлений, характерных для неработоспособного состояния ЭВМ (изменение показателей системы индикации и т. п.).

С точки зрения надежности ЭВМ обладают следующими свойствами: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность — это свойство ЭВМ непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

Долговечность — свойство ЭВМ сохранять при выполнении технического обслуживания и ремонтов работоспособность до наступления предельного состояния.

Ремонтпригодность — это приспособляемость ЭВМ к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и их устранению путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость — это свойство ЭВМ непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Количественно свойства, составляющие надежность ЭВМ, характеризуются единичными или комплексными показателями надежности. Единичный показатель надежности относится к одному из свойств надежности, комплексный — к нескольким. Единичные показатели рассчитываются для типовых конструкций и ЭВМ в целом, комплексные — для ЭВМ и систем в целом.

Невосстанавливаемые ЭВМ. Характеризуются следующими показателями надежности: интенсивностью отказов, средней наработкой до первого отказа и вероятностью безотказной работы. *Интенсивность отказов* $\lambda(t)$ — это условная плотность вероятности возникновения отказа к моменту времени t при условии, что до этого момента отказ не возник (1/ч):

$$\lambda(t) = f(t) / [1 - \int_0^t f(t) dt], \quad (4.1)$$

где $f(t)$ — плотность распределения наработки до отказа.

По результатам статистических испытаний интенсивность отказов (1/ч)

$$\lambda(t) = [N(t) - N(t + \Delta t)] / [N(t)\Delta t], \quad (4.2)$$

где $N(t)$ и $N(t + \Delta t)$ — число объектов, работоспособных к моменту времени t и $(t + \Delta t)$ соответственно; Δt — длительность интервала испытаний.

Характер зависимости интенсивностей для внезапных 1 и постепенных 2 отказов от времени представлен на рис.4.1. Для внезапных отказов интервал времени $(0 - t_1)$ является временем приработки. Для этого интервала $\lambda(t) = \text{var}$. Интервал времени $(t_1 - t_2)$, для которого $\lambda(t) = \text{const}$ и имеет минимальное значение, соответствует нормальному периоду работы аппаратуры. Начиная со времени t_2 , интенсивность отказов растет, что обуславливается старением и износом деталей. Расчет надежности аппаратуры делается для периода нормальной эксплуатации $(t_1 - t_2)$, которому соответствует экспоненциальный закон плотности распределения наработки до отказа:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (4.3)$$

Средняя наработка до отказа определяется как математическое ожидание наработки до отказа:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt, \quad (4.4)$$

а с учетом (4.3)

$$t_{cp} = 1/\lambda. \quad (4.5)$$

Вероятность безотказной работы, т. е. вероятность того, что не будет отказа в пределах заданной наработки:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt; \quad (4.6)$$

для внезапных отказов

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad (4.7)$$

для постепенных отказов при нормальном законе распределения плотности вероятностей наработки до отказа

$$P(t) = 1/(\sqrt{2\pi}\sigma) \int_t^{\infty} e^{-(t-t_{cp})^2/(2\sigma^2)} dt, \quad (4.8)$$

где σ^2 — дисперсия средней наработки до отказа.

Для режимов хранения и транспортирования вероятность возникновения отказов и среднее время до отказа определяются аналогично с заменой наработки до отказа длительностью хранения до отказа.

Восстанавливаемые ЭВМ. Характеризуются следующими показателями надежности: параметром потока отказов, наработкой на отказ, наработкой на сбой, вероятностью безотказной работы, средним временем восстановления, коэффициентом технического использования и коэффициентом готовности.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ — плотность вероятности возникновения отказов в данный момент времени, статистически определяемый как

$$\omega(t) = \frac{1}{N\Delta t} \left[\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t) \right], \quad (4.9)$$

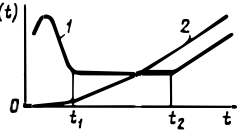


Рис. 4.1. Зависимость интенсивности отказов от времени

где $m_i(t)$ и $m_i(t + \Delta t)$ — число отказов каждого из образцов ЭВМ в момент времени t и $(t + \Delta t)$ соответственно.

После периода приработки ЭВМ характеристика потока отказов становится линейной, а ω — постоянной.

Наработка на отказ T_o — это отношение наработки восстанавливаемой ЭВМ к математическому ожиданию числа ее отказов в течение этой наработки. После окончания периода приработки

$$T_o = 1/\omega. \quad (4.10)$$

Статистически наработка на отказ (средняя)

$$\widehat{T}_o = \sum_{i=1}^N t_i^r / N_r, \quad (4.11)$$

где t_i^r — наработка на r -й отказ i -й ЭВМ; N_r — число отказов N ЭВМ.

Наработка на сбой $T_{сб}$ — это среднее значение наработки ЭВМ между сбоями. Статистически определяется по (4.11), в которой N_r — число сбоев N ЭВМ, t_i^r — наработка на r -й сбой i -й ЭВМ.

Вероятность безотказной работы $P(t, \tau)$ восстанавливаемых ЭВМ определяется как вероятность того, что не будет отказа в интервале времени $(t, t + \tau)$. Этот показатель надежности используется редко.

Среднее время восстановления T_v — это математическое ожидание времени восстановления работоспособности ЭВМ, статистически определяемое как

$$\widehat{T}_v = \sum_{i=1}^m \tau_i / m, \quad (4.12)$$

где τ_i — время, необходимое для обнаружения и устранения i -го отказа; m — число отказов.

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ определяется как математическое ожидание времени работоспособного состояния ЭВМ к сумме математических ожиданий времени неработоспособного состояния, технического обслуживания и ремонтов за некоторый период эксплуатации. На основании статистических данных

$$\widehat{K}_{т.и} = \sum_{i=1}^N t_i^p / (NT_{экспл}), \quad (4.13)$$

где t_i^p — время пребывания i -й ЭВМ в работоспособном состоянии; N — число наблюдаемых ЭВМ; $T_{экспл}$ — продолжительность эксплуатации (сумма интервалов времени работы, технического обслуживания и ремонтов).

Коэффициент готовности K_r — это вероятность того, что ЭВМ окажется в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме периодов, в которые ее использование не планируется. Статистически

$$\widehat{K}_r = \sum_{i=1}^N t_i^p / (NT_{раб}), \quad (4.14)$$

где $T_{раб}$ — продолжительность работы, состоящая из чередующихся интервалов времени работы и восстановления.

**§ 4.2. ОЦЕНКА
ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭВМ
КАК СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА**

Под сложным понимается объект, состоящий из нескольких одновременно функционирующих отдельных объектов, причем отказы каждого приводят к отказу сложного объекта. Отказы отдельных объектов считаются независимыми, т. е. отказ одного не приводит к отказу других. ЭВМ состоит из ряда устройств (элементов), для которых обычно выполняются указанные допущения.

Наработка на отказ ЭВМ (устройств)

$$T_o = \sum_{i=1}^N (T_i/n_i), \quad (4.15)$$

где N — число типов элементов в ЭВМ (устройстве); T_i — наработка на отказ элемента i -го типа; n_i — число элементов i -го типа, отказ которых приводит к отказу ЭВМ (устройства).

При экспоненциальном законе распределения наработки на отказ

$$T_i = 1/\lambda_i. \quad (4.16)$$

Для ЭВМ рассчитывается средняя суммарная интенсивность отказов с учетом использования входящих в нее устройств:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{N_y} \lambda_{iy} K_i. \quad (4.17)$$

где N_y и λ_{iy} — соответственно число устройств ЭВМ и их интенсивность отказов; K_i — коэффициент, учитывающий использование устройства i -го типа в составе ЭВМ.

В соответствии с теоремой умножения вероятностей вероятность безотказной работы

$$P(t, \tau) = \prod_{i=1}^N P_i^{n_i}(t, \tau), \quad (4.18)$$

где $P_i^{n_i}$ — вероятность безотказной работы в $(t, t + \tau)$ интервале времени n элементов i -го типа. При экспоненциальном законе распределения

$$P_i^{n_i}(t, \tau) = e^{-\tau \lambda_i n_i}. \quad (4.19)$$

Время восстановления ЭВМ как сложного объекта оценивается по показателям надежности входящих в него устройств:

$$T_v = \sum_{i=1}^{N_y} (\lambda_{iy} K_i T_{viy}/\Lambda), \quad (4.20)$$

где T_{viy} — среднее время восстановления i -го устройства.

При условии среднесуточной непрерывной работы ЭВМ в течение года коэффициент технического использования

$$K_{т.и} = [(T_{вкл} - T_{т.о.ср}) (1 - T_v/T_o - T_{в.сб}/T_{сб}) - T_{п}]/T_{вкл}, \quad (4.21)$$

где $T_{\text{вкл}}$ — время работы ЭВМ в течение суток (24 ч); $T_{\text{т.о.ср}}$ — среднесуточное время технического обслуживания и подготовки ЭВМ к работе; $T_{\text{в}}$ — среднее время восстановления; $T_{\text{о}}$ и $T_{\text{сб}}$ — наработка на отказ и сбой ЭВМ соответственно; $T_{\text{в.сб}} = 0,1 \cdot T_{\text{в}}$ — среднее время потерь при сбое; $T_{\text{п}} = 0,05 \cdot T_{\text{вкл}}$ — среднесуточное время потерь, связанных с ошибками оператора, и т. п.

При экспоненциальном распределении наработки на отказ $T_{\text{о}}$ и времени восстановления $T_{\text{в}}$ коэффициент готовности

$$K_{\text{г}}(t) = \frac{1}{1+\alpha} \left[1 + \alpha \exp\left(-\frac{1+\alpha}{\alpha} \frac{t}{T_{\text{о}}}\right) \right], \quad (4.22)$$

где $\alpha = T_{\text{в}}/T_{\text{о}}$.

При условии, что период приработки закончился, и при немедленном восстановлении ЭВМ после отказа коэффициент готовности

$$K_{\text{г}} = T_{\text{о}}/(T_{\text{о}} + T_{\text{в}}). \quad (4.23)$$

§ 4.3. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Исходными данными для расчета показателей надежности типовых конструкций ЭВМ являются: принципиальная схема с указанием типов деталей, входящих в нее; режимы работы всех деталей (электрические, климатические и механические); значения интенсивности отказов всех типов деталей при номинальных и фактических режимах, значения среднего времени безотказной работы и дисперсия для элементов, подверженных постепенным отказам.

Для типовых конструкций различного уровня рассчитываются следующие показатели: интенсивность отказов для типового элемента замены; интенсивность отказов и наработка на отказ для панели (блока); интенсивность отказов, наработка на отказ и среднее время восстановления для рамы и стойки. При оценке показателей надежности типовых модулей необходимо выявить те элементы конструкций, которые могут привести к их отказу («компоненты ненадежности»). К основным «компонентам ненадежности» типовых конструкций ЭВМ можно отнести: комплектующие элементы (интегральные схемы и электрорадиоэлементы); элементы монтажа (различного вида линии связи, сварные, паяные или термокомпрессионные соединения, разъемы, печатные платы, металлизированные отверстия). Для всех этих элементов преобладающими являются внезапные отказы.

По результатам анализа влияния на работоспособность типовой конструкции входящих в нее элементов составляется структурная схема надежности. Элемент включается в эту схему, если его отказ приводит к отказу типовой конструкции.

Суммарная интенсивность отказов типовой конструкции

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i n_i, \quad (4.24)$$

где N — число типов элементов в структурной схеме надежности; λ_i и n_i — интенсивность отказов и количество элементов i -го типа.

Наработка на отказ

$$T_0 = 1/\Lambda. \quad (4.25)$$

Интенсивность отказов комплектующих элементов, являющаяся их исходной характеристикой надежности, зависит от режима работы и степени тяжести таких внешних воздействий, как температура, тепловой удар, влажность, вибрации, линейные ускорения, удары, радиация и т. п. Можно записать, что

$$\lambda = \lambda_0 K_1 K_2 \dots K_n,$$

где λ_0 — интенсивность отказов элемента при нормальных условиях работы (температура окружающей среды $\theta = +298 \pm 10$ К, относительная влажность $65 \pm 15\%$, коэффициент электрической нагрузки $K_n = 1$); K_1, K_2, \dots, K_n — поправочные коэффициенты, учитывающие режимы работы и условия эксплуатации.

Для учета влияния режима работы на интенсивность отказов электрорадиоэлементов вводится коэффициент нагрузки $K_n = H_{\text{раб}}/H_{\text{ном}}$, равный отношению нагрузки в рабочем режиме к нагрузке в номинальном режиме.

Коэффициент нагрузки для транзисторов

$$K_{\text{н1 тр}} = P_{\text{к.раб}}/P_{\text{к.ном}}; \quad K_{\text{н2 тр}} = U_{\text{к.э.раб}}/U_{\text{к.э.ном}};$$

$$K_{\text{нз}} = I_{\text{к.раб}}/I_{\text{к.ном}};$$

для резисторов

$$K_{\text{н.р}} = P_{\text{раб}}/P_{\text{ном}};$$

для конденсаторов

$$K_{\text{н.к}} = U_{\text{раб}}/U_{\text{ном}};$$

для диодов

$$K_{\text{н1д}} = I_{\text{пр.раб}}/I_{\text{пр.ном}}; \quad K_{\text{н2д}} = U_{\text{обр.раб}}/U_{\text{обр.ном}};$$

для трансформаторов

$$K_{\text{нт}} = J_{i \text{ раб}}/J_{i \text{ ном}},$$

где J_i — плотность тока в i -й обмотке.

Для учета импульсных режимов работы элементов при подсчете основных электрических параметров в соответствующие формулы вводится скважность сигналов Q . Например, средняя мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{U^2}{R} \frac{t_{\text{и}}}{T} = \frac{U^2}{R} Q,$$

где $t_{\text{и}}$ — длительность импульса; T — длительность такта.

Относительная интенсивность отказов будет меняться в зависимости от коэффициента нагрузки и температуры, как показано на рис. 4.2.

Тепловой режим интегральных схем (ИС) значительно влияет на их интенсивность отказов. Зависимость относительной интенсивности от-

казов интегральных схем при их эксплуатации от температуры, т. е. поправочного коэффициента по температуре, показан на рис. 4.3. Для учета режима работы ИС вводится коэффициент, оценивающий в соответствии с временной диаграммой воздействие на нее сигналов верхнего и нижнего уровней по отношению к номинальному режиму ($K_{ИС}$).

На начальных этапах проектирования влияние внешних воздействий на интенсивность отказов для ЭВМ различного наз-

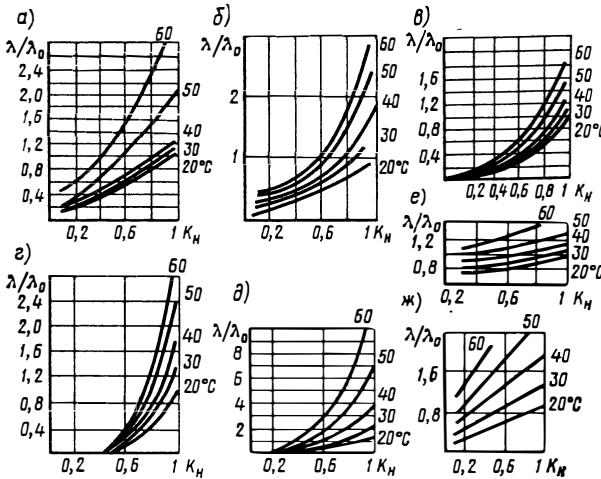


Рис. 4.2. Зависимость относительной интенсивности отказов от условий работы для непроволочных резисторов (а), для керамических (в) и бумажных и металобумажных (г) конденсаторов, для трансформаторов (д), для кремниевых (е) и германиевых (б) диодов, для германиевых триодов (ж)

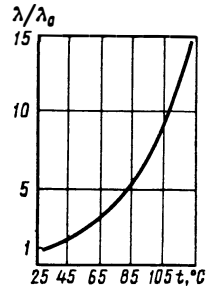


Рис. 4.3. Зависимость относительной интенсивности отказов ИС от температуры

начения может быть учтено с помощью интегрального поправочного коэффициента $K = \lambda/\lambda_0$. Значения поправочного коэффициента K для аппаратуры различного назначения приведены ниже:

Современные образцы ракет	700	Поезд	59
Ранние образцы ракет . . .	400	Автомобиль	50
Самолет	100	Корабль	40
Аппаратура для высокогор-		Наземная аппаратура	20
ной местности	68	Лабораторные условия	1

Пример 4.1. Рассчитать интенсивность отказов ТЭЗ и панели стационарной наземной ЭВМ. Конструкция ЭВМ обеспечивает заданные в ТУ нормальные условия эксплуатации компонентов, кроме температуры $t = 60^\circ\text{C}$. Исходными данными для расчета являются схемы принципиальные, спецификации, карты рабочих режимов, временные диаграммы и интенсивности отказов «компонентов ненадежности» в нормальных условиях эксплуатации.

Решение. По картам рабочих режимов и временным диаграммам подсчитывают коэффициенты, учитывающие режим работы компонентов и временной загрузки для ТЭЗ (пусть коэффициенты нагрузки резисторов $K_{н.р} = 0,6$, конденсаторов $K_{н.к} = 0,8$, интегральных схем $K_{ИС} = 1$ и коэффициент временной загрузки всех ТЭЗ панели $K_T = 1$).

По спецификациям и схеме принципиальной ТЭЗ определяем типы интегральных схем, дискретных компонентов и других элементов, входящих в схему основного соединения по надежности, и подсчитываем их количество.

По рис. 4.2, а, в и рис. 4.3 определяем поправочный температурный коэффициент для резисторов, конденсаторов и ИС. Некоторые исходные данные и промежуточные результаты для ТЭЗ сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Элемент	Температурный коэффициент	Интенсивность отказов $\lambda_{0i}, \text{ч}^{-1}$	Число элементов $N_i, \text{шт.}$	$N_i \lambda_i \cdot 10^7, \text{ч}^{-1}$
Интегральные схемы	1,5	$0,2 \cdot 10^{-7}$	40	12
Резисторные блоки Б 20-4-4	1,5	$0,1 \cdot 10^{-7}$	12	1,8
Конденсаторы керамические	1,2	$0,3 \cdot 10^{-7}$	16	5,76
Паяные содинения:				
ножек ИС	—	$0,5 \cdot 10^{-9}$	600	3,0
ножек резисторных блоков	—	$0,5 \cdot 10^{-9}$	156	0,78
ножек конденсаторов	—	$0,5 \cdot 10^{-9}$	32	0,16
Контакт разъема	—	$0,2 \cdot 10^{-7}$	80	16
Печатная плата (на один слой)	—	10^{-7}	7	7

Просуммировав $N_i \lambda_i$, окончательно получаем $\lambda_{\text{ТЭЗ}} = 46,5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

Будем считать, что интенсивности отказов всех ТЭЗ панели одинаковы. Основные исходные данные и промежуточные результаты для расчета интенсивности отказов панели приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Элемент	Интенсивность отказов $\lambda_i, \text{ч}^{-1}$	Число элементов $N_i, \text{шт.}$	$\lambda_i N_i \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$
ТЭЗ	$46,5 \cdot 10^{-7}$	40	186
Печатная плата панели (на один слой)	$0,8 \cdot 10^{-6}$	3	2,4
Соединение накруткой	10^{-10}	4200	0,42
Каркас панели	10^{-8}	1	0,01

Суммарная интенсивность отказов панели $\lambda_{\text{п}} = 188,83 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.
Ответ. $\lambda_{\text{ТЭЗ}} = 46,5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_{\text{п}} = 188,83 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

§ 4.4. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

При разработке ЭВМ расчетные значения показателей надежности сравниваются с показателями, установленными в техническом задании. Если последние лучше расчетных, принимаются меры для повышения надежности. Основные способы повышения надежности: использование

конструктивных элементов с высокими показателями надежности; применение способов монтажа, обеспечивающих низкую интенсивность отказов электросоединений; разработка конструкций, обеспечивающих защиту комплектующих элементов от внешних воздействий; выбор облегченных тепловых и электрических режимов работы комплектующих элементов; использование метода резервирования.

Рассмотрим структурное резервирование, при котором надежность ЭВМ повышается за счет использования избыточных элементов. На рис. 4.4, а показано основное соединение функциональных частей ЭВМ.

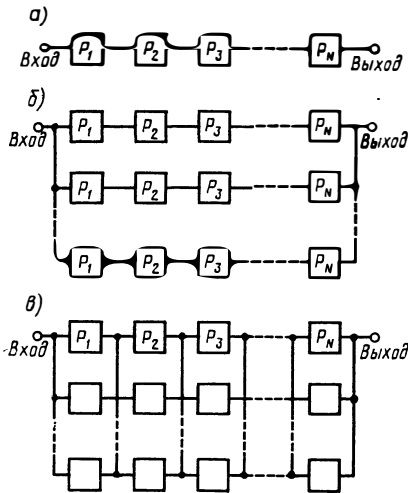


Рис. 4.4. Основное соединение (а), общее резервирование (б) и отдельное резервирование (в) функциональных частей ЭВМ

Зная, что $Q_{осн}(t) = q_j(t)$, получаем

$$Q_c(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^N p_i(t) \right]^{S+1}. \quad (4.28)$$

Переходя к вероятности безотказной работы, имеем

$$P_{общ.р}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^N p_i(t) \right]^{S+1}, \quad (4.29)$$

где N — количество элементов основной цепи; $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента основной цепи; S — количество резервных цепей.

Пользуясь формулой (4.29), можно определить необходимое количество резервных цепей для получения заданной вероятности безотказной работы при общем резервировании:

$$S = \ln \left[1 - P_{общ.р}(t) \right] / \ln \left[1 - \prod_{i=1}^N p_i(t) \right] - 1. \quad (4.30)$$

Различают два вида резервирования: общее (рис. 4.4, б) и отдельное (рис. 4.4, в). При общем резервируется вся ЭВМ в целом, при отдельном — отдельные элементы или их группы (функциональные части).

Если основные и резервные элементы имеют равные вероятности безотказной работы, то вероятность наступления отказа всей системы при общем резервировании определяется одновременным отказом основной и S резервных цепей.

Вероятность отказа для основной цепи

$$Q_{осн}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N p_i(t); \quad (4.26)$$

для всей системы

$$Q_c(t) = Q_{осн}(t) \prod_{j=1}^S q_j(t). \quad (4.27)$$

В случае поэлементного резервирования (рис. 4.4, в) вероятность безотказной работы находится также через вероятность появления отказа. При этом вероятность безотказной работы i -го и всех его резервных элементов:

$$p_i'(t) = 1 - q_i'(t) = 1 - \prod_{i=1}^{S_i+1} [1 - p_i(t)] = 1 - [1 - p_i(t)]^{S_i+1}. \quad (4.31)$$

Рассмотрим цепь, состоящую из групп элементов, имеющих вероятности, равные $p_i'(t)$. Поступаем аналогично случаю основного соединения, т. е.

$$P_{\text{полл}}(t) = \prod_{i=1}^N p_i'(t) = \prod_{i=1}^N \{1 - [1 - p_i(t)]^{S_i+1}\}, \quad (4.32)$$

где N — количество элементов основной цепи; S_i — количество резервных цепей для i -го элемента; $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Если все элементы обладают одинаковой вероятностью безотказной работы $p(t)$, то для обеспечения требуемой надежности число резервных цепей

$$S = \ln [1 - \sqrt[N]{P_{\text{полл}}(t)}] / \ln [1 - p(t)] - 1. \quad (4.33)$$

Как правило, все практические задачи сводятся к трем рассмотренным выше схемам соединений или их комбинациям (смешанное резервирование). Основная трудность при этом заключается в том, чтобы составить правильную расчетную схему соединения элементов. Это должно осуществляться анализом работы схемы узла или блока и технических требований на него.

Вывод выражений (4.26) — (4.33) был сделан в предположении, что интенсивности отказов основных и резервных элементов равны.

Интенсивность отказов основных и резервных элементов зависит от режима их включения. Различают нагруженный резерв, при котором резервные элементы находятся в том же режиме, что и основные, и ненагруженный, при котором резервные элементы практически не несут нагрузки.

Пусть в группе из основного и S резервных элементов (рис. 4.5) $\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_S$ — интенсивность отказов каждого из элементов в рабочем состоянии и λ_j ($j = \overline{1, S}$) — в дежурном. Отказы схем подключения резерва учитывать не будем. В ряде случаев интенсивность отказов этих схем можно включить в интенсивности Λ_j или λ_j .

Суммарная интенсивность отказов группы из основного и S резервных элементов

$$\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_0 + \sum_{j=1}^S \lambda_j. \quad (4.34)$$

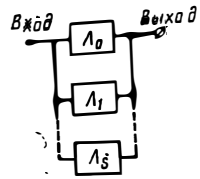


Рис. 4.5. Группа из $S+1$ резервированных элементов

В общем случае, если основной и $(n - 1)$ резервных элементов вышли из строя, то для оставшейся группы суммарная интенсивность отказов

$$\Lambda_{\Sigma}^n = \Lambda_n + \sum_{j=n+1}^S \lambda_j. \quad (4.35)$$

Средняя наработка на отказ резервированной группы равна сумме средних времен нахождения этой группы в работоспособном состоянии:

$$T_0^p = \frac{1}{\Lambda_0 + \sum_{j=1}^S \lambda_j} + \frac{1}{\Lambda_1 + \sum_{j=2}^S \lambda_j} + \dots + \frac{1}{\Lambda_S} = \sum_{K=0}^S \frac{1}{\Lambda_K + \sum_{j=K+1}^S \lambda_j}. \quad (4.36)$$

При любом законе распределения плотности вероятностей исправной работы вероятность отказа оставшихся резервных групп

$$Q_n^p(t) = \int_0^t [1 - p_n^n(\tau) p_n^{pab}(\tau, t)] Q_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (4.37)$$

где $p_n^n(\tau)$ — вероятность того, что n -й элемент, находясь в дежурном режиме, не откажет за время τ ; $p_n^{pab}(\tau, t)$ — вероятность того, что n -й элемент, находясь в рабочем режиме, не откажет за время t (в общем случае ее значение зависит от того, сколько времени резервный элемент находился в дежурном режиме); $Q_{n-1}(\tau)$ — вероятность отказа группы в состоянии, когда в качестве рабочего выступал $(n - 1)$ -й элемент.

Для внезапных отказов, полагая, что $p_j^n(t) \approx 1 - \lambda_j t$, $p_j^{pab}(\tau, t) \approx 1 - \Lambda_j t$ и $j\lambda_j t \ll 1$, из (4.37) находим вероятность безотказной работы группы:

$$\begin{aligned} P_n^p(t) &\approx 1 - t^S \frac{\Lambda_0 (\Lambda_1 + \lambda_1) (\Lambda_2 + 2\lambda_2) \dots (\Lambda_S + S\lambda_S)}{(S+1)!} = \\ &= 1 - \frac{t^S}{(S+1)!} \prod_{j=0}^S (\Lambda_j + j\lambda_j). \end{aligned} \quad (4.38)$$

Соотношения для оценки среднего времени и вероятности безотказной работы при ненагруженном и нагруженном резервах могут быть получены из (4.37) и (4.38).

Средняя наработка на отказ резервированной группы для ненагруженного резерва, когда $\lambda_i = 0$, будет

$$T_0^p = \frac{1}{\Lambda_0} + \frac{1}{\Lambda_1} + \dots + \frac{1}{\Lambda_S} = \sum_{j=0}^S \frac{1}{\Lambda_j}; \quad (4.39)$$

для нагруженного резерва, когда $\lambda_j = \Lambda_j$, получим

$$T_{0.н}^p = \frac{1}{\sum_{j=0}^S \Lambda_j} + \frac{1}{\sum_{j=1}^S \Lambda_j} + \dots + \frac{1}{\Lambda_S} = \sum_{K=0}^S \frac{1}{\sum_{j=K}^S \Lambda_j}. \quad (4.40)$$

В частном случае при $\Lambda_0 = \Lambda_1 = \dots = \Lambda_S = \Lambda$ для ненагруженного резерва

$$T_o^p = (S + 1)/\Lambda = (S + 1) T_o; \quad (4.41)$$

для нагруженного резерва

$$T_{o.n}^p = \frac{1}{\Lambda} \sum_{j=1}^{S+1} j^{-1} = T_o \sum_{j=1}^{S+1} j^{-1}, \quad (4.42)$$

где $T_o = 1/\Lambda$.

Из (4.38) вероятность безотказной работы для ненагруженного резерва

$$p_n^p(t) \approx 1 - t^S \frac{\Lambda_0 \Lambda_1 \Lambda_2 \dots \Lambda_S}{(S+1)!} = 1 - \frac{t^S}{(S+1)!} \prod_{j=0}^S \Lambda_j; \quad (4.43)$$

для нагруженного резерва

$$P_{nn}^p(t) \approx 1 - t^S \Lambda_0 \Lambda_1 \Lambda_2 \dots \Lambda_S = 1 - t^S \prod_{j=0}^S \Lambda_j. \quad (4.44)$$

Второй член в выражениях (4.43) и (4.44) определяет вероятность отказа. Отсюда видно, что для ненагруженного резерва вероятность отказа в $(S + 1)!$ раз меньше, чем для нагруженного.

В общем случае суммарная интенсивность отказов группы из n основных и m резервных элементов в предположении, что время работы между отказами и время восстановления отдельных элементов распределены по экспоненциальному закону, определяется для ненагруженного резерва:

$$\lambda_{\Sigma} = n\lambda_j \left/ \sum_{l=0}^m [C_{m+1}^{l+1} l! / (n\gamma)^l] \right.; \quad (4.45)$$

для нагруженного резерва

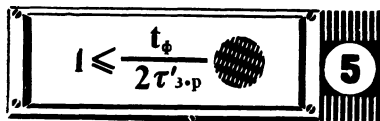
$$\lambda_{\Sigma} = (n + m) \lambda_j \left/ \sum_{k=0}^{n+m} C_{n+m-1}^k \gamma^k \right/ \sum_{l=0}^m C_{n+m}^l \gamma^l, \quad (4.46)$$

где $\gamma = \lambda_j T_B$.

Если ЭВМ состоит из N групп (участков) и отказы групп независимы, то при различных способах резервирования участков суммарная интенсивность отказов всей ЭВМ

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_{\Sigma i}, \quad (4.47)$$

где $\lambda_{\Sigma i}$ — суммарная интенсивность отказов i -го участка, рассчитываемая по (4.45) или (4.46).



КОНСТРУИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПАРАЗИТНЫХ ВЛИЯНИЙ

§ 5.1. ВИДЫ ЛИНИЙ СВЯЗИ И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Конструктивная реализация соединений принципиальной электрической схемы в виде различного рода линий связи приводит к появлению неоднородностей соединений и паразитных параметров. Линия связи относится к электрически «длинной», если время распространения сигнала больше фронта импульса. «Длинные» соединения делаются в виде согласованных экранированных линий связи, для них характерна задержка сигнала и уменьшение его амплитуды. Массовые соединения, рассматриваемые в дальнейшем, обычно выполняются несогласованными неэкранированными линиями связи. Большинство массовых соединений можно отнести к электрически «коротким». Линия связи считается электрически «короткой», если длительность фронта импульса больше времени задержки распространения сигнала (точнее $t_{\phi} > 4T_z$). Для таких соединений характерно ухудшение фронтов и появление паразитных сигналов на плоской части импульса. Основными искажающими факторами являются эффект отражений и различного рода помехи.

Линия связи на отдельных участках может иметь различный конструктивный вид. Например, связь двух элементов, расположенных на различных типовых конструкциях, может включать следующие участки: микрополосковая линия — контакт разъема — витая пара — контакт разъема — микрополосковая линия. Степень искажения сигналов зависит от электрических параметров, топологии и геометрической длины различных соединений. Помехи, возникающие при конструктивной реализации межсхемных соединений, не должны превышать допустимых, а задержки сигналов должны обеспечивать определенное в ТЗ быстродействие.

Таким образом, основная задача при проектировании соединений быстродействующих элементов ЭВМ состоит в выборе типа, конструкции и определении допустимой длины линий связи, в выработке требований к таким конструктивным элементам монтажа, как печатная плата, разъемы и т. п. Искажение сигналов из-за паразитных влияний должно учитываться при решении топологических задач конструирования, т. е. при компоновке схем, размещении конструктивных модулей и трассировке связей между ними.

Рассмотрим электрические параметры линий связи, влияющие на качество передачи сигналов, на примере двух взаимодействующих цепей связи, учитывая, что среди различного рода искажающих факторов значительное влияние имеют перекрестные помехи.

Взаимодействующие цепи связи с распределенными параметрами показаны на рис. 5.1, на котором $C_{в0}$ и $L_{в0}$ — взаимные емкость и ин-

дуктивность на единицу длины линии; Z_0 — волновое сопротивление линии. В общем случае волновое сопротивление линии (Ом)

$$Z_0 = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)}, \quad (5.1)$$

где R_0 , G_0 — активное сопротивление и проводимость изоляции на единицу длины линии; C_0 и L_0 — собственные емкость и индуктивность на единицу длины линии.

Так как R_0 и G_0 — малы, то

$$Z_0 \approx \sqrt{L_0/C_0}. \quad (5.2)$$

Важным параметром является задержка распространения сигнала (нс/м) по линии связи на единицу длины, так для ненагруженной линии связи

$$\tau_{з.р} = 3,33 \sqrt{\epsilon_{эф} \mu}; \quad (5.3)$$

для нагруженной линии связи

$$\tau'_{з.р} = Z_0 C_0 \sqrt{1 + C_{сх}/C_0} l, \quad (5.4)$$

где $\epsilon_{эф}$ — эффективное значение относительной диэлектрической про-

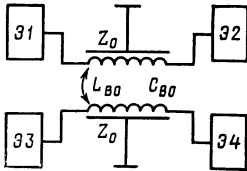


Рис. 5.1. Схема взаимодействующих цепей связи с распределенными параметрами

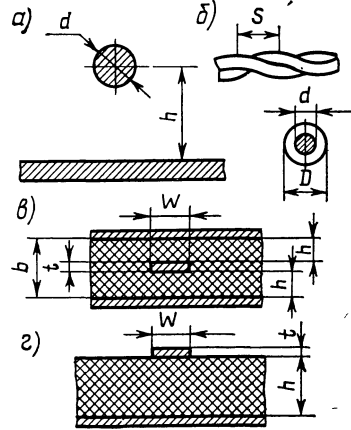


Рис. 5.2. Проводник над заземленной плоскостью (а), витая пара (б), полосковая линия (в) и микрополосковая линия (г)

ницаемости среды (для большинства диэлектриков $\epsilon_{эф} = 5 \div 8$, $\mu \approx 1$); μ — магнитная проницаемость среды; $C_{сх}$ — емкость нагрузки; l — геометрическая длина линии.

Рассмотрим виды связей, используемые в качестве межсоединений в ЭВМ, и приведем формулы для расчета их основных электрических параметров (см. [4,14]).

Проводник над земляной плоскостью. Электрические параметры такой линии связи (рис. 5.2, а) рассчитывают по формулам:

$$C_0 = 0,24 \cdot 10^{-10} \epsilon_{эф} / \ln(4h + d); \quad (5.5)$$

$$L_0 = \frac{1,38\mu}{3 \cdot 10^6} \log \frac{h}{d}; \quad (5.6)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \ln \frac{4h}{d}. \quad (5.7)$$

Здесь и далее h и d — в мм; C_0 — в Ф/м; L_0 — в Гн/м; Z_0 — в Ом.

Витая пара. Витая пара (рис. 5.2, б) может быть изготовлена из обычного монтажного провода. Шаг скрутки равен 5 или 10 мм. Один провод витой пары сигнальный, второй соединяется с «землей». Таким образом, витая пара — частично экранированная линия связи. Соответственно индуктивность и волновое сопротивление витой пары

$$L_0 = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{2D}{d}; \quad (5.8)$$

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \ln \frac{2D}{d}. \quad (5.9)$$

При шаге скрутки 10 мм емкость (Ф/м): для неэкранированной витой пары $C_0 = (0,35 \div 0,5) \cdot 10^{-12}$, для экранированной витой пары $C_0 = (0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-12}$.

Полосковая линия. Для полосковой линии (рис. 5.2, в) собственная емкость и индуктивность

$$C_0 = 0,355 \cdot 10^{-10} \epsilon_{эф} W / [b(1 - t/h)]; \quad (5.10)$$

$$L_0 = \frac{1,38}{3 \cdot 10^6} \log \frac{16h}{\pi W}. \quad (5.11)$$

Волновое сопротивление (Ом): если $W/b \geq 0,35$, то

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \ln \frac{4b}{0,567W + 0,67t}, \quad (5.12)$$

если $W/b < 0,35$ и $t/b < 0,25$, то

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \ln \frac{4b}{0,67\pi(0,8W + t)}. \quad (5.13)$$

Микрополосковая линия. Для микрополосковой линии (рис. 5.2, г)

$$C_0 = \epsilon_{эф} \cdot 10^{-9} W / (4\pi h); \quad (5.14)$$

$$L_0 = 3,77 \mu h / (3 \cdot 10^6 W); \quad (5.15)$$

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_{эф} + 1,41}} \ln \frac{5,98h}{0,8W + t}. \quad (5.16)$$

Коаксиальный кабель. Является идеальной экранированной линией связи. Некоторые типы коаксиальных кабелей имеют волновое сопротивление 50, 75, 100, 110, 125, 150 Ом.

По приведенным выше формулам можно рассчитать собственные паразитные параметры линий связи. При анализе взаимодействия цепей связи необходимо учитывать взаимные паразитные емкость и индуктивность.

Печатные проводники на поверхности однородного диэлектрика. Для случая расположения проводников на плате без экранирующего слоя (рис. 5.3, а) взаимная емкость (Ф/м) на единицу длины при $W/d \gg 1$

$$C_{в0} = 5,65 \cdot 10^{-12} \epsilon_{эф} \ln(4 + 8 W/d); \quad (5.17)$$

при $W/d \ll 1$

$$C_{в0} = 27,8 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{эф} \ln(4 + 4d/W). \quad (5.18)$$

Относительные погрешности формулы (5.17) не хуже 0,01%; формулы (5.18) не хуже 0,04%.

Здесь под « \gg » и « \ll » понимается разница, бóльшая чем в десять раз. Внутри указанной области отношения W/d обе эти формулы обеспечивают точность, достаточную для оценочных расчетов.

Взаимная индуктивность печатных проводников (Γ)

$$M_{1,2} = 2l_{вз} \{2,3 \log [2 W/(d+W)] + (d+W)/l_{вз} + 1\} \cdot 10^{-8}, \quad (5.19)$$

где $l_{вз}$ — длина участка взаимодействия линий связи.

Для печатных проводников на плате с металлизированным слоем (рис. 5.3, б) взаимная емкость (Φ /м)

$$C_{в0} = 0,333 \varepsilon_{эф} / \{ \Gamma(\Gamma + 2) \rho(x) [\rho(x) + 0,175 \cdot \Gamma/x] \} \cdot 10^{-9}, \quad (5.20)$$

где $\Gamma = 2d/W$; $x = 2h/W$; $\rho(x) = 2 \arctg \frac{1}{2x} + \frac{1}{2} \ln(4x^2 + 1)$;

$\varepsilon_{эф} = (\varepsilon_{диэл} + 1)/2$, т. е. $\varepsilon_{эф}$ равно среднему арифметическому между проницаемостью диэлектрика $\varepsilon_{диэл}$ и воздуха.

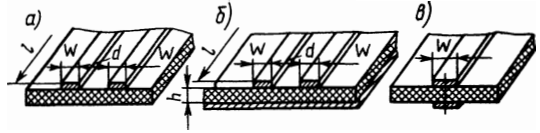


Рис. 5.3. Печатные проводники на поверхности (а и б) и на разных слоях (в) однородного диэлектрика

Печатные проводники на разных слоях однородного диэлектрика. Взаимную емкость печатных про-

водников на разных слоях однородного диэлектрика (рис. 5.3, в) называют межслоевой и рассчитывают по формуле (5.14), которая справедлива при $W/h > 10$, так как не учитывает краевого эффекта. С учетом краевого эффекта ..

$$C_{в0} = \{27,8 \varepsilon_{эф} / [x \rho(x)]\} \cdot 10^{-12}, \quad (5.21)$$

где x и $\rho(x)$ — то же, что и для формулы (5.20).

Стандартизация основных параметров печатных плат и соединений позволяет широко использовать значения паразитных параметров, полученные экспериментально и цифровым моделированием на ЭВМ. На рис. 5.4 изображены зависимости межслоевой взаимной емкости $C_{в0} \cdot 10^{10}$, Φ /м от ширины W печатного проводника при $\varepsilon_{эф} = 6$ для случая, когда проводники расположены строго друг под другом на МПП и двусторонней печатной плате (см. [16]).

Значения межслоевой емкости $C_{в0} \cdot 10^{10}$ (Φ /м) при различных смещениях проводников, полученные цифровым моделированием на ЭВМ, приведены ниже:

Слой 1—2	7,08	0,388	0,206	0,149	0,120	0,102	0,09
Слой 1—3	1,672	0,367	0,201	0,146	0,119	0,101	0,089
Слой 1—4	0,846	0,335	0,194	0,143	0,116	0,099	0,088
Слой 1—5	0,572	0,304	0,182	0,136	0,111	0,095	0,084
d , мм	0	1,25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5

Ширина печатного проводника — $W = 0,5$ мм, толщина изоляционного слоя $h = 0,13$ мм, эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{эф} = 5,5$. Смещение между осями печатных проводников (рис. 5.5) менялось от 0 до 7,5 мм с шагом 1,25 мм.

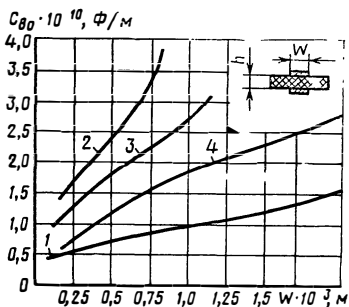
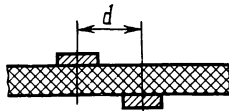


Рис. 5.4. Зависимости $C_{\theta\theta}$ от ширины печатного проводника:

1 — для ДПП толщиной 1,5 мм; 2, 3, 4 — для МПП при толщине изоляционного слоя 0,15; 0,25; 0,5 мм

Рис. 5.5. Смещенные печатные проводники на разных слоях однородного диэлектрика



Взаимные емкости для печатных проводников, расположенных на одном слое, при различной ширине печатных проводников и зазоре между ними приведены в табл. 5.1.

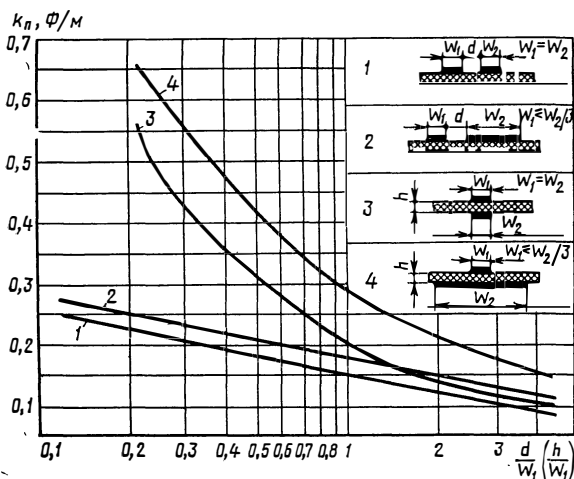


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента k_{Π} от параметров печатного монтажа и платы

На рис. 5.6 изображен график зависимости k_{Π} для различных вариантов расположения печатных проводников и

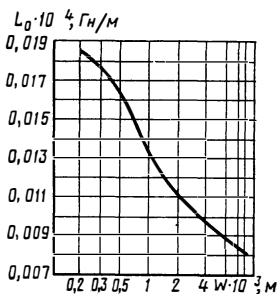


Рис. 5.7. Зависимость индуктивности печатного проводника от его ширины

соотношения геометрических параметров печатного монтажа и платы (см. [16]). Емкость проводника (Φ/m)

$$C_0 = k_{\Pi} \epsilon_{эф} \cdot 10^{-10}, \quad (5.22)$$

где $\epsilon_{эф}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость среды.

График зависимости индуктивности печатного проводника от его ширины изображен на рис. 5.7.

Таблица 5.1

Ширина проводника W , мм	Зазор между проводниками d , мм	Взаимная емкость $C_{в0} \cdot 10^{10}$, Ф/м			Ширина проводника W , мм	Зазор между проводниками d , мм	Взаимная емкость $C_{в0} \cdot 10^{10}$, Ф/м		
		для двусторонних печатных плат		для внутренних слоев МПП при $\epsilon_{эф} = 6$			для двусторонних печатных плат		для внутренних слоев МПП при $\epsilon_{эф} = 6$
		нелакированные при $\epsilon_{эф} = 3,5$	лакированные при $\epsilon_{эф} = 5,0$				нелакированные при $\epsilon_{эф} = 3,5$	лакированные при $\epsilon_{эф} = 5,0$	
0,3	0,3	0,53	0,75	0,9	0,6	0,3	0,67	0,95	1,14
0,3	0,4	0,47	0,68	0,81	0,6	0,4	0,60	0,85	1,02
0,3	0,5	0,44	0,63	0,75	0,6	0,5	0,56	0,80	0,96
0,3	0,6	0,42	0,60	0,72	0,6	0,6	0,53	0,75	0,90
0,3	1,0	0,33	0,48	0,57	0,6	1,0	0,46	0,65	0,78
0,3	1,5	0,32	0,45	0,54	0,6	1,5	0,39	0,55	0,66
0,6	0,2	0,70	1,00	1,20					

§ 5.2. ВЫБОР ТИПА ЛИНИИ СВЯЗИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ДОПУСТИМОЙ ДЛИНЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ОТРАЖЕНИЙ

В процессе распространения сигнала по линии связи может происходить его отражение от схемных или конструктивных элементов. Отражение от конструктивных неоднородностей значительно меньше искажает сигнал, чем отражение от схемных элементов, поэтому анализ эффекта отражений в несогласованных цепях сводится к исследованию переходных процессов в однородных линиях передачи с дискретными неоднородностями.

Рассмотрим соединение двух логических элементов схем ТТЛ как элементарную цепь связи (рис. 5.8). Здесь: Z_1 — выходное сопротивление элемента-источника Э1; Z_2 — входное сопротивление элемента-нагрузки Э2; Z_0 — волновое сопротивление, l — геометрическая длина линии связи.

Пусть генератор в момент времени t_0 вырабатывает идеальную ступеньку напряжения $U_{вх}$. Если сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии, т. е. $Z_2 = Z_0$, то линия работает в согласованном режиме — эффект отражения отсутствует, так как нагрузка целиком поглощает сигнал. В том случае, когда $Z_2 \neq Z_0$ и $Z_1 \neq Z_0$,

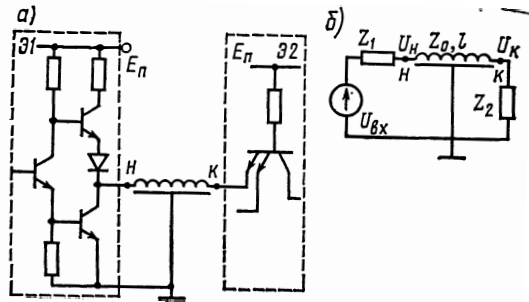


Рис. 5.8. Схема соединения логических элементов ТТЛ (а) и представление ее в виде элементарной цепи связи (б)

через время T_3 , $2T_3$, $3T_3$ и т. д. сигнал будет поочередно отражаться от конца К и начала Н линии с коэффициентами

$$K_{02} = (Z_2 - Z_0)/(Z_2 + Z_0) \text{ и } K_{01} = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0).$$

Здесь $T_3 = l\tau_{3.p}$, где $\tau_{3.p}$ — задержка распространения сигнала на единицу длины линии связи.

Таким образом, в любой момент времени, в любой точке линии напряжение равно сумме $U_{н1} = U_{вх} Z_0/(Z_1 + Z_0)$ и всех последующих отраженных фронтов импульсов, успевших появиться к рассматриваемому моменту времени. Влияние эффекта отражений приводит к затягиванию процесса установления положительного фронта импульса и

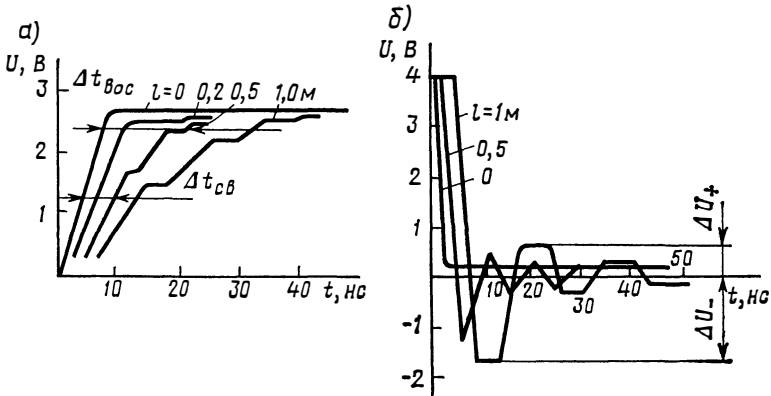


Рис. 5.9. Искажение положительного (а) и отрицательного (б) фронтов импульса

возникновению колебаний ΔU_+ и ΔU_- на отрицательном фронте (для схем ТТЛ). Искажение сигнала возрастает с увеличением длины линии и рассогласования цепи.

На рис. 5.9, а показана форма положительного фронта импульса на конце линии ($Z_0 = 50$ Ом, $\tau_{3.p} = 6,5$ нс/м) различной длины при наилучшем сочетании между вольт-амперными характеристиками элементов схем ТТЛ и Z_0 (см. [23]). Степень искажения положительного фронта импульса оценивается параметрами $\Delta t_{св}$ и $\Delta t_{вос}$, измеряемыми соответственно по уровням 0,5 и 0,95 амплитуды импульса. Параметр $\Delta t_{св}$ характеризует задержку положительного фронта сигнала в линии связи, $\Delta t_{вос}$ — время восстановления помехоустойчивости. Как видно из графиков, в длинных соединениях (около 1 м) $\Delta t_{св}$ может превысить задержку элемента t_3^{01} , что необходимо принимать во внимание при разработке временной диаграммы. Параметр $\Delta t_{вос}$ может достигать $(3 \div 4) t_3^{01}$ и его необходимо учитывать при определении частоты синхронизации.

Искажение отрицательного фронта импульса при различной длине линии ($Z_0 = 150$ Ом и $\tau_{3.p} = 5$ нс/м) показано на рис. 5.9, б. Колебания отрицательной полярности ΔU_- на одном из входов элемента могут создать на запертых по другим его входам переходах многоэмит-

терного транзистора напряжение, превышающее пробивное. Колебания положительной полярности ΔU_+ могут привести к ложному срабатыванию схемы. Как видно из рисунка, колебания ΔU_+ при длине около 1 м имеют большую длительность и будут восприниматься элементом-нагрузкой как статическая помеха.

Выполнение массовых соединений согласованными связями встречает определенные технические и технологические трудности, поэтому задача конструктора заключается в выборе типа и определении допустимой длины несогласованного соединения, которое обеспечивало бы требуемое быстродействие и помехоустойчивость.

Анализ искажения сигнала в линии связи может быть выполнен в результате исследования переходных процессов в элементарной цепи связи (см. рис. 5.8, б). Так как активное сопротивление и проводимость изоляции малы, то потерями, вносимыми параметрами R_0 и G_0 , можно пренебречь. Тогда процессы распространения сигнала в линии передачи будут описываться дифференциальными уравнениями в частных производных:

$$\partial U/\partial x = -L_0 di/\partial t; \quad di/\partial x = -C_0 \partial U/\partial t, \quad (5.23)$$

где x и t — координаты расстояния и времени.

Аналитическое или численное решение уравнений (5.23) для сигналов нестандартной формы с учетом граничных условий, которые определяются характеристиками схем, соединяемых линией передачи, представляет значительные трудности. Решение этих уравнений в дискретные моменты времени с шагом $\Delta t = T_3$ можно свести к решению следующих уравнений:

$$\begin{aligned} i_k(m) - i_n(m-1) &= -[U_k(m) - U_n(m-1)]/Z_0; \\ i_n(m) - i_k(m-1) &= [U_n(m) - U_k(m-1)]/Z_0, \end{aligned} \quad (5.24)$$

где i_n , U_n , i_k , U_k — токи и напряжения соответственно в начале и конце линии; $m = t/T_3$.

Граничные условия для этих уравнений определяются выходным сопротивлением элемента-источника Z_1 и входным сопротивлением элемента-нагрузки Z_2 . Так как параметры Z_1 и Z_2 нелинейны, то численно решить уравнения (5.24) трудно. Для оперативной оценки искажений при передаче сигнала по линии связи можно использовать графический метод. Рассмотрим применение этого метода на примере анализа искажения сигнала в цепи связи двух элементов ТТЛ (рис. 5.8, а). Граничными условиями для решения уравнений (5.24) будут: выходная характеристика элемента Э1 в состоянии логической «единицы» (кривая 1 на рис. 5.10) и входная характеристика элемента Э2 (кривая 2) при построении переднего фронта ($ПФ$) импульса; выходная характеристика элемента Э1 в состоянии логического «нуля» (кривая 3) и входная характеристика элемента Э2 при построении заднего фронта ($ЗФ$) импульса.

Точки, характеризующие режим в дискретные моменты времени в начале или в конце линии, находятся как точки пересечения: кривой 1 и линии с наклоном Z_0 для переднего фронта импульса в начале ли-

нии; кривой 3 и линии с наклоном Z_0 для заднего фронта импульса в начале линии; кривой 2 и линии с наклоном $-Z_0$ для импульса в конце линии.

Прямые с наклоном Z_0 и $-Z_0$ проводятся в соответствии с уравнениями (5.24) из точек, характеризующих режим в конце или в начале линии в предыдущий момент времени.

На рис. 5.10 проиллюстрирован графический метод решения уравнений (5.24) для линии связи ($Z_0 = 50$ Ом) схем ТТЛ. Оценка искажений этим методом характеризуется сравнительно невысокой точностью

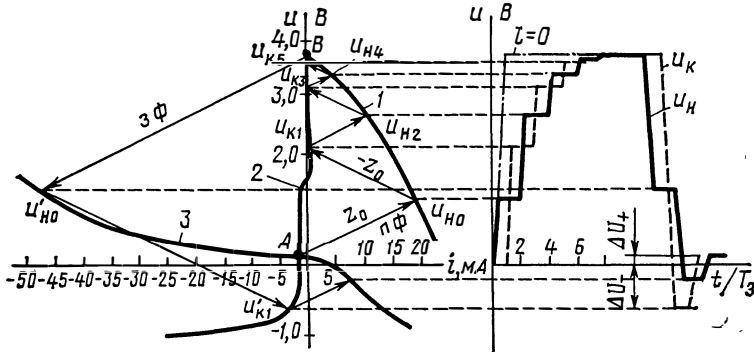


Рис. 5.10. Графический метод исследования искажений в несогласованных линиях связи схем ТТЛ

определения интересующих нас параметров $\Delta t_{св}$, $\Delta t_{вос}$, ΔU_- и ΔU_+ , однако она может быть сделана достаточно оперативно и позволяет решить вопрос о применимости линии связи данного типа и длины $l = T_3/\tau_{з.р.}$

Если затягивание переднего фронта можно не учитывать, предельная длина несогласованного соединения определяется амплитудой колебаний в конце линии, которая не должна превосходить допустимую помеху данного вида. При передаче импульса по несогласованной линии колебания на ее конце не превышают 15% от логического перепада, если двойная задержка в линии меньше, чем длительность фронта импульса. Для этого случая длина линии (м)

$$l = t_{\phi} / (2\tau'_{з.р.}), \quad (5.25)$$

где t_{ϕ} — длительность фронта импульса, нс.

Пример 5.1. Рассчитать допустимую длину несогласованной линии связи элементов интегральных схем серии 155. Предложено два варианта конструктивного исполнения линии связи: полосковая линия и витая пара. Примем $\epsilon_{диэл} = 6$, $t_{\phi} = 15$ нс, $C_{сх} = 3 \cdot 10^{-12}$ Ф. Параметры витой пары: диаметр проводника с изоляцией $D = 0,5$ мм, без изоляции $d = 0,3$ мм, диэлектрическая проницаемость изоляции проводов $\epsilon_{пр} = 4$, емкость $C_0 = 0,5 \cdot 10^{-10}$ Ф/м. Параметры полосковой линии (см. рис. 5.2, е): $W = 0,5$ мм, $b = 0,57$ мм, $t = 0,05$ мм, $h = 0,26$ мм.

Решение. Для витой пары $\epsilon_{эф} = (\epsilon_{пр} + 1)/2 = 2,5$, т. е. равна среднему значению между проницаемостью воздуха и изоляции проводов. По (5.9) волновое сопротивление витой пары (Ом)

$$Z_0 = (120/\sqrt{\epsilon_{эф}}) \ln(2D/d) \approx 90.$$

Подставляя (5.4) в (5.25) и решая квадратное уравнение относительно l , находим допустимую длину экранированной витой пары $l_{в.п} = 1,64$ м. Для полосковой линии по (5.10) и (5.12) рассчитаем $C_0 = 2,64 \cdot 10^{-10}$ Ф/м и $Z_0 = 46$ Ом. Далее получаем допустимую длину полосковой линии $l_{п.л} = 0,62$ м.
 Ответ. $l_{в.п} = 1,64$ м, $l_{п.л} = 0,62$ м.

§ 5.3. ПОМЕХИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Перекрестными наводками называют сигналы помехи, возникающие в линии передачи из-за наличия сигнала в соседних линиях передачи. Образование перекрестной помехи связано с существованием емкостной и индуктивной паразитных связей между линиями передачи. Так как паразитная связь быстро убывает с увеличением расстояния между линиями передачи, существенными являются наводки от двух соседних линий. На рис. 5.11 показаны взаимодействующие цепи связи логических элементов. В активную цепь связи входят элемент-источник Э1 и элемент-нагрузка Э2, в пассивную — Э3 и Э4. Один из логических элементов пассивной цепи является управляющим, другой — воспринимающим. В соответствии с этим различают два вида включения элементов в пассивной цепи относительно элементов активной цепи: согласное (Э3 — управляющий, Э4 — воспринимающий) и встречное (Э3 — воспринимающий, Э4 — управляющий).

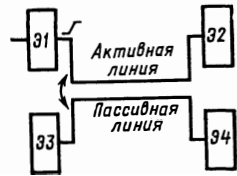


Рис. 5.11. Взаимодействующие цепи связи

Схема взаимодействующих цепей связи с распределенными параметрами была представлена на рис. 5.1. Переходные процессы в двух взаимодействующих линиях передачи с идентичными параметрами описываются дифференциальными уравнениями в частных производных:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i^a}{\partial x} &= -C_0 \frac{\partial U^a}{\partial t} + C_{в0} \frac{\partial U^п}{\partial t}; \\ \frac{\partial i^п}{\partial x} &= -C_0 \frac{\partial U^п}{\partial t} + C_{в0} \frac{\partial U^a}{\partial t}; \\ \frac{\partial U^a}{\partial x} &= -L_0 \frac{\partial i^a}{\partial t} - L_{в0} \frac{\partial i^п}{\partial t}; \\ \frac{\partial U^п}{\partial x} &= -L_0 \frac{\partial i^п}{\partial t} - L_{в0} \frac{\partial i^a}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

где i^a , $i^п$ и U^a , $U^п$ — токи и напряжения соответственно в активной и пассивной линиях передачи.

При анализе взаимодействующих цепей связи уравнения (5.26) должны решаться с учетом граничных условий, которые определяются входными и выходными характеристиками логических элементов, входящих в эти цепи.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными граничными условиями для различных форм реальных сигналов — очень сложная задача. Из-за значительного разброса параметров цепей связи (таких, как электрические характеристики линий связи, характеристики логических элементов) проведение точного расчета практических цепей связи нерационально. Целесообразнее выполнить относительно простой приближенный расчет перекрестных помех, уп-

ростив исходные уравнения и граничные условия на основе разумных допущений. При таком подходе можно проанализировать различные варианты схем соединений; сформулировать рекомендации для выбора линий связи на различных участках соединения, типа печатной платы, количества контактных разъемов в комбинированной линии, топологии печатных проводников.

Основной способ упрощения рассматриваемой задачи заключается в замене распределенных параметров взаимной связи сосредоточенными, в качестве которых используются интегральные значения соответствующих реактивностей всего соединения. Следует отметить, что переход к сосредоточенным параметрам целесообразен лишь для коротких линий связи, т. е. если выполняется условие $t_{\phi} > 4T_3$.

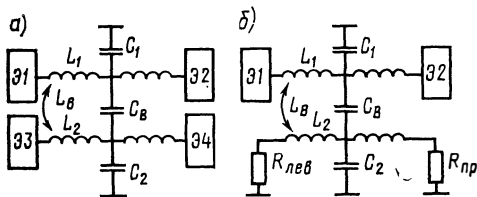


Рис. 5.12. Схема взаимодействующих цепей связи с сосредоточенными параметрами (а), после линейризации входных и выходных характеристик логических элементов пассивной цепи (б)

На рис. 5.12,а показана схема взаимодействующих цепей связи после перехода к сосредоточенным параметрам. Здесь $C_1 = C_{10}l_1$; $L_1 = L_{10}l_1$; $C_2 = C_{20}l_2$; $L_2 = L_{20}l_2$; $C_B = C_{B0}l_{вз}$; $L_B = L_{B0}l_{вз}$; $l_{вз}$ — длина участка взаимодействия линий связи.

Чтобы упростить граничные условия, необходимо проанализировать входные и выходные

характеристики логических элементов пассивной линии и линейризовать их. Полученные таким образом линейные эквиваленты входного и выходного сопротивлений элемента представляют собой оконечные нагрузки пассивной линии в схеме для расчета помехи. Обоснованием такой линейризации являются сравнительно небольшие колебания рабочей точки от своего статического положения из-за низкого уровня допустимых помех. После линейризации характеристик логических элементов пассивной цепи схема, изображенная на рис. 5.12, а, будет иметь вид, показанный на рис. 5.12, б. Здесь $R_{лев}$ и $R_{пр}$ — эквивалентные сопротивления на левом и правом концах пассивной линии. На основании предположения о слабой взаимосвязи можно также считать, что переходные процессы в активной линии не зависят от переходных процессов формирования помехи в пассивной линии. Рассмотрим отдельно емкостную и индуктивную наводки.

Емкостная составляющая перекрестной помехи. Схема взаимодействующих цепей (а) и приближенная эквивалентная схема (б) с учетом входной емкости воспринимающего элемента и сделанных выше допущений показаны на рис. 5.13. На эквивалентной схеме

$$R = R_{лев} R_{пр} / (R_{лев} + R_{пр}); C = C_2 + C_{вх}; C_2 = C_0 l_2.$$

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс наведения емкостной помехи, имеет вид

$$C_B d(U^a - U_C^n) / dt = U_C^n / R + C dU_C^n / dt,$$

где U_C^n — емкостная составляющая перекрестной помехи.

В предположении линейно нарастающего фронта напряжения в активной линии ($dU^a/dt = \alpha$) можно записать:

$$dU_C^n/dt = \alpha C_B / (C_B + C) - U_C^n / [R(C_B + C)].$$

Решение этого уравнения для $0 < t \leq t_{\Phi U}$ будет

$$U_C^n = \alpha R C_B (1 - e^{-t/\tau}),$$

где $\tau = R(C_B + C)$; U^a ; $t_{\Phi U}$ — перепад напряжения в активной линии и длительность его фронта.

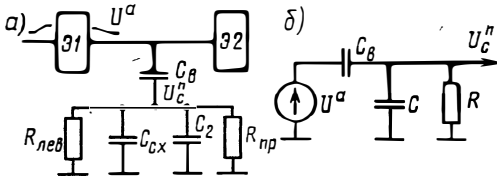


Рис. 5.13. Схема взаимодействующих цепей (а) и приближенная эквивалентная схема наведения емкостной помехи (б)

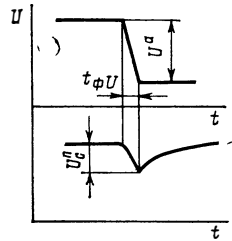


Рис. 5.14. Напряжение в активной линии и отрицательная перекрестная помеха

Положив $\alpha = U^a/t_{\Phi U}$, получим

$$U_C^n = (U^a R C_B / t_{\Phi U}) (1 - e^{-t/\tau}).$$

Емкостная помеха совпадает со знаком фронта наводящего импульса. На рис. 5.14 показаны эпюры напряжения в активной линии при переключении элемента ТТЛ из логического состояния «1» в «0» и перекрестная помеха отрицательной полярности. При $t = t_{\Phi U}$ помеха достигает своего максимального значения

$$U_C^n_{\max} = (U^a R C_B / t_{\Phi U}) (1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}). \quad (5.27)$$

С момента времени $t > t_{\Phi U}$ помеха начнет уменьшаться по экспоненте за счет заряда емкостей:

$$U_C^n = U_C^n_{\max} e^{-(t-t_{\Phi U})/\tau}. \quad (5.28)$$

Рассмотрим соотношение между отрицательной и положительной емкостными помехами для схем ТТЛ. Емкостная помеха положительной полярности наводится передним фронтом $t_{\Phi U}^+$, а отрицательная — задним $t_{\Phi U}^-$. Отрицательная помеха опасна, если управляющий элемент в пассивной цепи находится в состоянии логической единицы, а положительная — в состоянии логического нуля, т. е.

$$\left. \begin{aligned} U_C^+ &= \frac{U^a}{t_{\Phi U}^+} \frac{R_{\text{ВЫХ}}(0) R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВЫХ}}(0) + R_{\text{ВХ}}} C_B (1 - e^{-t/\tau}); \\ U_C^- &= \frac{U^a}{t_{\Phi U}^-} \frac{R_{\text{ВЫХ}}(1) R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВЫХ}}(1) + R_{\text{ВХ}}} C_B (1 - e^{-t/\tau}); \end{aligned} \right\} \quad (5.29)$$

где $R_{\text{вых}}(1)$, $R_{\text{вых}}(0)$ — выходное сопротивление схемы в состоянии «1» и «0» соответственно; $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление схемы.

Находим отношение

$$\frac{U_{\bar{c}}}{U_c^+} = \frac{t_{\bar{\phi}U}^+}{t_{\bar{\phi}U}^-} \frac{R_{\text{вых}}(1)(R_{\text{вых}}(0) + R_{\text{вх}})}{R_{\text{вых}}(0)(R_{\text{вых}}(1) + R_{\text{вх}})} \quad (5.30)$$

Для схем ТТЛ $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{вых}}(1)$; $R_{\text{вых}}(1) \gg R_{\text{вых}}(0)$; [$R_{\text{вх}} \approx 1$ кОм; $R_{\text{вых}}(1) \approx 100 \div 200$ Ом; $R_{\text{вых}}(0) \approx 15 \div 30$ Ом].

Тогда (5.30) можно записать в виде

$$\frac{U_{\bar{c}}}{U_c^+} \approx \frac{t_{\bar{\phi}U}^+}{t_{\bar{\phi}U}^-} \frac{R_{\text{вых}}(1)}{R_{\text{вых}}(0)} \quad (5.31)$$

Так как $t_{\bar{\phi}U}^+ = 2t_{\bar{\phi}U}^-$, то ясно, что емкостная помеха отрицательной полярности как минимум в десять раз больше помехи положительной полярности.

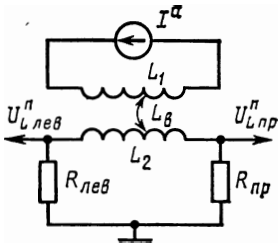


Рис. 5.15. Эквивалентная схема наведения индуктивной перекрестной помехи

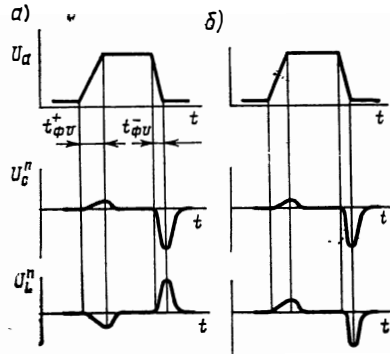


Рис. 5.16. Эпюры емкостной и индуктивной составляющих перекрестной помехи при согласном (а) и встречном включениях цепей (б)

Индуктивная составляющая перекрестной помехи. Эквивалентная схема наведения индуктивной перекрестной помехи показана на рис. 5.15. Оценка сверху амплитуды индуктивной наводки может быть сделана следующим образом. При линейном законе изменения фронта тока в активной линии ЭДС (B), наведенная в пассивной цепи за счет взаимной индуктивной связи, $E_{\Pi} = L_B I^a / t_{\phi I}$, где I^a и $t_{\phi I}$ — перепад тока в активной линии и длительность его фронта.

Тогда оценки сверху амплитуды индуктивной составляющей перекрестной помехи на левом $U_{L_{\text{лев}}}^n$ и правом $U_{L_{\text{прав}}}^n$ концах пассивной линии соответственно будут:

$$U_{L_{\text{лев}}}^n = \frac{E_{\Pi} R_{\text{лев}}}{R_{\text{лев}} + R_{\text{прав}}} = \frac{I^a}{t_{\phi I}} \frac{R_{\text{лев}}}{R_{\text{лев}} + R_{\text{прав}}} L_B, \quad (5.32)$$

$$U_{L_{\text{прав}}}^n = \frac{E_{\Pi} R_{\text{прав}}}{R_{\text{лев}} + R_{\text{прав}}} = \frac{I^a}{t_{\phi I}} \frac{R_{\text{прав}}}{R_{\text{лев}} + R_{\text{прав}}} L_B, \quad (5.33)$$

где $I^a = \sum_{i=1}^{N^a} I_i^a$; N^a — количество элементов нагрузок в активной цепи; I_i^a — ток, потребляемый i -м элементом активной цепи.

Индуктивная перекрестная наводка максимальна при наибольшем количестве элементов-нагрузок в активной линии. Индуктивная помеха при согласном включении линий по знаку противоположна фронту наводящего сигнала, при встречном включении их знаки совпадают. Так как $t_{\Phi I}^+ > t_{\Phi I}^-$, при встречном включении $U_L^- > U_L^+$, при согласном — наоборот (рис. 5.16).

В реальных конструкциях линий связи имеет место как емкостное, так и индуктивное взаимодействие. Относительные поправки к длительности помехи, обусловленные индуктивностью, имеют порядок $t_{\Phi}/T_3 \ll 1$ (см. [12]). Суммарная помеха (В) при встречном включении цепей

$$U_{\Sigma B}^{\Pi} = \frac{U^a R_{C_{B0}} L_{B3}}{t_{\Phi U}} (1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}) + \frac{I^a R_{лев} L_{B0} L_{B3}}{t_{\Phi I} (R_{лев} + R_{\Pi P})} (1 - e^{-t_{\Phi I}/\tau}); \quad (5.34)$$

при согласном включении цепей

$$U_{\Sigma C}^{\Pi} = \frac{U^a R_{C_{B0}} L_{B3}}{t_{\Phi U}} (1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}) - \frac{I^a R_{\Pi P} L_{B0} L_{B3}}{t_{\Phi I} (R_{лев} + R_{\Pi P})} (1 - e^{-t_{\Phi I}/\tau}). \quad (5.35)$$

Из рисунка видно, что максимальной будет отрицательная суммарная помеха при встречном включении:

$$U_{\Sigma}^- = - \left[\frac{U^a}{t_{\Phi U}} \frac{R_{ВЫХ}(1) R_{ВХ} C_{B0} L_{B3}}{R_{ВЫХ}(1) + R_{ВХ}} (1 - e^{-t_{\Phi U}/\tau}) + \frac{I_0^a N^a}{t_{\Phi I}} \frac{R_{ВХ} L_{B0} L_{B3}}{R_{ВЫХ}(1) + R_{ВХ}} (1 - e^{-t_{\Phi I}/\tau}) \right]. \quad (5.36)$$

Считая, что $I_i^a = I_0^a = \text{const}$, из (5.36) можно получить соотношение емкостной и индуктивной составляющих перекрестной наводки:

$$\frac{U_C}{U_L} = \frac{U^a t_{\Phi I} C_{B0}}{N^a I_0^a t_{\Phi U} L_{B0}} R_{ВЫХ}.$$

Учитывая, что для схем ТТЛ $U^a t_{\Phi I} / (I_0^a t_{\Phi U}) \approx 10^3$, окончательно получим

$$\frac{U_C}{U_L} = \frac{C_{B0} R_{ВЫХ}}{L_{B0} N^a} 10^3. \quad (5.37)$$

Рассмотрим отношение U_C/U_L для случая отрицательной перекрестной наводки. Так как отрицательная помеха опасна, если управляющий элемент находится в состоянии логической единицы, то примем $R_{ВЫХ} = R_{ВЫХ}(1) = 100 \div 200$ Ом. Пусть $N^a = 10$. Все линии связи можно разделить на два класса: высокоомные ($Z_0 \geq 75$ Ом) и низкоомные ($Z_0 < 75$ Ом). К низкоомным

относятся полосковые линии, к высокоомным — все остальные. Для высокоомных линий связи $C_{в0}/L_{в0} \approx 10^{-4}$ Ф/Гн, для низкоомных — $C_{в0}/L_{в0} \geq 0,25 \times 10^{-3}$ Ф/Гн. Тогда по (5.37) получим: для высокоомных линий связи

$$U_{\bar{c}}/U_{\bar{L}} \geq 1,0;$$

для низкоомных линий связи

$$U_{\bar{c}}/U_{\bar{L}} \geq 2,5.$$

Вопрос о соотношении емкостной и индуктивной составляющей перекрестной наводки важен при выборе способа уменьшения помехи.

§ 5.4. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ

Проанализируем (5.34) с точки зрения выработки рекомендаций по использованию линий связи и печатных плат в зависимости от быстродействия элементной базы. Рассмотрим случай встречного включения. При $t_{\phi U} > 2,5 \tau$ экспоненциальным членом в (5.34) можно пренебречь. Независимо от полярности помехи

$$U_{\Sigma}^{\Pi} = \left[\frac{U^a RC_{в0}}{t_{\phi U}} + \frac{I^a R_{вх} L_{в0}}{t_{\phi I} (R_{вх} + R_{вых})} \right] l_{вз}. \quad (5.38)$$

В этом случае длительность импульса помехи приблизительно равна $t_{\phi U}$, а ее амплитуда пропорциональна длине линии (точнее участка взаимодействия) и обратно пропорциональна длительности фронта. Если справедливо $t_{\phi U} < \tau$, то разложив в (5.34) экспоненту в ряд и ограничившись двумя членами разложения, получим

$$U_{\Sigma}^{\Pi} = \frac{U^a}{1 + C_0/C_{в0} + C_{сх}/(C_{в0} l_{вз})} + \frac{I^a}{R_{вых} [C_{в0}/L_{в0} + C_0/L_{в0} + C_{сх}/(L_{в0} l_{вз})]}. \quad (5.39)$$

Из (5.39) видно, что при $t_{\phi U} < \tau$ амплитуда помехи практически не зависит от длины линии связи (длительность помехи в этом случае прямо пропорциональна длине линии связи).

Из анализа следует, что применение однослойных печатных плат без металлизированной поверхности допустимо лишь для низкоскоростных устройств ($t_{\phi U} > 2,5 \tau$), где уменьшение амплитуды помехи возможно за счет сокращения длины участка взаимодействия. Допустимая длина взаимодействующих участков линий связи может быть определена из (5.38) с учетом $U_{\Sigma}^{\Pi} \leq U_{доп}$. В случае преобладания емкостной составляющей перекрестной наводки допустимая длина участка взаимодействия (м)

$$l_{доп} \leq U_{доп} t_{\phi U} / (U^a RC_{в0}). \quad (5.40)$$

Для монтажа элементов в быстродействующих устройствах ($t_{\phi U} < \tau$) необходимо использовать многослойные печатные платы с введением металлизированных слоев, что приводит к увеличению отношений $C_{в0}/L_{в0}$, $C_0/L_{в0}$, $C_0/C_{в0}$. Емкостную составляющую перекрестной на-

водки можно уменьшить, выбирая материалы платы с минимальной эффективной диэлектрической проницаемостью.

Основными способами сокращения перекрестной помехи за счет изменения топологии, геометрии и конструкции межсоединений являются: трассировка проводников на соседних слоях по ортогональным направлениям; использование согласного включения цепей; увеличение расстояния между проводниками; уменьшение длины участка взаимодействия и площади перекрытия контуров, образуемых каждой взаимодействующей линией связи вместе с логическими элементами и общей «землей»; введение металлизированных поверхностей, снижающих волновое сопротивление линий связи и экранирующих смежные сигнальные слои.

Наиболее простой прием — сокращение длины участка взаимодействия связей. Рассмотрим пример определения допустимой длины участка взаимодействия.

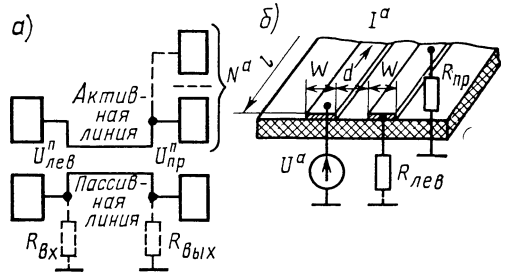


Рис. 5.17. Взаимодействующие цепи связи при встречном включении (а) и их фрагменты (б)

Пример 5.2. Рассчитать допустимую длину взаимодействующего участка связей (рис. 5.17) элементов схем ТТЛ, расположенных на одном ТЭЗ, учитывая, что допустимая перекрестная помеха $U_{\text{доп}} = 0,2$ В. Соединение элементов пассивной цепи — встречное, управляющий элемент в состоянии логического «0». Число элементов-нагрузок в активной линии $N^a = 10$. Параметры линий $W = 0,5$ мм; $d = 1$ мм ($\epsilon_{\text{диэл}} = 5$); $R_{\text{лев}} = R_{\text{вх}} = 1$ кОм; $R_{\text{лп}} = R_{\text{вых}}(0) = 30$ Ом; $U^a t_{\text{фл}}^- = 0,25 \cdot 10^9$ В·с; $I^a t_{\text{фл}}^- = 0,2 \cdot 10^6$ А·с.

Решение. Допустимую длину взаимодействующего участка связей будем определять из (5.38), так как для схем ТТЛ среднего быстродействия ($t_{\text{фл}}^- = 10$ нс) условие $t_{\text{фл}}^- > 2,5t$ удовлетворяется. Проводники являются внешними по отношению к печатной плате, поэтому $\epsilon_{\text{эф}} = (\epsilon_{\text{диэл}} + 1)/2$. Из условия $U_{\text{доп}} \geq U_{\text{лев}}^n$, используя (5.38) и (5.19), получаем

$$\frac{R_{\text{вх}} R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}} C_{\text{в0}} l_{\text{вз}} \frac{U^a}{I^a t_{\text{фл}}^-} + \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_{\text{вых}}} 2l_{\text{вз}} \{2,3 \log [2W \cdot (W + d)] + (W + d) \cdot l_{\text{вз}} - 1\} 10^{-8} (I^a \cdot t_{\text{фл}}^-) N^a \leq U_{\text{доп}}. \quad (5.41)$$

По (5.18) $C_{\text{в0}} = 0,34 \cdot 10^{-10}$ Ф·м.

Если в (5.19) пренебречь величиной $(W - d) l_{\text{вз}}$, то

$$L_{\text{в0}} = M_{1,2} l_{\text{вз}} = 0,28 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}.$$

Решая уравнение (5.41) относительно $l_{\text{вз}} = l_{\text{доп}}$, найдем $l_{\text{доп}} = 0,69$ м.
Ответ. $l_{\text{доп}} = 0,69$ м

Определение допустимой длины участка взаимодействия печатных проводников может выполняться на основании экспериментальных данных. В табл. 5.2 приведены экспериментальные значения допустимых паразитных емкостей между двумя соседними проводниками в одном слое, обеспечивающие помехоустойчивость микросхем соответствующих серий для ложного срабатывания и сбоя соответственно (см. [16]).

Таблица 5.2

Серия микросхем	Допустимая взаимная емкость $C_{в.доп} \cdot 10^{12}$, Ф					Серия микросхем	Допустимая взаимная емкость $C_{в.доп} \cdot 10^{12}$, Ф				
	для сбоя схемы при различных длительностях сигнала				для ложного срабатывания схемы		для сбоя схемы при различных длительностях сигнала				для ложного срабатывания схемы
	2 $t_{з.ср}$	3 $t_{з.ср}$	4 $t_{з.ср}$	5 $t_{з.ср}$			2 $t_{з.ср}$	3 $t_{з.ср}$	4 $t_{з.ср}$	5 $t_{з.ср}$	
104	20	40	50	70	70	137	5	15	40	80	80
106	6	15	30	50	50	138	5	15	40	80	80
114	10	15	20	25	25	155	10	25	40	50	60
130	4	12	20	35	30	211	10	15	20	30	30
133	10	25	40	50	50	217	5	8	10	20	20
136	6	20	45	60	65						

Примечание. $t_{з.ср}$ — среднее время задержки распространения сигнала.

Пример 5.3. Определить допустимую длину участка взаимодействия для микросхем серии 155 при преобладании емкости наводки для случая ложного срабатывания. Проводники расположены на поверхности двусторонней печатной платы, ширина проводников $W = 0,3$ мм, зазор между ними $d = 0,3$ мм. Печатная плата — лакированная.

Решение. По табл. 5.1 определяем $C_{в0} = 0,75 \cdot 10^{-10}$ Ф/м. Из табл. 5.2 для серии 155 допустимая взаимная емкость $C_{в.доп} = 60 \cdot 10^{-12}$ Ф. Тогда

$$l_{доп} = C_{в.доп} / C_{в0} = 60 \cdot 10^{-12} / (0,75 \cdot 10^{-10}) = 0,8 \text{ м.}$$

Ответ. $l_{доп} = 0,8$ м.

§ 5.5. ПОМЕХИ ПО ЦЕПЯМ УПРАВЛЕНИЯ И ПИТАНИЯ

Помехи по цепям управления и питания возникают из-за паразитной связи через общее сопротивление цепей управления и шин питания и «земли» и определяются индуктивностью линий связи.

Помехи по цепям управления. Помеха данного вида образуется в результате переходных процессов, происходящих в управляющих линиях и связана с особенностями работы схем ТТЛ. Рассмотрим один из вариантов схемы (рис. 5.18), в которой возникает такая помеха (см. [23]). В этой схеме входы 2 элементов Э2 — ЭМ подключены к управляющему элементу Э1, расположенному на другом ТЭЗ. Пусть на входах 1 и 2 всех элементов Э2 — ЭМ низкий потенциал (логический «0»). Все переходы эмиттер-база входных транзисторов открыты. Подадим на контакты А2 — АМ высокий потенциал (логическую «1»). Тогда соответствующие переходы эмиттер — база закрываются, а входные токи переключаются во вторую входную цепь. Протекая по управляющей линии, эти токи суммируются и генерируют на входах 2 всех элементов помеху положительной полярности. Амплитуда помехи

$$U_{лог} \approx L_{эвк} \sum_{i=1}^N I_i / t_{\phi l}, \quad (5.42)$$

где $L_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентная индуктивность управляющей линии (в $L_{\text{ЭКВ}}$ входят индуктивность печатного проводника и контактов разъемов); $\sum_{i=1}^N I_i$ — суммарный ток элементов Э2 — ЭМ.

Пример 5.4. Оценить $U_{\text{лог}}$ для рассматриваемой схемы (рис. 5.18). Пусть внутриблочные соединения выполнены печатными проводниками на объединительной плате. Рассчитаем отдельно $U_{\text{лог}}$ в печатных проводниках и контактах

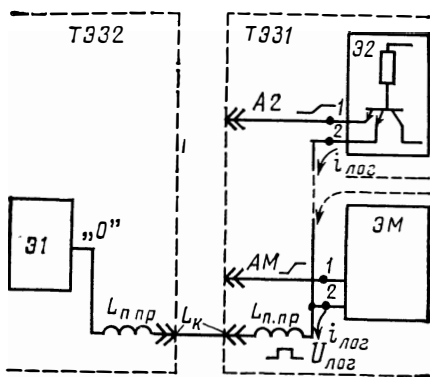


Рис. 5.18. Схема возникновения помехи по цепи управления

разъемов ($U_{\text{лог. п. пр}}$ и $U_{\text{лог. к. р}}$). Пусть $l_{\text{п. пр}} = 0,12$ м; ширина печатного проводника $W = 0,5$ мм; $L_{\text{к}} = 30 \cdot 10^{-9}$ Гн; $I^2 / t_{\text{ф}}^+ I = 0,2 \cdot 10^6$ А/с; $N = 5$ — число одновременно переключаемых схем (Э2—ЭМ); $n_1 = 2$ — число разъемов в управляющей цепи; $n_2 = 1$ — число контактов разъема, отведенных под управляющую цепь.

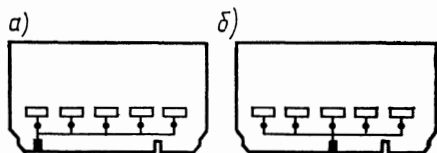


Рис. 5.19. Топология несекционированной (а) и секционированной (б) цепей управления

Решение. По графику (см. рис. 5.7) находим для печатного проводника $L_{\text{оп. пр}} = 1,67 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. По (5.42) определяем

$$U_{\text{лог. п. пр}} = L_{\text{оп. пр}} l_{\text{п. пр}} N I^2 / t_{\text{ф}}^+ I = 1,67 \cdot 10^{-6} \cdot 0,12 \cdot 5 \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,2 \text{ В.}$$

$$U_{\text{лог. к. р}} = n_1 (L_{\text{к}} / n_2) N I^2 / t_{\text{ф}}^+ I = 2 \cdot 30 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,06 \text{ В.}$$

Ответ. $U_{\text{лог. п. пр}} = 0,2$ В; $U_{\text{лог. к. р}} = 0,06$ В.

Помеха $U_{\text{лог}}$ трудно устранить схемными методами. Для ее уменьшения необходимо сокращать длину управляющей цепи, длину общих участков протекания токов посредством секционирования, число разъемов в ней, а также увеличивать число контактов, отводимых под данную цепь. На рис. 5.19, а, б показана топология несекционированной и секционированной цепей управления соответственно, причем секционирование получено переназначением контакта разъема. Заметим, что в данном случае амплитуда помехи $U_{\text{лог}}$ для секционированной цепи составит 0,6 $U_{\text{лог}}$ для несекционированной.

Помехи по шинам питания. Мы рассмотрели некоторые помехи, возникающие в сигнальных цепях связи элементов ЭВМ. В электрических соединениях элементов ЭВМ имеется еще один класс связей — шины питания. Они также могут быть источником различного рода помех. В статическом состоянии по шинам питания протекают стационарные токи, вызывающие постоянное падение напряжения. При работе устройств ЭВМ происходит переключение элементов из одного логи-

ческого состояния в другое и вследствие этого процесс переключения токов.

Шины питания, как и любая линия связи, имеют паразитные параметры: взаимные емкость и индуктивность с соседними линиями связи, собственные емкость и индуктивность. Искажение сигналов при взаимодействии линий связи было проанализировано выше. Рассмотрим помехи по цепям питания из-за переходных процессов в шинах, возникающих вследствие изменения тока. Переходной процесс в шине питания приводит к колебанию напряжения. Эти колебания, попадая на вход

логических элементов, могут привести к ложному срабатыванию.

На рис. 5.20 показано соединение логических элементов, расположенных на двух различных ТЭЗ. Пусть сигнал с элемента ЭЗ одновременно переключает N элементов Э4 — ЭМ. Рассмотрим возникновение помехи в цепи II, в которой элемент Э1 — управляющий, а элемент Э2 — чувствительный.

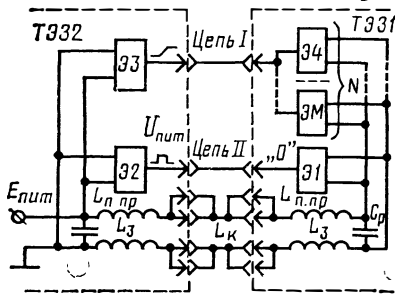


Рис. 5.20. Схема возникновения помехи $U_{пит}$

Амплитуда помехи $U_{пит}$ определяется по (5.42). Помеха $U_{пит}$ может быть как положительной, так и отрицательной полярности. Положительная помеха попадает на вход чувствительного элемента Э2 через вывод «земля» и выходную цепь элемента Э1, находящегося в состоянии логического «0». Отрицательная помеха $U_{пит}$ попадает на вход чувствительного элемента Э2 через вывод питания и выходную цепь элемента Э1, находящегося в состоянии логической «1».

В выражении для $U_{пит}$ параметром, которым может варьировать конструктор, является $L_{экв}$. В нее входят индуктивность печатного проводника или навесной шины и разъемных контактов питания и «земли». Индуктивность печатного проводника питания и «земли» конструктор может уменьшить за счет увеличения его площади (рекомендованная ширина шин питания 2—8 мм). В табл. 5.3 приведены эксперимен-

Таблица 5.3

Серия микросхем	Допустимая индуктивность шины заземления $L_{доп} \cdot 10^6$ (Гн) при импульсном токе, А							
	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08
104	—	0,06	0,08	0,10	0,11	0,15	0,20	0,25
106	0,25	0,30	0,36	0,40	0,44	—	—	—
114	0,33	0,44	0,55	0,80	—	—	—	—
130	—	—	0,04	0,14	0,27	0,46	0,54	0,63
133	—	—	0,04	0,14	0,27	0,45	0,54	0,63
136	0,16	0,23	0,32	0,44	0,80	—	—	—
155	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,36	0,40	0,45

тальные значения допустимой индуктивности шины «земля», при которой еще не происходит срабатывание микросхемы от помехи $U_{\text{пит}}$ (см. [16]). Пользуясь данными таблицы и графика зависимости индуктивности печатного проводника от его ширины (см. рис. 5.7), можно определить допустимую длину шин питания и «земли» при определенной их ширине.

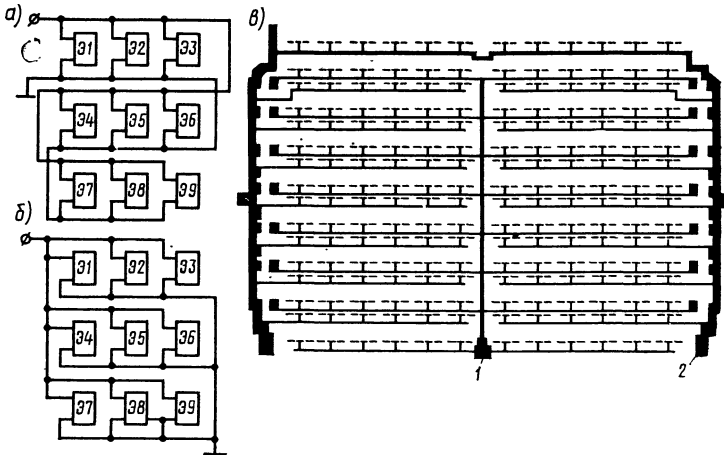


Рис. 5.21. Схема несекционированной (а) и секционированной (б) разводки питания и «земли» и вариант топологии слоя питания 1 и земли 2 при секционированной разводке (в)

Пример 5.5. Определить допустимую длину печатной шины «земля» для микросхем серии 155 при следующих исходных данных: ширина шины «земля» $W = 6$ мм, суммарный импульсный ток 0,10 А.

Решение. По табл. 5.3 определяем $L_{\text{доп}} = 0,36 \cdot 10^{-6}$ Гн, далее по графику, показанному на рис. 5.7, находим $L_0 = 0,009 \cdot 10^{-4}$ Гн/м, тогда $l_{\text{доп}} = 0,36 \cdot 10^{-6} / (0,009 \cdot 10^{-4}) = 0,4$ м.

Ответ. $l_{\text{доп}} = 0,4$ м.

Индуктивность уменьшается при использовании сплошных металлизированных (или сетчатых) поверхностей в многослойных печатных платах, применяемых в ТЭЗ или панели. Если межячеечный монтаж в панели осуществляется не с помощью МПП, то к панели крепится фольгированный текстолит («земля»). К нему припаиваются все выводы «земля» контактов разъемов.

Другой способ уменьшения помех по шинам питания — сокращение длины общих участков протекания токов по этим шинам посредством их секционирования. На рис. 5.21 показаны несекционированная (а) и секционированная (б) схемы разводки питания и топологический рисунок (в) слоя питания и

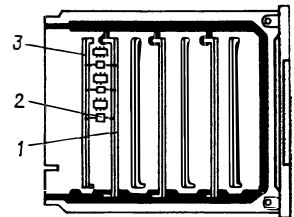


Рис. 5.22. Подвод питания и «земли» в ТЭЗ ЕС ЭВМ

«земли» при секционированной разводке для четырехслойной печатной платы.

Для уменьшения помех по шинам питания используют конденсаторы развязки. Конденсаторы 2 устанавливают между шинами питания 3 и «земли» 1 вблизи мест присоединения элементов к этим шинам (рис. 5.22). Тип и значения емкости C_p можно выбрать по выражениям:

$$C_p \geq [(t_{\phi}n)^2/L_{\text{ЭКВ}}]; \quad (5.43)$$

$$R_k \leq [L_{\text{ЭКВ}}/(t_{\phi}n)], \quad (5.44)$$

где R_k — модуль сопротивления конденсатора развязки; n — кратность уменьшения помехи.

Основную долю в $L_{\text{ЭКВ}}$ вносит индуктивность контакта разъема. Вследствие особенностей конструкции индуктивность контакта разъема довольно значительна (порядка 30 нГн). Уменьшение ее связано со значительным усложнением конструкции разъема.

Пример 5.6. Оценить помеху $U_{\text{пит}}$ для схемы, показанной на рис. 5.20, учитывая в $L_{\text{ЭКВ}}$ только индуктивность контактов разъема. Пусть $N = 10$; $L_k = 3 \cdot 10^{-8}$ Гн; $I/t_{\phi I} = 0,3 \cdot 10^6$ А/с; $n_1 = 2$ — число разъемов в цепи питания и «земли»; $n_2 = 2$ — число контактов в каждом разъеме, используемых для подвода питания и «земли».

Решение. Помеха $U_{\text{пит}} = n_1 (L_k/n_2) NI/t_{\phi I} = 2 (3 \cdot 10^{-8}/2) 10 \cdot 0,3 \times 10^6 = 0,09$ В.

Ответ. $U_{\text{пит}} = 0,09$ В.

Ясно, что для сокращения значения $U_{\text{пит}}$ следует отводить большее число контактов разъема для цепей питания и «земли».

§ 5.6. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНОЙ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ И ИХ СВЯЗЕЙ

На этапе технического проектирования анализируются искажения сигналов для оценки помехозащищенности элементов и выполнения требований по быстродействию при реальном конструктивном воплощении схмотехнических решений. Рассмотрим пример исследования топологии межсхемных соединений ТЭЗ ЕС Т000/0004 процессора ЭВМ ЕС-1030 только с точки зрения помехозащищенности элементов. На данном ТЭЗ реализованы два разряда регистра адресного слова памяти (РАСП) с соответствующими схемами управления. Триггер одного разряда построен на элементах $C16$, $D16$ и $G16$, а триггер другого — на элементах $K16$, $L16$ и $P16$ (рис. 5.23). Из схем управления нас будут интересовать только элементы $E10$ и $Q10$. На рис. 5.24 дан чертеж одной стороны платы этого ТЭЗ, причем изображены только указанные выше микросхемы и печатные проводники линий передачи сигналов установки в единицу (пунктиром показаны части этих проводников, проходящие по другой стороне платы).

Сигналы установки в единицу триггеров РАСП приходят на 34 и 32 (см. рис. 5.23) контакты разъема с регистра слова состояния программы (РССП) и далее через элементы $D4-1$ и $C4-1$ на контакты

04 и 05 микросхем B4 и B2 соответственно. Связи РАСП и РССП относятся к внутривитым и выполнены витыми парами. Можно выделить две взаимодействующие цепи (I и II), в каждую из которых входят: триггер РССП — печатная линия — контакт разъема — витая пара — контакт разъема (Т000/0004) — печатная линия — схема управления (элемент E10 или Q10) — печатная линия — триггер соответствующего разряда РАСП.

В том случае, когда один из разрядов РАСП устанавливается в единицу, а другой остается в нуле, возможно возникновение перекрестной помехи, причем включение элементов взаимодействующих цепей — согласное. Взаимодействием элементов линий связи цепей I и II, кроме частей, расположенных на ТЭЗ ЕС Т000/0004, можно пренебречь. Из рис. 5.23 и 5.24 видно, что на плате ТЭЗ ЕС Т000/0004, контакты цепей I и II являются близрасположенными, а печатные линии имеют значи-

мый участок взаимодействия $aa - bb$. В данном случае необходимо оценить перекрестную помеху U^n только положительной полярности на входе элементов E10 или Q10.

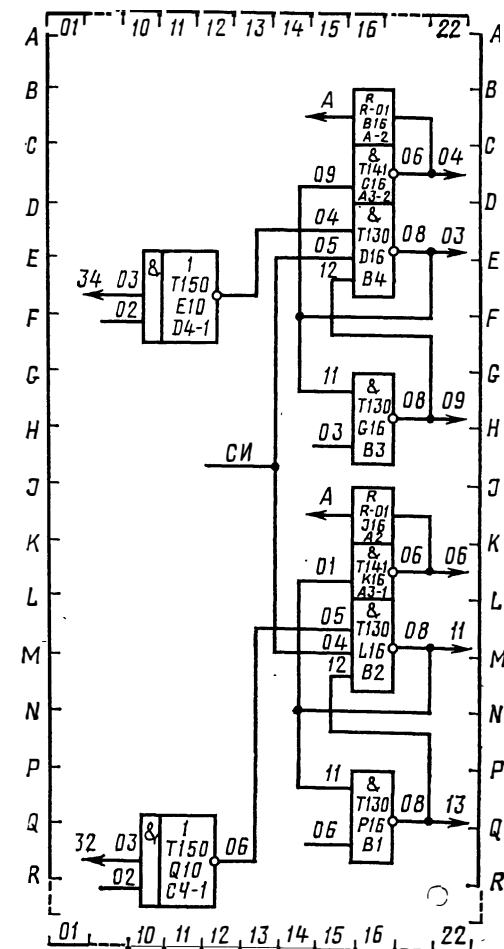


Рис. 5.23. Принципиальная электрическая схема ТЭЗ РАСП

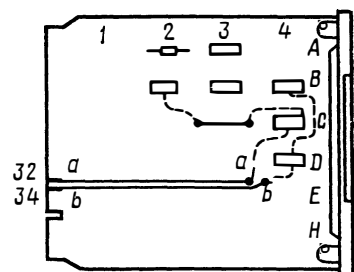


Рис. 5.24. Чертеж одной из сторон платы ТЭЗ Т000/004 процессора ЭВМ ЕС-1030

тельный участок взаимодействия $aa - bb$. В данном случае необходимо оценить перекрестную помеху U^n только положительной полярности на входе элементов E10 или Q10.

В пассивной цепи наводится также помеха $U_{\text{пит}}$ положительной полярности (управляющий элемент этой цепи находится в состоянии логического нуля). Таким образом, на входе элемента E10 или Q10 суммируются помехи U^n и $U_{\text{пит}}$.

Для расчета $U^п$ воспользуемся (5.35), а для помехи $U_{пит}$ — (5.42).

Исходные данные для расчета. Для интегральных схем ТТЛ: $R_{вых}(0) = 30$ Ом; $R_{вх} = 1000$ Ом; $I^a/t_{\Phi I}^+ = 0,2 \cdot 10^6$ А/с; $U^a/t_{\Phi U}^+ = 0,25 \cdot 10^9$ В/с; $I^a/t_{\Phi I}^- = 0,35 \cdot 10^6$ А/с; $U^a/t_{\Phi U}^- = 0,4 \cdot 10^9$ В/с; $N^a = 1$.

Для контактов разъема: $L_{к} = 2 \cdot 10^{-8}$ Гн; $L_{в.к} = 6 \cdot 10^{-9}$ Гн; $C_{в.к} = 0,8 \times 10^{-12}$ Ф; для печатных линий (из рис. 5.24) $l_{вз} = 98 \cdot 10^{-3}$ м. Так как параметры печатных линий те же, что и в примере 5.2, то $C_{в0} = 0,34 \cdot 10^{-10}$ Ф/м; $L_{в0} = 0,28 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Включение взаимодействующих цепей согласное, поэтому индуктивная составляющая перекрестной помехи, наводимая по переднему фронту, будет иметь отрицательную полярность, а по заднему — положительную. Оценим соотношение емкостной и индуктивной составляющих. По (5.37) для печатных проводников и контактов разъема соответственно получим:

$$k_{п.пр} = \frac{U_C}{U_L} = \frac{C_{в0}}{L_{в0}} \frac{R_{вых}}{N^a} 10^3 = \frac{0,34 \cdot 10^{-10}}{0,28 \cdot 10^{-7}} \cdot 30 \cdot 10^3 = 37,0;$$

$$k_{к.п} = \frac{C_{в.к}}{L_{в.к}} \frac{R_{вых}}{N^a} 10^3 = \frac{0,8 \cdot 10^{-12}}{6 \cdot 10^{-9}} \cdot 30 \cdot 10^3 = 4,0.$$

Так как в данном случае преобладает емкостная составляющая, суммарная перекрестная помеха положительной полярности будет наводиться передним фронтом. В данном случае выполняется условие $t_{\Phi} > 2,5 \tau$, поэтому экспоненту в выражении (5.35) можно опустить.

Рассчитаем перекрестную помеху отдельно для печатных проводников и контактов разъемов:

$$\begin{aligned} U_{п.пр}^п &= \frac{R_{вх} R_{вых}(0)}{R_{вх} + R_{вых}(0)} C_{в0} l_{вз} \frac{U^a}{t_{\Phi U}^+} - \frac{R_{вх}}{R_{вх} + R_{вых}(0)} L_{в0} l_{вз} \frac{I^a}{t_{\Phi I}^+} = \\ &= \frac{1000 \cdot 30}{1000 + 30} \cdot 0,34 \cdot 10^{-10} \cdot 98 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 10^9 - \frac{1000}{1000 + 30} \times \\ &\quad \times 0,28 \cdot 10^{-7} \cdot 98 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,0238 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{к.п}^п &= \frac{R_{вх} R_{вых}(0)}{R_{вх} + R_{вых}(0)} C_{в.к} \frac{U^a}{t_{\Phi U}^+} - \frac{R_{вх}}{R_{вх} + R_{вых}(0)} L_{в.к} \frac{I^a}{t_{\Phi I}^+} = \\ &= \frac{1000 \cdot 30}{1000 + 30} \cdot 0,8 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25 \cdot 10^9 - \frac{1000}{1000 + 30} \cdot 6 \cdot 10^{-9} \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,0046 \text{ В}. \end{aligned}$$

Суммарная перекрестная помеха $U^п = 0,0284$ В.

В цепь прохождения $U_{пит}$ входят по одному контакту двух разъемов, поэтому $U_{пит} = 2 L_{к} I^a / t_{\Phi I}^+ = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2 \cdot 10^6 = 0,008$ В.

Так как у схем ТТЛ для положительной помехи $U_{доп} = 0,4$ В, конструктивную реализацию рассматриваемой части схемы следует считать удачной.

**§ 5.7. РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Эти рекомендации формулируются по результатам исследования искажений сигналов из-за различных эффектов. На основании анализа искажений от эффекта отражений при наихудших сочетаниях влияющих факторов оценивается допустимая длина несогласованной невзаимодействующей линии связи и увеличение задержки сигнала. Исходя из допустимой перекрестной помехи находится максимальная длина взаимодействующих участков межсхемных связей при различном числе разъемов в цепи с учетом возможности суммирования помех, наводимых несколькими линиями связи. Оценка помехи по цепям управления позволяет определить допустимую длину управляющей линии связи, ее конфигурацию, число разъемов и число контактов в ней. По результатам анализа помехи по цепям питания рассчитывают их основные параметры, выбирают способ подвода питания и «земли». При этом формулируют также рекомендации и ограничения на совместную или раздельную компоновку элементов функциональной или принципиальной схемы, на размещение конструктивных модулей и трассировку.

Рекомендации по выполнению линий связи.

1. Необходимо соблюдать ограничения на допустимую длину невзаимодействующих линий связи. Например, для схем ТТЛ при $t_{\phi} \approx \approx 10$ нс максимально допустимая длина несогласованного печатного соединения не должна превышать 0,6 м, а внутриспанельного соединения витой парой — 1,0 м. Линии связи длиной 1—3 м, не выходящие за пределы устройства, должны выполняться согласованной экранированной витой парой. Линии связи длиной более 3 м или выходящие за пределы устройства следует выполнять коаксиальным кабелем.

2. Необходимо учитывать увеличение задержки сигналов при передаче их по несогласованной линии связи. Для схем ТТЛ среднего быстродействия приращение задержки при передаче сигнала по несогласованной витой паре можно определить по табл. 5.4. (где $l_{\Sigma} \leq 2$ м).

Таблица 5.4

Схема связи	Приращение задержки на выходе. нс			
	передающего элемента		линии связи	
	Δt_3^{01}	Δt_3^{10}	Δt_3^{01}	Δt_3^{10}
	$8 l_{\Sigma}$	$6 l_{\Sigma}$	$8 l_{\Sigma} + 5 l_i$	$6 l_{\Sigma} + 6 l_i$

3. Обратные провода витых пар должны подсоединяться к «земле» на приемном и передающем концах. Следует ограничивать длину раздельной части витой пары и число обратных проводов, приходящихся на один контакт разъема. Например, для схем ТТЛ длина раздельной части витой пары должна быть ≤ 3 см, а к одному контакту «земли» можно подсоединять не более трех обратных проводов.

4. Монтажная плата для выполнения внутриблочных соединений объемным монтажом должна иметь экранирующее покрытие со стороны монтажа. Экран должен быть соединен с шиной «земли» печатных плат.



Рис. 5.25. Частичное экранирование печатных проводников «заземленным» разделяющим проводником

5. Сигнальные проводники в соседних слоях следует проводить под углом 90 или 45°. Необходимо ограничивать длину взаимных участков межэлементных связей в одном слое с учетом числа взаимодействующих цепей и количества разъемов в них. Например, для связей схем ТТЛ среднего быстродействия, выполняемых печатными проводниками в пределах ТЭЗ, допустимая длина участка взаимодействия не должна превышать значений, указанных в табл. 5.5.

Введение разъемов во взаимодействующую цепь приводит к сокращению допустимой длины участка взаимодействия примерно на 25% на каждый разъем (если контакты разъемов являются соседними). Взаимосвязанные соединения на части длины, превышающей допустимую, выполняются экранированным проводом или коаксиальным кабелем.

6. Необходимо сокращать длину печатных проводников, по которым передаются сигналы синхронизации, удалять их от других сигнальных линий или выполнять частичное экранирование разделяющим печатным проводником, соединенным с общей «землей», как показано на рис. 5.25.


7. Разводку питания и «земли» следует выполнять проводниками с низким сопротивлением. Всю свободную площадь в слое рекомендуется использовать для шин питания и «земли».

8. Шины питания и «земли» в соседних слоях следует располагать друг под другом для увеличения емкости конструктивного фильтра.

9. Для уменьшения помехи по питанию индуктивного характера необходимо шины питания и «земли» делать секционированными и использовать развязывающие конденсаторы.

Таблица 5.5

Количество параллельных проводников	Допустимая длина участка взаимодействия (мм) при ширине d (мм) зазора между проводниками				
	0,5	1,0	1,5	3,0	5,0
2	140	170	180	210	240
3	85	100	110	125	140
4	70	85	90	100	110
5	55	70	85	90	100

$$R_{пл} = \frac{l_2 - l_1}{\lambda S_{пл}}$$


§ 6.1. ТЕПЛООБМЕН В ЭВМ

Увеличение плотности упаковки компонентов и скорости переключения элементной базы приводит к росту удельной мощности рассеяния. Значительная часть потребляемой активными элементами ЭВМ электрической энергии превращается в тепловую, что повышает температуру конструкции. Большинство элементов конструкции имеют температурно-зависимые свойства. Колебания температуры конструкции приводят к изменению размеров деталей. В деталях из пластмасс повышение температуры приводит к возрастанию электропроводности, что создает утечки тока через них. В магнитных материалах при высоких температурах снижается индуктивность насыщения в сердечниках, а при достижении точки Кюри магнитные свойства вообще пропадают. В полупроводниках при колебаниях температуры изменяется плотность и подвижность носителей тока. Резисторы различных типов имеют как положительный, так и отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

При высоких значениях температур в полупроводниковых структурах происходят химические реакции, способные привести к их разрушению. Например, в интегральных схемах на МДП-структурах при $\theta = 673 \div 773$ К алюминий поглощается двуокисью кремния, что разрушает внутренние соединения. Даже в диапазонах рабочих температур токи утечки через малые дефекты в окисле кремния могут вызывать локальный нагрев, в результате которого температура поднимется до таких значений, при которых реакция поглощения усилится и разрушит пленку окисла.

Температурный или тепловой режим, т. е. пространственно-временное изменение температуры, влияет на помехоустойчивость и интенсивность отказов элементов (помехоустойчивость уменьшается с увеличением температурного градиента между кристаллами, а интенсивность отказов увеличивается при возрастании абсолютной температуры). В данной главе будет рассматриваться только стационарный тепловой режим, т. е. такой, при котором температура во всех элементах конструкции не изменяется во времени. Для обеспечения необходимых уровней надежности и помехозащищенности разработчиками устанавливается максимально допустимая рабочая температура компонентов ЭВМ.

Выделяемая элементами ЭВМ тепловая энергия может передаваться другим элементам конструкции и отводиться в окружающую среду. Элементы, выделяющие тепловую энергию, называются *источниками*, поглощающие ее — *стоками*, а сам процесс — *теплообменом*. Теплообмен может осуществляться кондукцией (теплопроводностью), естественной и принудительной конвекцией и излучением.

Тепловой режим конструкции ЭВМ зависит от температуры окружающей среды, мощности источников и стоков тепловой энергии и принудительной системы охлаждения, а также условий теплообмена, к которым относятся геометрические параметры и теплофизические свойства элементов конструкции. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать нормальный тепловой режим элементов. Тепловой режим называется *нормальным*, если температуры элементов конструкции равны или ниже допустимых значений по техническому заданию. Обеспечение необходимых температурных условий достигается при проектировании выбором системы охлаждения как для ЭВМ или системы целом, так и для отдельных элементов конструкции.

§ 6.2. СПОСОБЫ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В общем случае перенос тепловой энергии Φ_i от изотермической поверхности, имеющей температуру θ_i , к изотермической поверхности с температурой θ_j описывается выражением

$$\theta_i - \theta_j = F_{i,j} \Phi_i \quad \text{или} \quad \theta_j - \theta_i = F_{j,i} \Phi_j, \quad (6.1)$$

где $\theta_i - \theta_j$, $\theta_j - \theta_i$ — температурный напор; $F_{i,j}$ — коэффициент пропорциональности или тепловой коэффициент ($F_{i,j} = F_{j,i}$), причем структура коэффициента $F_{i,j}$ зависит от существующих в каждом конкретном случае способов переноса тепловой энергии.

Рассмотрим основные механизмы переноса тепловой энергии: кондукцию, конвекцию и излучение.

Кондуктивный перенос тепловой энергии. Кондукция или теплопроводность — это передача теплоты посредством взаимодействия между молекулами тела или соприкасающихся тел. Если соприкасающиеся тела или участки тела имеют разную температуру, то за счет теплопроводности возникает поток теплоты, направленный в сторону уменьшения температуры. Теплообмен кондукцией осуществляется также в среде и между твердым телом и средой, если в среде нет движения или у поверхности тела существует неподвижная пленка жидкости (плечный режим движения среды).

Рассмотрим кондуктивный перенос теплоты на примере твердого тела. На рис. 6.1 показано сечение твердого тела и следы двух изотермических поверхностей i и j , площади поверхности которых S_i и S_j . Пусть $\theta_i > \theta_j$, l — нормаль к изотермическим поверхностям, являющаяся их координатой. Теплообмен кондукцией происходит по закону Фурье, согласно которому для некоторой изотермической поверхности l

$$\Phi_{\dot{y}} = -\lambda d\theta/dl, \quad (6.2)$$

где $\Phi_{\dot{y}}$ — количество тепловой энергии, проходящей через единицу площади изотермической поверхности, т. е. плотность теплового потока Вт/м²; λ — коэффициент теплопроводности материала. Вт/(м·К).

Так как по определению $\Phi_{\dot{y}} = \Phi(l)/S(l)$, зависимость (6.2) будет

$$-d\theta = \frac{\Phi(l)}{\lambda S(l)} dl. \quad (6.3)$$

Проинтегрировав левую часть (6.3) от θ_i до θ_j , а правую — от l_i до l_j , получим

$$\theta_i - \theta_j = (1/\lambda) \int_{l_i}^{l_j} [\Phi(l)/S(l)] dl. \quad (6.4)$$

На основании (6.1) и (6.4) тепловой коэффициент

$$F_{i,j} = (\lambda \Phi_i)^{-1} \int_{l_i}^{l_j} [\Phi(l)/S(l)] dl. \quad (6.5)$$

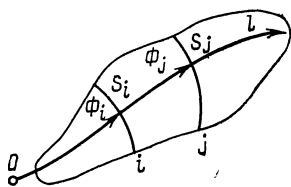


Рис. 6.1. Перенос теплоты кондукцией в твердом теле

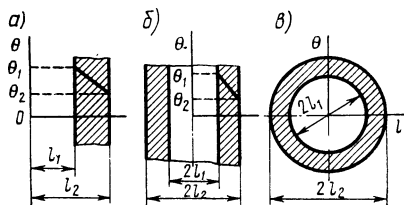


Рис. 6.2. Стенки плоской (а), цилиндрической (б) и шаровой (в) конфигураций

Если между изотермическими поверхностями i и j отсутствуют стоки и источники тепловой энергии [$\Phi(l) = \Phi_i = \Phi_j = \text{const}$], то $F_{i,j}$ называется тепловым сопротивлением $R_{i,j}$, а формула (6.5) примет вид

$$R_{i,j} = (1/\lambda) \int_{l_i}^{l_j} [1/S(l)] dl. \quad (6.6)$$

Величина, обратная тепловому сопротивлению, называется *тепловой проводимостью*:

$$\sigma_{i,j} = 1/R_{i,j}. \quad (6.7)$$

Элементы конструкции ЭВМ могут иметь различную форму. Выражения для теплового сопротивления однородных тел плоской, цилиндрической и шаровой конфигурации (рис. 6.2) соответственно имеют вид:

$$R_{\text{пл}} = (l_2 - l_1) / (\lambda S_{\text{пл}}); \quad (6.8)$$

$$R_{\text{ц}} = \frac{1}{\lambda 2\pi L} \ln \frac{l_2}{l_1}; \quad (6.9)$$

$$R_{\text{ш}} = [1/(\lambda 4\pi)] (1/l_1 - 1/l_2), \quad (6.10)$$

где $S_{\text{пл}}$ — площадь изотермической поверхности плоской стенки; L — высота цилиндрической стенки.

Коэффициент теплопроводности λ для различных материалов указан в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Серебро	390—410	Текстолит, стеклотекстолит	0,231—0,385
Алюминий АЛ-7	196	Стекло	0,74
Дюралюминий Д-16	160—180	Фарфор	0,854
Бронза	64	Керамика 22ХС	7,0
Латунь	85,8	Ситалл	1,5
Медь	400	Поликор	30,0
Сталь	45,5	Картон плотный	0,230
Резина	0,15	Пенопласт	0,58
Эбонит, гетинакс	0,156—0,175	Воздух (при $\theta = 313$ К)	$2,76 \cdot 10^{-2}$
Слюда	0,583	Вода (при $\theta = 313$ К)	0,635
Полихлорвиниловая пластмасса	0,443		

Нередко элементы конструкции ЭВМ представляют собой соприкасающиеся друг с другом тела, выполненные из разных материалов. В месте контакта тел возникает тепловое сопротивление, которое зависит от степени непараллельности и микронеровностей сопрягаемых поверхностей. Если непараллельностью поверхностей можно пренебречь, то удельное тепловое сопротивление контакта определяется физико-механическими свойствами материалов, чистотой обработки поверхностей и удельным давлением сжатия. Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи кондукцией α_T в контакте некоторых пар материалов при удельной нагрузке 1000 Н/см^2 и шероховатости поверхности $Rz 20$ даны в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Материал	Коэффициент теплопередачи $\alpha_T \cdot 10^{-4}$, Вт/(м ² ·К)	Материал	Коэффициент теплопередачи α_T , Вт/(м ² ·К)
Медь — алюминий	12	Сталь — дюралюминий	$8,4 \cdot 10^3$
Медь — медь	10	Сталь — сталь	$1,5 \cdot 10^3$
Медь — латунь	5,5	Металл — краска — металл	500,0
Медь — дюралюминий	5,0	Металл — стекло	(0,6— $2,3$) $\cdot 10^4$
Дюралюминий — дюралюминий	4,0	Сталь — сталь (резьбовое соединение)	$1,7 \cdot 10^3$
Медь — сталь	1,2		

При известном значении коэффициента теплопередачи α_T (удельной тепловой проводимости) тепловое сопротивление контакта

$$R_K = 1/(\alpha_T S). \quad (6.11)$$

Конвективный теплообмен. Перенос теплоты конвекцией связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твер-

дым телом (элементом конструкции). Тепловая энергия передается как между твердым телом и средой, так и в самой среде. Конвекция заключается в совместном действии явлений теплопроводности среды, запасаения энергии в ней и ее перемешивания. Конвекция называется *естественной*, если она осуществляется при свободном движении среды за счет разности плотности холодной и горячей областей, и *принудительной*, если движение среды происходит под действием внешних сил.

Теплообмен конвекцией описывается законом Ньютона-Рихмана, согласно которому тепловой поток от поверхности твердого тела к среде или наоборот (Вт)

$$\Phi_{ic} = \alpha_{ic} (\theta_i - \theta_c) S_i, \quad (6.12)$$

где α_{ic} — коэффициент теплообмена конвекцией между поверхностью тела и средой, Вт/(м²·К); θ_i и θ_c — температуры поверхности тела и среды; S_i — площадь поверхности теплообмена тела, м².

Из (6.1) и (6.12) получаем

$$F_{ic} = 1/(\alpha_{ic} S_i). \quad (6.13)$$

Если тепловой поток Φ_{ic} при движении от тела к среде не меняется, то

$$R_{ic} = F_{ic} \quad \text{и} \quad \sigma_{ic} = \alpha_{ic} S_i. \quad (6.14)$$

Нередко тепловая энергия передается от поверхности i к поверхности j через жидкую или газообразную прослойку. В этом случае тепловой поток

$$\Phi_{i,j} = k_{i,j} (\theta_i - \theta_j) S_i, \quad (6.15)$$

где $k_{i,j}$ — коэффициент теплопередачи в прослойке, Вт/(м²·К).

Если между поверхностью i и j нет источников и стоков тепловой энергии, то

$$R_{i,j} = 1/(k_{i,j} S_i); \quad (6.16)$$

$$\sigma_{i,j} = k_{i,j} S_i. \quad (6.17)$$

Коэффициенты теплообмена конвекцией α_{ic} и теплопередачи в прослойке $k_{i,j}$ являются функциями физико-механических и кинематических свойств жидкости или газа, а также параметров, характеризующих форму и размеры поверхностей. Рассмотрим выражения для определения коэффициентов α_{ic} и $k_{i,j}$ некоторых типичных элементов конструкции электронной аппаратуры. При анализе процессов теплообмена конвекцией используются критерии Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса:

$$Nu = \alpha_{ic} L / \lambda_c; \quad (6.18)$$

$$Gr = g \beta_c (\theta_i - \theta_c) L^3 / \nu_c^2; \quad (6.19)$$

$$Pr = \nu_c / a_c; \quad (6.20)$$

$$Re = v L / \nu_c, \quad (6.21)$$

где L — определяющий размер элемента конструкции (длина обтекания, например, длина пластины или цилиндра. Для тел сложной кон-

фигурации рассчитывается средняя длина обтекания, зависящая от коэффициента заполнения объема); λ_c , β_c , ν_c , a_c — соответственно коэффициенты теплопроводности, объемного расширения жидкости или газа (1/К), кинематической вязкости (m^2/c), температуропроводности (m^2/c); g — ускорение силы тяжести, m/c^2 ; v — скорость потока жидкости или газа, m/c .

Основные физические параметры и критерий Прандтля для сухого воздуха при $p = 101$ кПа и воды на линии насыщения при различных температурах приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

θ , К	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr	β
Сухой воздух						
223	1,584	1010	2,04	9,23	0,728	—
253	1,395	1010	2,28	12,79	0,716	—
273	1,293	1000	2,44	13,28	0,707	—
283	1,247	1000	2,51	14,16	0,705	—
293	1,205	1000	2,60	15,06	0,703	—
303	1,165	1000	2,68	16,00	0,701	—
313	1,128	1000	2,76	16,96	0,699	—
323	1,093	1000	2,83	17,95	0,698	—
333	1,060	1000	2,90	18,97	0,696	—
343	1,029	1000	2,97	20,02	0,694	—
353	1,000	1000	3,05	21,09	0,692	—
363	0,972	1000	3,13	22,10	0,690	—
373	0,946	1000	3,21	23,13	0,688	—
393	0,898	1000	3,34	25,45	0,686	—
Вода на линии насыщения						
273	999,9	4230	0,552	1,790	13,70	-0,63
283	999,6	4220	0,575	1,306	9,56	+0,70
293	998,2	4210	0,600	1,006	7,06	1,82
303	995,6	4200	0,618	0,805	5,50	3,21
313	992,2	4200	0,635	0,659	4,30	3,87
323	988,0	4200	0,647	0,556	3,56	4,49
333	983,2	4210	0,660	0,478	3,00	5,30
343	977,7	4220	0,667	0,415	2,56	5,80
353	971,8	4220	0,674	0,366	2,23	6,30
363	965,3	4225	0,680	0,326	1,95	7,00
373	958,3	4230	0,682	0,295	1,75	7,50

В таблице и далее ρ — плотность воздуха или воды; C_p — теплоемкость воздуха или воды.

Естественная конвекция в неограниченном пространстве. Теплообмен неограниченного цилиндра. Неограниченными цилиндрами в конструкции ЭВМ можно считать, например, навесные проводники (проводной и струнный монтаж). При ламинарном движении среды ($Gr \cdot Pr = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$) коэффициент теп-

лообмена конвекцией [Вт/(м²·К)]

$$\alpha_{ic} = A_1 [(\theta_i - \theta_c)/d^5]^{1/8}, \quad (6.22)$$

где A_1 — коэффициент, определяемый из табл. 6.4 (см. [6]); d — диаметр цилиндра, м.

Таблица 6.4

Среда	Значения коэффициентов при $\theta_m = 0.5 (\theta_i + \theta_c)$, К										
	273	283	293	303	313	333	353	373	393	413	423
Коэффициент A_1											
Воздух	0,291	—	0,295	—	0,3	0,306	0,310	0,315	0,320	—	—
Вода	9,350	—	13,10	—	15,7	17,60	19,00	20,00	—	—	—
Коэффициент A_2											
Воздух	—	1,40	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245
Вода	—	90,0	105	127	149	178	205	227	—	—	—
Коэффициент A_3											
Воздух	1,69	—	1,61	—	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23	—	—
Вода	102	—	198	—	290	363	425	480	610	—	—

Теплообмен плоской и цилиндрической стенок. К этому случаю относится, например, естественная конвекция между корпусом ЭВМ и окружающей его средой. Для таких элементов конструкции коэффициент теплообмена определяется по закону 1/4 степени, если выполняется условие

$$(\theta_i - \theta_c) \leq (840/L)^3, \quad (6.23)$$

и по закону 1/3 степени в противном случае (здесь L — определяющий размер, мм).

В общем виде коэффициент теплообмена конвекцией

$$\alpha_{ic} = K_{op} A_2 [(\theta_i - \theta_c)/L]^{1/4} K_n, \quad (6.24)$$

или

$$\alpha_{ic} = K_{op} A_3 (\theta_i - \theta_c)^{1/3} K_n, \quad (6.25)$$

где K_{op} — коэффициент, учитывающий ориентацию поверхности:

Коэффициент и определяющий размер	K_{op}	L
Вертикальные плоская и цилиндрическая стенки высотой h	1	h
Горизонтальная плоскость, рассеивающая тепловую энергию вверх	1,3	l_{min}
Горизонтальная плоскость, рассеивающая тепловую энергию вниз	0,7	l_{min}

l_{min} — меньший размер пластины; A_2, A_3 — коэффициенты, учитывающие теплофизические параметры среды (см. табл. 6.4); $K_n =$

$= (H_{\text{конс}}/H_{\text{норм}})^{2n}$ — коэффициент, учитывающий давление внутри конструкции; $H_{\text{конс}}$ и $H_{\text{норм}}$ — соответственно давление внутри конструкции и нормальное давление окружающей среды; n — показатель степени (1/4 или 1/3).

Вынужденная конвекция в неограниченном пространстве. Критериальное уравнение для коэффициента теплообмена конвекцией при вынужденном движении среды вдоль плоской или цилиндрической поверхности (рис. 6.3): при ламинарном движении среды ($Re < 4 \cdot 10^4$)

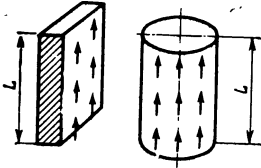


Рис. 6.3. Движение среды вдоль плоской или цилиндрической стенок

$$Nu_{\text{л}} = 0,66 Re^{0,5} Pr_c^{0,43} (Pr_c/Pr_{\text{п}})^{0,25}; \quad (6.26)$$

при турбулентном движении среды ($Re > 4 \cdot 10^4$)

$$Nu_{\text{т}} = 0,037 Re^{0,8} Pr_c^{0,43} (Pr_c/Pr_{\text{п}})^{0,25}. \quad (6.27)$$

Здесь для подсчета Pr_c и $Pr_{\text{п}}$ физические параметры среды определяются при температуре среды (набегающего потока) и поверхности соответственно (для остальных критериев — при температуре среды). Определяющим размером является длина стенки в направлении движения среды. Для воздуха при ($\theta_i - \theta_c$) меньше сотен градусов выражения (6.26) и (6.27) упрощаются:

$$Nu_{\text{л}} = 0,57 \sqrt{Re}; \quad Nu_{\text{т}} = 0,032 Re^{0,8}. \quad (6.28)$$

Связь между коэффициентом теплообмена конвекцией и критерием Нуссельта устанавливается формулой (6.18). При ламинарном и турбулентном движении воздуха соответственно можно значение коэффициента определять по выражениям:

$$\begin{aligned} \alpha_{i \text{ с. л}} &= 0,57 (\lambda_c/L) \sqrt{vL/\nu_c}; \\ \alpha_{i \text{ с. т}} &= 0,032 (\lambda_c/L) (vL/\nu_c)^{0,8}. \end{aligned} \quad (6.29)$$

При поперечном обтекании потоком воздуха тел, находящихся в неограниченном или замкнутом пространстве, при $10 < Re < 10^5$ критерий Нуссельта

$$Nu = 0,8 \sqrt{Re}. \quad (6.30)$$

Виды тел, для которых может быть использована формула (6.30), и их определяющий размер показаны на рис. 6.4.

Теплообмен конвекцией в каналах. Область между двумя субблоками или платами можно рассматривать как канал, в котором происходит свободное или вынужденное движение воздуха (рис. 6.5). Эту область можно считать плоским каналом, если его ширина

$$b_{\text{эф}} = b - V_{\text{дет}}/(L_z L_y), \quad (6.31)$$

где $V_{\text{дет}}$ — суммарный объем деталей, установленных на обеих платах; L_z — высота платы; L_y — длина платы — ее размер в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.

Коэффициент теплообмена конвекцией непостоянен по длине (высоте) канала. Для инженерных расчетов используется понятие среднего коэффициента теплообмена α_{ic} . При естественном движении воздуха (канал ориентирован вертикально, скорость движения среды постоянна по длине канала, $b \ll L_y, L_z$) коэффициент теплообмена конвекцией не зависит от координат:

$$\alpha_{ic} = 4,12 \lambda_c / b_{эф}. \quad (6.32)$$

При вынужденной конвекции (ламинарное движение воздуха $Pr = 0,7$) среднее значение критерия Нуссельта

$$\overline{Nu}_n = 6,18 \sqrt{l_n / L_k}, \text{ если } L_k \leq l_n; \quad (6.33)$$

$$\overline{Nu}_n = 4,12 (1 + l_n / 2L_k), \text{ если } L_k > l_n. \quad (6.34)$$

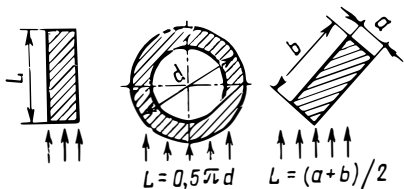


Рис. 6.4. Поперечное обтекание элементов конструкции

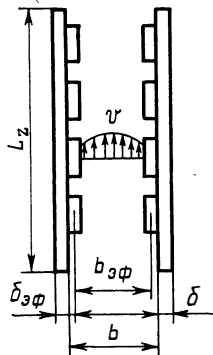


Рис. 6.5. Канал между двумя субблоками

При турбулентном движении воздуха

$$\overline{Nu}_T = 1,165 Nu_\infty (l_n / L_k)^{0,167}, \text{ если } L_k \leq l_n; \quad (6.35)$$

$$\overline{Nu}_T = Nu_\infty (1 + 0,165 l_n / L_k), \text{ если } L_k > l_n. \quad (6.36)$$

Здесь L_k — размер канала в направлении движения воздуха (для рис. 6.5 $L_k = L_z$); $l_n = 0,01 b_{эф} Re$ [для формул (6.33) и (6.34)]; $l_n = 40 \times b_{эф}$ [для формул (6.35) и (6.36)].

$$Nu_\infty = 0,019 Re^{0,8}. \quad (6.37)$$

В формулах (6.18) и (6.21) для ламинарного потока воздуха определяющим размером будет $L = b_{эф}$, а для турбулентного $L = 2b_{эф}$.

Для воздушного зазора между субблоками с интегральными схемами в прямоугольных корпусах при вынужденной конвекции (ОСТ 4 ГО. 012. 032) коэффициент теплообмена

$$\alpha_{ic} = 0,29 \lambda_c Re^{0,5} / d_{эКВ} \text{ при } Re \leq 10^3; \quad (6.38)$$

$$\alpha_{ic} = 0,037 \lambda_c Re^{0,8} / d_{эКВ} \text{ при } 10^3 < Re \leq 10^4, \quad (6.39)$$

где $d_{эКВ}$ — эквивалентный диаметр воздушного зазора между субблоками ($d_{эКВ} \approx b_{эф}$).

Теплообмен при вынужденном движении жидкости в трубах. При ламинарном движении жидкости в трубе круглого сечения ($Re < 2200$) критерий Нуссельта

$$Nu_{\text{л}} = 0,15 \sqrt[3]{Re} Gr^{0,1} Pr_c^{0,43} (Pr_c/Pr_{\text{тр}})^{0,25} \epsilon_L, \quad (6.40)$$

где ϵ_L — поправочный коэффициент, зависящий от соотношения диаметра и длины трубы.

Если $Re > 10^4$, то движение жидкости в трубе будет турбулентным, а критерий Нуссельта

$$Nu_{\text{т}} = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8} \epsilon'_L. \quad (6.41)$$

Здесь поправочный коэффициент ϵ'_L зависит не только от отношения l/d , но и от значения критерия Рейнольдса. Коэффициенты ϵ_L и ϵ'_L при $Re = 5 \cdot 10^4$ для различных значений l/d и режимов движения жидкости в трубе даны ниже:

l/d	1	2	5	10	15	20	30	50
ϵ_L	1,9	1,7	1,44	1,28	1,17	1,13	1,05	1,00
ϵ'_L	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,00

В качестве определяющей берется средняя температура жидкости (K) на входе и выходе из трубы:

$$\theta_c = 0,5 (\theta_{\text{вх}} + \theta_{\text{вых}}).$$

Определяющим размером в (6.18) и (6.21) является диаметр трубы ($L = d$). При некруглом сечении трубы эквивалентный диаметр (m)

$$d_{\text{экв}} = 4F/\Pi, \quad (6.42)$$

где F , Π — соответственно площадь (m^2) и полный смачиваемый периметр (m) поперечного сечения трубы.

Определяющая среднерасходная скорость (m/c)

$$v = G_v/F, \quad (6.43)$$

где G_v — объемный расход жидкости, m^3/c .

Если тепловая энергия, воспринимаемая хладагентом, расходуется только на изменение его теплосодержания, то отводимая через каждый канал или трубу мощность

$$\Phi = C_p \rho G_v (\theta_{\text{вых}} - \theta_{\text{вх}}), \quad (6.44)$$

где C_p — удельная теплоемкость хладагента, $Dж/(кг \cdot K)$; ρ — его плотность, $кг/m^3$.

Теплообмен излучением. Тепловая энергия излучается электромагнитными волнами в инфракрасном диапазоне длин. По закону Стефана — Больцмана излучаемая в пространство энергия ($Вт$)

$$\Phi = \epsilon C_0 S (\theta/100)^4, \quad (6.45)$$

где ϵ — степень черноты тела; $C_0 = 5,67 \text{ Вт} \cdot (m^2 \cdot K^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; S — площадь излучающей поверхности тела, m^2 ; θ — температура тела.

Тепловая энергия ($Вт$), передаваемая излучением от поверхности тела i с температурой θ_i и площадью S_i к поверхности тела j с темпера-

турой θ_j и площадью S_j , на основании того же закона:

$$\Phi_{i,j} = \varepsilon_{\text{пр},i,j} C_0 \varphi_{i,j} S_i [(\theta_i/100)^4 - (\theta_j/100)^4], \quad (6.46)$$

где $\varepsilon_{\text{пр},i,j}$ — приведенная степень черноты тел i и j ; $\varphi_{i,j}$ — коэффициент облученности, показывающий, какая часть тепловой энергии, излучаемой телом i , попадает на тело j ; θ_i и θ_j — абсолютная температура тел i и j .

Зависимость (6.46) можно представить в виде

$$\Phi_{i,j} = \alpha_{\text{л},i,j} (\theta_i - \theta_j) S_i. \quad (6.47)$$

Коэффициент теплообмена излучением между телами i и j

$$\alpha_{\text{л},i,j} = \varepsilon_{\text{пр},i,j} \varphi_{i,j} \cdot 5,67 \times 10^{-8} (\theta_i^4 - \theta_j^4) / (\theta_i - \theta_j). \quad (6.48)$$

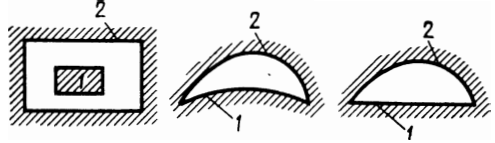


Рис. 6.6. Теплообмен излучением между телом 1 и охватывающей его оболочкой 2

Коэффициент ε зависит от материала излучающего тела и состояния его поверхности (для некоторых материалов значения ε даны в табл. 6.5). Коэффициент облученности $\varphi_{i,j}$ зависит от размеров, формы

Таблица 6.5

Материал тела и состояние поверхности	θ , К	ε	Материал тела и состояние поверхности	θ , К	ε
Алюминий полированный	323—773	0,04—0,06	Лак черный ма- говый	313—373	0,96—0,98
Алюминий сильно окисленный	323—773	0,2—0,3	Муар серый, черный	293	0,89—0,90
Дюралюминий Д-16	323—623	0,37—0,41	Краска алюми- ниевая	373	0,28
Медь шлифованная	293	0,03	Картон, бумага, ткань	293—573	0,93
Краски эмалевые	293—373	0,92			

и взаимной ориентации тел. Приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{пр},i,j}$ является функцией степени черноты тел i и j (ε_i и ε_j) и коэффициента $\varphi_{i,j}$. Рассмотрим формулы для определения коэффициентов $\varphi_{i,j}$ и $\varepsilon_{\text{пр},i,j}$ для следующих случаев.

Для теплообмена между неограниченными плоскопараллельными поверхностями коэффициенты облученности $\varphi_{1,2} = \varphi_{2,1} = 1$, а приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр},1,2} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1), \quad (6.49)$$

где ε_1 и ε_2 степень черноты тел 1 и 2.

Для теплообмена между телом и охватывающей его оболочкой (рис. 6.6)

$$\varphi_{1,2} = 1; \quad \varphi_{2,1} = S_1/S_2, \quad (6.50)$$

где S_1 и S_2 — площади поверхности тел 1 и 2.

Приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр},2} = 1/[1/\varepsilon_1 + \varphi_{2,1}(1/\varepsilon_2 - 1)]. \quad (6.51)$$

Вышеприведенные соотношения используются при расчете тепловых режимов конструкций и узлов ЭВМ.

§ 6.3. ПРИНЦИПЫ СУПЕРПОЗИЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И МЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ

Принцип суперпозиции температурных полей. Конструкция ЭВМ представляет собой систему многих тел, являющихся источниками или стоками тепловой энергии. Возникает задача определения температуры каждого тела (элемента конструкции), находящегося во взаимном тепловом обмене с другими телами и окружающей средой. Система тел, находящихся во взаимном теплообмене, схематично изображена на рис. 6.7. Перегрев изотермической поверхности j тепловым потоком, передаваемым от изотермической поверхности i , определяется по формуле (6.1):

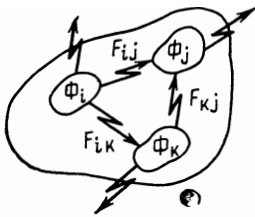


Рис. 6.7. Система тел, находящихся во взаимном теплообмене

Если мощности источников и стоков тепловой энергии и тепловые коэффициенты не зависят от температуры, то в соответствии с принципом суперпозиции суммарный наведенный перегрев тела j из-за теплообмена с остальными телами можно найти как алгебраическую сумму каждого перегрева:

$$\Delta\theta_{j,i} = \theta_i - \theta_j = F_{i,j}\Phi_i.$$

Если мощности источников и стоков тепловой энергии и тепловые коэффициенты не зависят от температуры, то в соответствии с принципом суперпозиции суммарный наведенный перегрев тела j из-за теплообмена с остальными телами можно найти как алгебраическую сумму каждого перегрева:

$$\Delta\theta_{nj} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n F_{i,j} \Phi_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^m F_{k,j} \Phi_k, \quad (6.52)$$

где n и m — число элементов конструкции, являющихся источниками и стоками тепловой энергии для тела j .

Учитывая температуру окружающей среды θ_c и собственный перегрев тела

$$\Delta\theta_{j,j} = \Phi_j F_{j,j}, \quad (6.53)$$

получим окончательное выражение для определения температуры

$$\theta_j = \theta_c + \sum_{i=1}^n F_{i,j} \Phi_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^m F_{k,j} \Phi_k. \quad (6.54)$$

Принцип суперпозиции температурных полей может быть применен и тогда, когда тепловые коэффициенты зависят от температуры. В этом случае тепловые коэффициенты $F_{i,j}$ или тепловые сопротивления $R_{i,j}$ необходимо определять при данной температуре, т. е. выражение (6.54) можно использовать при расчетах, например по методу последовательных приближений.

Принцип местного влияния. Этот принцип позволяет в ряде случаев значительно упростить задачу анализа пространственного распределения температурного поля. В работе [6] этот принцип сформулирован следующим образом: любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на отдаленные участки поля.

Источники тепловой энергии в общем случае неравномерно распределены в объеме конструкции ЭВМ. Они могут иметь различные геометрические размеры или состоять из материалов, теплофизические свойства которых существенно различны. Если выделяемая источниками тепловая энергия одинакова, то на основании принципа местного влияния можно утверждать, что на некотором удалении от них каждый наводит одинаковый перегрев. На границе элемента или нескольких элементов из разных материалов может резко измениться температурный градиент, но на некотором расстоянии от границы неоднородности практически не влияют на температурное поле. Расстояние, на котором конфигурация тела не влияет на характер температурного поля, равно наибольшему размеру этого тела. На основании принципа местного влияния можно утверждать, что наведенный перегрев в некоторой точке конструкции практически не зависит от размеров и конфигурации источников и стоков тепловой энергии, если они удалены от этой точки на соответствующее расстояние. Вблизи же от элементов температурное поле зависит от их формы, размеров и характера распределения в них тепловой энергии.

§ 6.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТИПОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Благодаря конструктивной унификации элементов ЭВМ типовые конструкции характеризуются регулярностью в одном, двух или трех направлениях. Метод определения тепловых сопротивлений и коэффициентов теплопроводности таких конструкций изложен в [6]. В типовых конструкциях можно выделить некоторый элементарный объем (ячейку), повторяя который в соответствующих направлениях, получим исходную конструкцию. Такие конструкции можно считать анизотропными телами, имеющими неодинаковые коэффициенты теплопроводности по основным геометрическим направлениям, которые равны соответствующим коэффициентам элементарной ячейки.

Рассмотрим задачу определения тепловых сопротивлений пакета субблоков (рис. 6.8) в следующих предположениях: сквозная циркуляция воздуха между субблоками отсутствует, излучением тепловой энергии в зазорах можно пренебречь. Таким образом, тепловая энергия передается кондукцией в твердых телах (элементах конструкции субблока) и в воздушных зазорах. На рис. 6.9 изображены основные части элементарной ячейки: часть платы субблока 1; зазор 2 между платой субблока и корпусом ИС, заполненный теплопроводящим материалом; корпус 3 ИС; воздушные

зазоры 4, 5, 6, 7. Схемы соединения тепловых сопротивлений частей элементарной ячейки в направлении осей x , y , z соответственно показаны на рис. 6.10. Результирующие значения тепловых сопротивлений (проводимостей) элементарной ячейки:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yx} &= \sigma_{1x} + \sigma_{7x} + 1/(R_{2,3x} + R_{5x}) + 1/(R_{4x} + R_{6x}); \\ \sigma_{ny} &= \sigma_{1y} + \sigma_{7y} + 1/(R_{2,3y} + R_{4y}) + 1/(R_{5y} + R_{6y}); \\ R_{nz} &= R_{1z} + R_{7z} + 1/[1/(R_{2z} + R_{3z}) + \sigma_{4z} + \sigma_{5z} + \sigma_{6z}], \end{aligned} \right\} \quad (6.55)$$

где $R_{2,3x(y)} = R_{2x(y)}R_{3x(y)}/(R_{2x(y)} + R_{3x(y)})$.

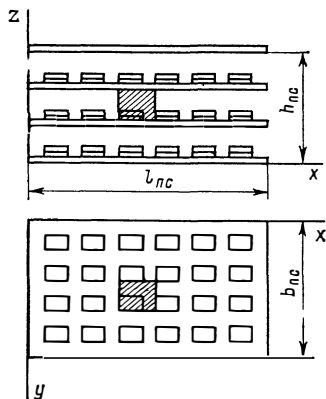


Рис. 6.8. Пакет субблоков

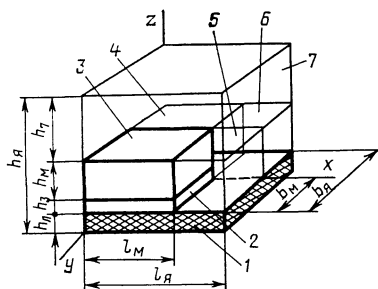


Рис. 6.9. Элементарная ячейка пакета субблоков

На основании (6.8) тепловые сопротивления или проводимости (например, по оси x) элементарной ячейки и ее частей будут:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yx} &= \lambda_{яx} h_я b_я / l_я; \quad \sigma_{1x} = \lambda_{п} h_п b_я / l_я; \\ R_{2x} &= l_M / (\lambda_3 h_3 b_M); \quad R_{3x} = l_M / (\lambda_M h_M b_M); \\ R_{4x} &= l_M / [\lambda_B (h_3 + h_M) (b_я - b_M)]; \quad R_{5x} = (l_я - l_M) / [\lambda_B (h_3 + h_M) b_M]; \\ R_{6x} &= (l_я - l_M) / [\lambda_B (h_3 + h_M) (b_я - b_M)]; \quad \sigma_{7x} = \lambda_B h_7 b_я / l_я. \end{aligned} \right\} \quad (6.56)$$

Здесь $\lambda_{яx}$ — эффективный коэффициент теплопроводности элементарной ячейки по оси x ; $\lambda_{п}$, λ_3 , λ_M и λ_B — коэффициенты теплопроводности материала печатной платы, материала, заполняющего зазор между платой и корпусом ИС, корпуса ИС и воздуха (геометрические размеры элементарной ячейки и ее частей ясны из рис. 6.9) Так как эффективные коэффициенты теплопроводности пакета субблоков по осям x ,

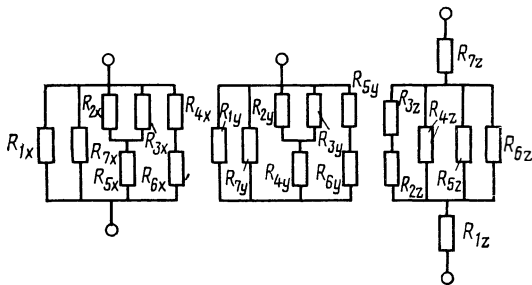


Рис. 6.10. Схемы соединения тепловых сопротивлений частей элементарной ячейки

теплопроводности пакета субблоков по осям x ,

y, z равны соответствующим коэффициентам элементарной ячейки, то с учетом геометрических размеров пакета субблоков (рис. 6.8) тепловые сопротивления

$$R_{yx} = R_{yx} n_x / (n_y n_z); \quad R_{zy} = R_{zy} n_y / (n_x n_z); \quad R_{xz} = R_{xz} n_z / (n_x n_y), \quad (6.57)$$

где $n_x = l_{п.с} / l_{я}$; $n_y = b_{п.с} / b_{я}$; $n_z = h_{п.с} / h_{я}$ — число элементарных ячеек в пакете субблоков в направлении осей x, y, z .

При исследовании тепловых режимов некоторых конструкций возникает задача определения теплового сопротивления от интегральной схемы к корпусу блока (панели). Схематичное изображение субблока с теплопроводящими шинами, который вставляется по направляющим в блок, дано на рис. 6.11, а. Определим тепловое сопротивление при передаче тепловой энергии от корпуса ИС к блоку по твердым частям конструкции субблока (конвекцию и излучение учитывать не будем). Выделим элементы конструкции, тепловые сопротивления которых участвуют в передаче энергии, и составим тепловую схему. Зазор между корпусом ИС и теплопроводящей шиной заполнен теплопроводящим материалом (тепловое сопротивление R_3). Далее тепловая энергия передается по теплопроводящей шине (тепловые сопротивления $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$). Кондукцией по печатной плате будем пренебрегать. От теплопроводящей шины тепловая энергия передается через тепловые сопротивления $R_{к1}$ контакта шина — каркас субблока, $R_{ст}$ стенки каркаса субблока и $R_{к2}$ контакта каркаса субблока — корпус блока. Схема соединения тепловых сопротивлений изображена на рис. 6.11, б.

Обозначим $R = R_{к1} + R_{ст} + R_{к2}$, тогда тепловая схема будет иметь вид, представленный на рис. 6.11, в. Результирующее тепловое сопротивление

$$R_2 = R_3 + (R_{ш1} + R)(R_{ш2} + R) / (R_{ш1} + R_{ш2} + 2R). \quad (6.58)$$

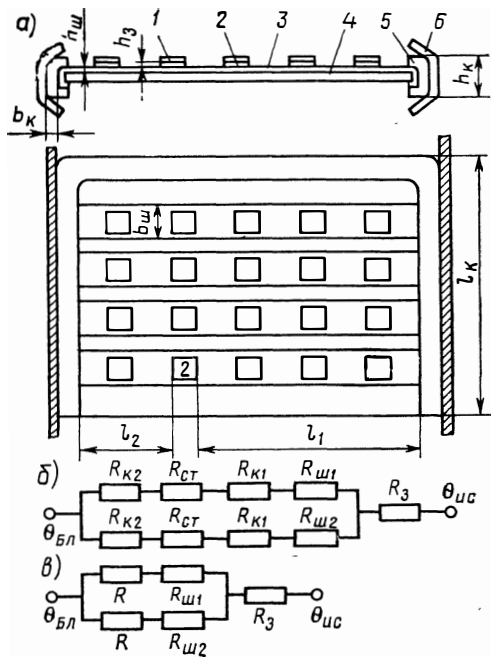


Рис. 6.11. Схематичное изображение субблока с теплопроводящими шинами (а) и схемы соединений тепловых сопротивлений его элементов (б, в):

1 — корпус ИС; 2 — зазор между ИС и шиной; 3 — теплопроводящая шина; 4 — плата субблока; 5 — каркас субблока; 6 — направляющая блока

Тепловые сопротивления R_3 , $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ и $R_{ст}$ определяются по (6.8), а $R_{к1}$ и $R_{к2}$ — по (6.11):

$$R_3 = h_3 / (\lambda_3 S_K); \quad R_{ш1} = l_1 / (\lambda_{ш} S_{ш}); \quad R_{ш2} = l_2 / (\lambda_{ш} S_{ш}); \\ R_{ст} = b_K / (\lambda_{ст} S_{ст}); \quad R_{к1} = 1 / (\alpha_{к1} S_{к1}); \quad R_{к2} = 1 / (\alpha_{к2} S_{к2}),$$

где λ_3 , $\lambda_{ш}$ и $\lambda_{ст}$ — коэффициенты теплопроводности материала, заполняющего зазор, теплопроводящей шины и каркаса субблока; S_K — площадь зазора между корпусом ИС и шиной; $S_{ш}$ — площадь поперечного сечения теплопроводящей шины; $S_{ст}$ — площадь сечения каркаса субблока в направлении, ортогональном к тепловому потоку; $S_{к1}$, $S_{к2}$ — половина площади контактов шина — каркас субблока, каркас субблока — корпус блока.

Пример 6.1. Рассчитать тепловое сопротивление от корпуса ИС 2 на рис. 6.11, а к корпусу блока для следующих исходных данных: площадь основания корпуса ИС $S_K = 18,5 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; толщина зазора между корпусом ИС и шиной $h_3 = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор, $\lambda_3 = 1,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; ширина и толщина теплопроводящей шины соответственно $b_{ш} = 0,02 \text{ м}$; $h_{ш} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Расстояния от ИС 2 до каркаса субблока $l_1 = 0,1 \text{ м}$ и $l_2 = 0,05 \text{ м}$; материал шины — медь, коэффициент теплопроводности (табл. 6.1) $\lambda_{ш} = 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; из табл. 6.2 удельная тепловая проводимость контакта шина—каркас субблока (медь—сталь) $\alpha_{т1} = \alpha_{к1} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; толщина, высота и длина стенки каркаса субблока соответственно $h_K = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_K = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l_K = 0,2 \text{ м}$; материал каркаса субблока — сталь, коэффициент теплопроводности (см. табл. 6.1) $\lambda_{ст} = 45,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; из табл. 6.2 удельная тепловая проводимость контакта каркас субблока — корпус блока (сталь—сталь)

$$\alpha_{т2} = \alpha_{к2} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

Решение. 1. По (6.8) тепловое сопротивление зазора

$$R_3 = h_3 / (\lambda_3 S_K) = 0,4 \cdot 10^{-3} / (1 \cdot 18,5 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6}) = 3,5 \text{ К/Вт}.$$

2. Найдем площадь поперечного сечения теплопроводящей шины и по (6.8) определяем тепловые сопротивления:

$$S_{ш} = b_{ш} h_{ш} = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 10^{-5} \text{ м}^2;$$

$$R_{ш1} = l_1 / (\lambda_{ш} S_{ш}) = 0,1 / (400 \cdot 10^{-5}) = 25 \text{ К/Вт};$$

$$R_{ш2} = l_2 / (\lambda_{ш} S_{ш}) = 0,05 / (400 \cdot 10^{-5}) = 12,5 \text{ К/Вт}.$$

3. Рассчитаем половину площади контакта теплопроводящей шины с каркасом субблока и по (6.11) определим тепловое сопротивление контакта шина—каркас субблока $R_{к1}$

$$S_{к1} = b_{ш} h_K = 0,02 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

$$R_{к1} = 1 / (\alpha_{к1} S_{к1}) = 1 / (1,2 \cdot 10^4 \cdot 12 \cdot 10^{-5}) = 0,7 \text{ К/Вт}.$$

4. Находим по (6.8) тепловое сопротивление стенки каркаса субблока:

$$R_{ст} = b_K / (\lambda_{ст} h_K l_K) = 1,5 \cdot 10^{-3} / (45,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2) = 0,0275 \text{ К/Вт}.$$

5. Считая половину площади контакта каркаса субблока с корпусом блока равной $S_{к2} = h_K l_K$, подсчитываем по (6.11) тепловое сопротивление контакта:

$$R_{к2} = 1 / (\alpha_{к2} S_{к2}) = 1 / (1,5 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2) = 0,555 \text{ К/Вт}.$$

6. Находим $R = R_{к1} + R_{ст} + R_{к2} = 0,7 + 0,0275 + 0,555 = 1,28 \text{ К/Вт}$.

7. По (6.58) определяем тепловое сопротивление ИС — корпус блока: $R_{\Sigma} = 12,6 \text{ К/Вт}$.

Ответ. Тепловое сопротивление от корпуса ИС 2 к корпусу блока $R_{\Sigma} = 12,6 \text{ К/Вт}$.

§ 6.5. МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ЭВМ

Понятие тепловой модели было введено Г. Н. Дудльневым. Им же сформулировано основное требование, предъявляемое к тепловой модели: тепловая модель должна быть адекватна изучаемому явлению и реализуема математически.

Конструкция ЭВМ является системой многих тел с неравномерно распределенными источниками и стоками тепловой энергии. Ее температурное поле может иметь достаточно сложный характер, завися-

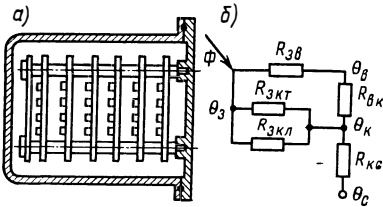


Рис. 6.12. Конструкция одноблочной ЭВМ в герметичном исполнении (а) и ее тепловая схема (б)

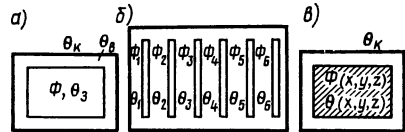


Рис. 6.13. Модели одноблочной ЭВМ

щий от распределения источников и стоков тепловой энергии, геометрии элементов конструкции и их теплофизических свойств. При построении тепловой модели упрощают элементы конструкции и идеализируют протекающие в них тепловые процессы.

Один из способов упрощения — замена сложной по форме нагретой зоны элемента конструкции (например, субблока с разногабаритными комплектами элементов) прямоугольным параллелепипедом — эквивалентной нагретой зоной с одинаковой среднеповерхностной температурой и равномерно распределенным источником тепловой энергии. Такая замена выполняется на основании принципа усреднения. Эффективная толщина нагретой зоны (см. рис. 6.5)

$$\delta_{эф} = \delta + V_{дет}/(L_y L_z). \quad (6.59)$$

В ряде случаев форму эквивалентной нагретой зоны определяют на основании рассмотренного в § 6.3 принципа местного влияния.

Идеализация тепловых процессов заключается главным образом в том, что учитываются только основные, вносящие наибольший вклад в теплообмен способы переноса тепловой энергии. Упрощение элементов конструкции и идеализация тепловых процессов должны быть таковы, чтобы обеспечивалась адекватность модели.

Точность исследования температурного режима определяется в основном степенью детализации конструкции. Например, при исследовании одноблочной ЭВМ (рис. 6.12, а) в качестве нагретой зоны можно принять весь пакет субблоков. Тепловая модель в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 6.13, а. В результате исследования этой

модели можно определить среднеповерхностную температуру нагретой зоны. Если эта температура значительно отличается от температуры субблока, расположенного в центре пакета, т. е. будет признано, что результаты исследования не обеспечивают требуемой точности, то в качестве нагретой зоны может рассматриваться сам субблок. Тепловая модель примет вид, изображенный на рис. 6.13, б. Тепловые процессы при таком подходе описываются системой неоднородных нелинейных алгебраических уравнений, которые составляются на основании закона сохранения энергии с использованием выражения (6.1). Число уравнений определяется количеством нагретых зон. Для модели, изображенной на рис. 6.13, а, уравнений теплового баланса будет три: для пакета субблоков, воздуха внутри корпуса и корпуса. Составим тепловую схему и уравнения теплового баланса для этой модели в предположении, что существенными будут все три вида переноса тепловой энергии. Тепловая энергия Φ , выделяемая пакетом субблоков, передается конвекцией воздуху, находящемуся внутри корпуса, кондукцией по элементам крепления и монтажа и излучением к корпусу ЭВМ (тепловые сопротивления соответственно $R_{з.в.}$, $R_{з.к.т}$ и $R_{з.к.л}$). От воздуха тепловая энергия конвекцией передается к корпусу $R_{в.к}$ и корпусом рассеивается в окружающую среду за счет всех трех механизмов передачи тепловой энергии.

Схема соединения тепловых сопротивлений показана на рис. 6.12, б. Уравнения теплового баланса для всех узловых точек:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \sigma_{з.в} (\theta_з - \theta_в) + (\sigma_{з.к.т} + \sigma_{з.к.л}) (\theta_з - \theta_к); \\ \sigma_{з.в} (\theta_з - \theta_в) &= \sigma_{в.к} (\theta_в - \theta_к); \quad \Phi = \sigma_{к.с} (\theta_к - \theta_с). \end{aligned} \right\} \quad (6.60)$$

Более точная тепловая модель получается, если конструкция идеализируется в виде однородного анизотропного тела, свойства которого характеризуются эффективными значениями коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. Такая модель для одноблочной конструкции ЭВМ показана на рис. 6.13, в. Тепловые процессы, протекающие в ней, описываются дифференциальным уравнением в частных производных вида

$$\lambda_x \partial^2 \theta / \partial x^2 + \lambda_y \partial^2 \theta / \partial y^2 + \lambda_z \partial^2 \theta / \partial z^2 = F(\Phi_y, C), \quad (6.61)$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — эффективные коэффициенты теплопроводности по осям x, y, z ; Φ_y — удельная мощность внутренних источников теплоты; C — эффективный коэффициент теплоемкости.

Это дифференциальное уравнение должно решаться с учетом нелинейных условий на границе нагретого тела, что является весьма сложной задачей.

Основные теплофизические задачи, возникающие при проектировании ЭВМ. На начальной стадии проектирования конструкции необходимо решить вопрос о выборе способа ее охлаждения. Такой выбор может быть выполнен по результатам расчета температурного режима конструкции при каждом из возможных способов охлаждения. Однако этот подход требует значительных затрат времени конструктора. Способ охлаждения конструкции ЭВМ можно ориентировочно выбрать по

диаграмме, показанной на рис. 6.14. (ОСТ 4Г0.012.032). Область изменения параметров: перегрев конструкции — удельная тепловая энергия, рассеиваемая ею, разделена на зоны, соответствующие каждому способу охлаждения: естественным — воздушному (1) и испарительному (4); принудительным — воздушному (2), жидкостному (3) и испарительному (5). Нижняя часть рис. 6.14 относится к блокам, верхняя — к индивидуальным элементам.

Методика выбора способа охлаждения следующая. Рассчитываем минимальное значение допустимого перегрева (K) нагретой зоны

$$\Delta\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{о.с макс}},$$

где $\theta_{\text{доп}}$ — допустимая температура нагретой зоны, К; $\theta_{\text{о.с макс}}$ — максимальная температура окружающей среды, К.

Расчетная поверхность нагретой зоны (м^2)

$$S_3 = 2 [L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_3 K_3],$$

где L_1, L_2 — горизонтальные размеры корпуса, м; L_3 — высота корпуса, м; K_3 — коэффициент заполнения, равный отношению объема функциональных и монтажных элементов внутри корпуса к его внутреннему объему.

Для блоков при жидкостном и испарительном охлаждении значение S_3 рассчитывают по геометрическим размерам охлаждаемой поверхности, находящейся в контакте с теплоносителем.

Находим величину удельной мощности нагретой зоны ($\text{Вт}/\text{м}^2$):

$$\Phi_y = \Phi / S_3,$$

где Φ — мощность, рассеиваемая блоком или элементом, Вт.

Затем определяем зону, в которой лежит точка с координатами $\Delta\theta_{\text{доп}}$ и Φ_y . Если точка попадает в зону с несколькими возможными способами охлаждения, то для уточнения рассчитываем тепловой режим.

При принудительном охлаждении конструкции основной является задача определения расхода хладагента для обеспечения нормального температурного режима комплектующих элементов.

При заданном расходе хладагента, а также при естественном охлаждении может быть поставлена задача определения коэффициента заполнения и геометрических размеров типовой конструкции или ее элементов или максимально допустимой выделяемой тепловой энергии, при которой обеспечивается нормальный температурный режим.

Обычно при таких расчетах в качестве определяющего используется среднеобъемный или среднеповерхностный перегрев некоторой ти-

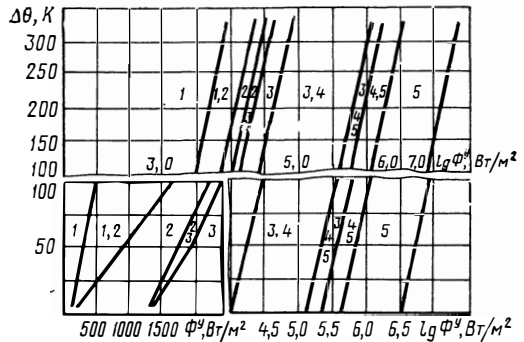


Рис. 6.14. Диаграмма выбора системы охлаждения

повой конструкции. Поэтому нередко необходимо решать задачу поверочного характера — определять перегрев отдельного комплектующего элемента, находящегося в наихудших температурных условиях, и проверять для него выполнение условия нормального теплового режима. К этому же классу относится и задача определения среднего перегрева нагретой зоны при заданном способе охлаждения и ее геометрических размерах.

§ 6.6. АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОДНОБЛОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Одноблочная конструкция с вертикально ориентированными субблоками (см. рис. 6.12, а) довольно часто используется для нестационарных ЭВМ. В связи с этим представляет интерес анализ ее теплового режима. При переходе к тепловой модели в качестве нагретой зоны будем рассматривать субблок, причем

примем следующие ограничения и допущения: нагретые зоны и корпус ЭВМ являются изотермическими поверхностями с температурами θ_i и θ_k ; давление внутри корпуса больше 133 кПа, есть гравитация, эффективная ширина каналов между субблоками больше 2—3 мм, т. е. возможен теплообмен за счет естественной конвекции; платы субблоков имеют одинаковый размер, причем $\delta_{эф}$, $b_{эф} \ll L_x, L_y, L_z$ (рис. 6.15), ширина зазора между крайними платами и корпусом больше $b_{эф}$; скорость движения воздуха постоянна по длине канала, образованного субблоками.

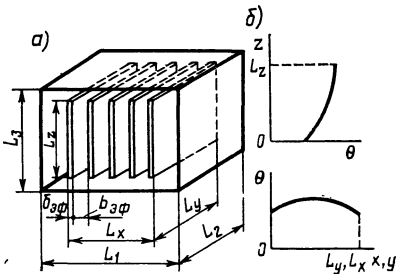


Рис. 6.15. Тепловая модель одноблочной ЭВМ с вертикально-ориентированными субблоками (а) и распределение температурного поля по осям x, y, z (б)

Тепловая модель с необходимыми размерами показана на рис. 6.15, а. При естественном охлаждении такой конструкции температурное поле неравномерно распределено по осям ox, oy, oz . На рис. 6.15, б показан характер кривых зависимости температуры пакета плат от координат x, y, z .

Рассмотрим механизмы передачи тепловой энергии от нагретых зон в окружающую среду. В ЭВМ с субблоками бескаркасной конструкции без теплопроводящих шин можно пренебречь передачей теплоты кондукцией по элементам крепления и монтажа. Тепловая энергия, выделяемая i -й нагретой зоной (субблоком), передается излучением с боковых поверхностей на соседние $(i + 1)$ -ю и $(i - 1)$ -ю нагретые зоны (тепловые сопротивления $R_{i, i+1}$ и $R_{i, i-1}$) и с торцовых поверхностей к корпусу (тепловые сопротивления $R_{i, к}$). От боковых поверхностей 1-й и N -й плат тепловая энергия передается излучением к корпусу (тепловые сопротивления $R_{1, к.б}$ и $R_{N, к.б}$). Тепловая энергия от плат передается воздуху за счет естественной конвекции в каналах между нагретыми зонами, а также между 1-й и N -й платами и боковыми стенка-

ми корпуса (тепловые сопротивления R_{iB}). Передачей тепловой энергии конвекцией от торцовых поверхностей плат будем пренебрегать из-за малой площади поверхности. Тепловая энергия, воспринятая воздухом, конвекцией передается корпусу (тепловое сопротивление $R_{B,K}$), который рассеивает ее в окружающую среду в общем случае за счет кондукции, конвекции и излучения (тепловое сопротивление $R_{K,C}$).

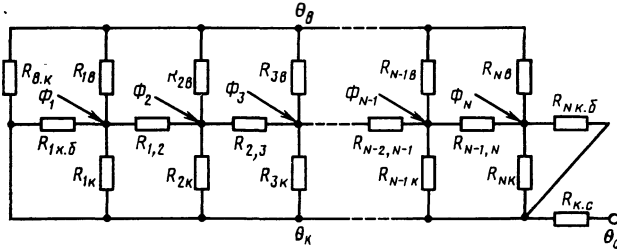


Рис. 6.16. Тепловая схема одноблочной ЭВМ с естественным охлаждением

Тепловая схема, составленная на основании выполненного анализа механизмов передачи тепловой энергии, показана на рис. 6.16. Уравнения теплового баланса будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned}
 \Phi_1 &= (\theta_1 - \theta_K) (\sigma_{1K} + \sigma_{1K,\delta}) + (\theta_1 - \theta_2) \sigma_{1,2} + (\theta_1 - \theta_B) \sigma_{1B}; \\
 \Phi_i &= (\theta_i - \theta_{i-1}) \sigma_{i-1,i} + (\theta_i - \theta_{i+1}) \sigma_{i,i+1} + (\theta_i - \theta_B) \sigma_{iB} + (\theta_i - \\
 &\quad - \theta_K) \sigma_{iK}; \quad i = 2, 3, \dots, N-1; \\
 \Phi_N &= (\theta_N - \theta_K) (\sigma_{NK} + \sigma_{NK,\delta}) + (\theta_{N-1} - \theta_N) \sigma_{N-1,N} + \\
 &\quad + (\theta_N - \theta_B) \sigma_{NB}; \\
 \Phi_{3..B} &= (\theta_B - \theta_K) \cdot \sigma_{B,K}; \quad \Phi = (\theta_K - \theta_C) \sigma_{K,C},
 \end{aligned} \right\} (6.62)$$

где $\Phi_{3..B} = \sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta_B) \sigma_{iB}$ — суммарная тепловая энергия, передаваемая конвекцией зонами воздуху и затем воздухом корпусу; $\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i$ — суммарная тепловая энергия, выделяемая платами.

Тепловые проводимости, входящие в (6.62), зависят от температур плат, воздуха внутри ЭВМ, корпуса и окружающей корпус среды. В связи с этим уравнения теплового баланса — нелинейные. Дальнейшее изложение будем вести в предположении, что решение этих уравнений выполняется методом итераций, исходя из предполагаемых значений неизвестных перегревов. Основные этапы метода следующие: 1. Задаются начальные значения неизвестных перегревов корпуса, воздуха и нагретых зон. 2. Для данных перегревов определяются тепловые проводимости. 3. Решаются уравнения теплового баланса относительно неизвестных перегревов. 4. Текущие значения перегревов сравниваются с предыдущими, т. е. проверяется условие $(\Delta \theta_i^n - \Delta \theta_i^{n-1}) \leq \epsilon$, где ϵ — точность приближения; n — шаг итерации.

Если данное условие выполнимо, то решение получено, в противном случае продолжаем вычисления, начиная с этапа 2.

Тепловые проводимости для теплообмена конвекцией в каналах определяются по (6.14), в которой коэффициент α_{iB} подсчитывают по (6.32). Таким образом,

$$\sigma_{iB} = 4,12 \cdot \lambda_B L_y L_z / b_{\text{эф}}, \quad (6.63)$$

где $b_{\text{эф}}$ находится по (6.31); λ_B — берут из табл. 6.1.

Тепловая проводимость $\sigma_{B,K}$ равна сумме трех составляющих: от двух пар плоских вертикальных стенок площадью соответственно $2L_1L_3$ и $2L_2L_3$ и двух горизонтальных стенок площадью L_1L_2 каждая. Для предполагаемого перегрева $\theta_B - \theta_K$ проверяется условие (6.23). В зависимости от выполнения этого условия находится коэффициент теплообмена $\alpha_{B,K}^j$ по (6.24) или (6.25). Если, например, условие (6.23) выполняется, то коэффициент $\alpha_{B,K}^j$ определяется по закону степени $1/4$ и будет равен: для вертикальных стенок $\alpha_{B,K}^{B,K} = A_2 [(\theta_B - \theta_K) / L_3]^{1/4} \cdot K_H$ и для горизонтальных, отдающих тепловую энергию вверх и вниз, соответственно:

$$\alpha_{B,K}^{B,K} = 1,3 A_2 \left(\frac{\theta_B - \theta_K}{\min(L_1, L_2)} \right)^{1/4} K_H; \quad \alpha_{B,K}^{G,K} = 0,7 A_2 \left(\frac{\theta_B - \theta_K}{\min(L_1, L_2)} \right)^{1/4} K_H.$$

Результирующая тепловая проводимость

$$\sigma_{B,K} = \left[A_2 \left(\frac{\theta_B - \theta_K}{L_3} \right)^{1/4} (2L_1L_3 + 2L_2L_3) + 2A_2 \left(\frac{\theta_B - \theta_K}{\min(L_1, L_2)} \right)^{1/4} L_1L_2 \right] K_H$$

окончательно

$$\sigma_{B,K} = 2A_2 (\theta_B - \theta_K)^{1/4} \left(\frac{L_1L_3 + L_2L_3}{L_3^{1/4}} + \frac{L_1L_2}{\min(L_1, L_2)^{1/4}} \right) K_H. \quad (6.64)$$

Коэффициент теплообмена излучением для тепловых проводимостей $\sigma_{i-1,i}$; $\sigma_{1K,0}$; $\sigma_{N,K,0}$ определяется по (6.48), где $\varphi_{i-1,i} = \varphi_{1K,0} = \varphi_{N,K,0} = 1$, а приведенная степень черноты — по (6.49). Тепловая проводимость, например,

$$\sigma_{i-1,i} = \epsilon_{\text{пр } i-1,i} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\theta_{i-1}^4 - \theta_i^4}{\theta_{i-1} - \theta_i} S_{i-1}, \quad (6.65)$$

где $S_{i-1} = L_y L_z$; в качестве θ_{i-1} и θ_i берутся предполагаемые температуры ($i-1$)-й и i -й нагретых зон.

Аналогично находятся тепловые проводимости σ_{iK} . В первом приближении при $\varphi = 1$ можно считать площадь излучающей поверхности $S_T = 2\delta_{\text{эф}} (L_y + L_z)$.

Если корпус ЭВМ установлен на амортизаторах, передачей теплоты от него кондукцией можно пренебречь. Конвективная составляющая тепловой проводимости $\sigma_{K,C}$ определяется аналогично $\sigma_{B,K}$. При справедливости закона степени $1/4$ она будет

$$\sigma_{K,C} = 2A_2 (\theta_K - \theta_C)^{1/4} [(L_1L_3 + L_2L_3) L_3^{1/4} + L_1L_2 \min(L_1, L_2)^{1/4}] K_H. \quad (6.66)$$

Коэффициент теплообмена излучением от корпуса к среде определяется по (6.48) при $\varphi_{к.с} = 1$ и $\varepsilon_{пр.к.с} = \varepsilon_к$. Тогда лучевая составляющая тепловой проводимости корпус—среда

$$\sigma_{к.с}^л = \varepsilon_к \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} [(\theta_к^4 - \theta_с^4)/(\theta_к - \theta_с)] S_к, \quad (6.67)$$

где $\theta_к$ — предполагаемая температура корпуса; $S_к = 2(L_1L_2 + L_1 \times L_3 + L_2L_3)$ — площадь поверхности корпуса.

Пример 6.2. Рассчитать среднюю температуру корпуса и пакета плат одноблочной ЭВМ (см. рис. 6.12, а) в герметичном исполнении при естественном охлаждении. Корпус выполнен из алюминиевого сплава и покрашен эмалевой краской. Давление внутри корпуса нормальное; тепловая энергия, выделяемая пакетом плат (нагретой зоной), $\Phi = 40$ Вт; температура окружающей среды $\theta_с = 293$ К; геометрические размеры корпуса: $L_1 = 0,2$ м, $L_2 = 0,22$ м; $L_3 = 0,27$ м; геометрические размеры нагретой зоны субблока: $L_x = 0,12$ м; $L_y = 0,15$ м; $L_z = 0,2$ м; $b_{зф} = 15 \cdot 10^{-3}$ м; зазор $\delta_{зф} = 5 \cdot 10^{-3}$ м; число субблоков $N = 7$; точность приближения перегревов $\varepsilon = 1$ К.

Тепловая модель для этого примера показана на рис. 6.13, а, а тепловая схема изображена на рис. 6.17, а (в данном случае пренебрегаем передачей тепловой энергии кондукцией). Для нахождения температур $\theta_з$ и $\theta_к$ тепловую схему удобно преобразовать, как показано на рис. 6.17, б, в, а уравнения теплового баланса записать в следующем виде:

$$\Phi = (\theta_к - \theta_с) \sigma_{к.с}; \quad \Phi = (\theta_з - \theta_к) \sigma_{з.к}^{\Sigma},$$

где

$$\sigma_{з.к} = \sigma_{з.б} \parallel \sigma_{в.к} = \sigma_{з.в} \sigma_{в.к} / (\sigma_{з.в} + \sigma_{в.к}); \quad \sigma_{з.к}^{\Sigma} = \sigma_{з.к} + \sigma_{з.к}^л.$$

Эти уравнения будем решать последовательно, начиная с первого, методом итераций.

Решение. Первый этап расчета заключается в определении среднетемпературной температуры корпуса.

Первый шаг итерации. 1. Задаемся перегревом корпуса относительно окружающей среды $\Delta\theta_{к.с0} = 10$ К.

2. Определяем конвективную составляющую тепловой проводимости $\sigma_{к.с}$. Проверяем условие (6.23):

$$\Delta\theta_{к.с0} \leq (840/L_3)^3; \quad \Delta\theta_{к.с0} \leq (840/270)^3; \quad 10 < 3,11^3.$$

Так как неравенство соблюдается, теплообмен конвекцией подчиняется закону степени 1/4. По табл. 6.4 для $\theta_m = 0,5(293 + 303) = 298$ К находим $A_2 = 1,37$ и по (6.66) определяем

$$\sigma_{к.с}^к = 2 \cdot 1,37 \cdot 10^{1/4} \frac{0,2 \cdot 0,27 + 0,22 \cdot 0,27}{0,27^{1/4}} + 0,2 \cdot 0,22/0,2^{1/4} = 1,086 \text{ Вт/К}.$$

3. Из табл. 6.5 $\varepsilon_к = 0,92$, тогда по (6.67) определяем лучевую составляющую тепловой проводимости

$$\sigma_{к.с}^л = 0,92 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{303^4 - 293^4}{10} 2(0,2 \cdot 0,22 + 0,2 \cdot 0,27 + 0,22 \cdot 0,27) = 1,7 \text{ Вт/К}.$$

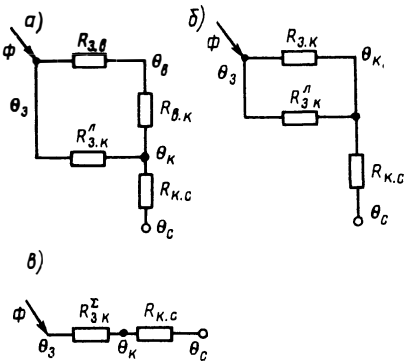


Рис. 6.17. Упрощенная тепловая схема одноблочной ЭВМ и ее преобразование

4. Определяем суммарную тепловую проводимость корпус—среда

$$\sigma_{\text{к.с}} = \sigma_{\text{к.с}}^{\text{к}} + \sigma_{\text{к.с}}^{\text{л}} = 2,786 \text{ Вт/К.}$$

5. В первом приближении перегрев корпуса относительно окружающей среды

$$\Delta\theta_{\text{к.с}} = \theta_{\text{к1}} - \theta_{\text{с}} = \Phi / \sigma_{\text{к.с}} = 40 / 2,786 \approx 14,35 \text{ К.}$$

6. Проверяем условие $|\Delta\theta_{\text{к.с0}} - \Delta\theta_{\text{к.с1}}| \leq \varepsilon$:

$$|10 - 14,35| = 4,35 \text{ К} > \varepsilon = 1 \text{ К.}$$

Необходимо выполнить еще один шаг итерации.

Второй шаг итерации. 1. $\Delta\theta_{\text{к.с1}} = 14,35 \text{ К}$. 2. $\Delta\theta_{\text{к.с1}} < 3,11^3$; $\theta_m = 300 \text{ К}$; $A_2 = 1,366$; $\sigma_{\text{к.с}}^{\text{к}} = 1,17 \text{ Вт/К}$. 3. $\sigma_{\text{к.с}}^{\text{л}} = 1,70 \text{ Вт/К}$. 4. $\sigma_{\text{к.с}} = 2,87 \text{ Вт/К}$. 5. $\Delta\theta_{\text{к.с2}} = 40 / 2,87 = 14 \text{ К}$. 6. $\Delta\theta_{\text{к.с1}} - \Delta\theta_{\text{к.с2}} = 0,35 \text{ К} < \varepsilon = 1 \text{ К}$.

Таким образом, во втором приближении перегрев корпуса относительно окружающей среды определен равным 14 К.

На втором этапе расчета будем находить перегрев зоны относительно корпуса, исходя из уравнения $\Phi = (\theta_{\text{з}} - \theta_{\text{к}}) \cdot \sigma_{\text{з.к}}^{\Sigma}$.

Для данной модели

$$\sigma_{\text{з.в}} = \sum_{i=1}^{N+1} \sigma_{i\text{в}} = (N+1) \frac{4,12\lambda_{\text{в}}}{b_{\text{эф}}} L_y L_z;$$

$$\sigma_{\text{з.к}}^{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр 1,2}} \varphi_{\text{з.к}} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (\theta_{\text{з}}^4 - \theta_{\text{к}}^4) S_{\Sigma} / (\theta_{\text{з}} - \theta_{\text{к}}),$$

где $S_{\Sigma} = 2L_y L_z + 2\delta_{\text{эф}} (L_y + L_z)$ — площадь излучающей поверхности нагретой зоны.

Тепловую проводимость $\sigma_{\text{в.к}}$ будем находить по (6.64). При подсчете тепловых проводимостей $\sigma_{\text{з.в}}$ и $\sigma_{\text{в.к}}$ необходимо задавать перегревы $\Delta\theta_{\text{з.в}}$ и $\Delta\theta_{\text{в.к}}$. При расчете по методу итераций на этом этапе будем задавать $\Delta\theta_{\text{з.к}}$. Перегревы зона—воздух и воздух—корпус в общем виде определяются как $\Delta\theta_{\text{з.в}} = a_1 \Delta\theta_{\text{з.к}}$ и $\Delta\theta_{\text{в.к}} = a_2 \Delta\theta_{\text{з.к}}$, где $a_1 + a_2 = 1$.

Значения коэффициентов a_1 и a_2 можно установить экспериментально при измерении температурных режимов аналогичной аппаратуры. Ориентировочно примем $\Delta\theta_{\text{в.к}} = 0,2 \Delta\theta_{\text{з.к}}$ и $\Delta\theta_{\text{з.в}} = 0,8 \Delta\theta_{\text{з.к}}$.

Первый шаг итерации. 1. Задаемся перегревом зоны относительно корпуса

$$\Delta\theta_{\text{з.к0}} = \theta_{\text{з}} - \theta_{\text{к}} = 30 \text{ К.}$$

2. Определяем тепловую проводимость $\sigma_{\text{з.к}}^{\text{л}}$.

Из табл. 6.5 находим степень черноты пакета плат $\varepsilon_1 = 0,93$ и корпуса $\varepsilon_2 = 0,92$. По (6.49) рассчитываем приведенную степень черноты $\varepsilon_{\text{пр 1,2}} = 0,87$ ($\varphi_{\text{з.к}} = 1$).

Определяем

$$\sigma_{\text{з.к}}^{\text{л}} = 0,87 \cdot 5,67 [(3,37^4 - 3,07^4) / 30] 0,063 = 0,415 \text{ Вт/К.}$$

3. Для $\theta_{\text{в}} = 313 \text{ К}$ по табл. 6.3 находим $\lambda_{\text{в}} = 0,0276 \text{ Вт/(м·К)}$ и рассчитываем

$$\sigma_{\text{з.в}} = 8 \cdot 4,12 / (15 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 0,0276 = 1,82 \text{ Вт/К.}$$

4. Проверяем условие (6.23):

$$\Delta\theta_{\text{в.к}} \leq (840 / L_z)^3, \Delta\theta_{\text{в.к}} \leq (840 / 200)^3; \quad 6 < 4,2^3.$$

Для $\theta_m = 0,5 (\theta_{\text{в}} + \theta_{\text{к}}) = 310 \text{ К}$ по табл. 6.4 находим $A_2 = 1,346$ и рассчитываем

$$\sigma_{\text{в.к}} = 2 \cdot 1,346 \cdot 6^{1/4} \cdot 0,223 = 0,936 \text{ Вт/К.}$$

5. Определяем

$$\sigma_{3,K} = 1,82 \cdot 0,936 / (1,82 + 0,936) \approx 0,6 \text{ Вт/К.}$$

6. Находим

$$\sigma_{3,K}^{\Sigma} = 0,6 + 0,415 = 1,015 \text{ Вт/К.}$$

7. В первом приближении определяем

$$\Delta\theta_{3,K1} = \Phi / \sigma_{3,K}^{\Sigma} = 40 / 1,015 \approx 39,4 \text{ К.}$$

8. Проверяем условие $|\Delta\theta_{3,K0} - \Delta\theta_{3,K1}| < \varepsilon$:

$$|30 - 39,4| = 9,4 \text{ К} > \varepsilon = 1 \text{ К.}$$

Второй шаг итерации. 1. $\Delta\theta_{3,K1} = 39,4 \text{ К.}$

2. $\sigma_{3,K}^{\text{л}} = 0,43 \text{ Вт/К.}$

3. $\sigma_{3,B} = 1,824 \text{ Вт/К.}$

4. Проверяем условие $\Delta\theta_{B,K} \leq 4,2^{\circ}$; $7,9 < 4,2^{\circ}$.

$$\theta_m = 311 \text{ К; } A_2 = 1,34; \sigma_{B,K} = 1 \text{ Вт/К.}$$

5. $\sigma_{3,K} = 0,64 \text{ Вт/К.}$

6. $\sigma_{3,K}^{\Sigma} = 1,07 \text{ Вт/К.}$

7. $\Delta\theta_{3,K2} = 40 / 1,07 \approx 37 \text{ К.}$

8. Проверяем $|\Delta\theta_{3,K1} - \Delta\theta_{3,K2}| < \varepsilon$:

$$|39,4 - 37| = 2,4 \text{ К} > \varepsilon = 1 \text{ К.}$$

Третий шаг итерации. 1. $\Delta\theta_{3,K2} = 37 \text{ К.}$

2. $\sigma_{3,K}^{\text{л}} = 0,48 \text{ Вт/К.}$

3. $\sigma_{3,B} = 1,82 \text{ Вт/К.}$

4. Проверяем условие $\Delta\theta_{B,K} \leq 4,2^{\circ}$; $7,4 < 4,2^{\circ}$.

$$\theta_m = 310,7 \text{ К; } A_2 = 1,34; \sigma_{B,K} = 0,97 \text{ Вт/К.}$$

5. $\sigma_{3,K} = 0,62 \text{ Вт/К.}$

6. $\sigma_{3,K}^{\Sigma} = 1,1 \text{ Вт/К.}$

7. $\Delta\theta_{3,K3} = 40 / 1,1 \approx 36,3 \text{ К.}$

8. Проверяем условие $|\Delta\theta_{3,K2} - \Delta\theta_{3,K3}| \leq \varepsilon$.

$$|37 - 36,3| < \varepsilon.$$

Ответ. В третьем приближении перегрев зоны относительно корпуса равен 36,3 К. Среднеповерхностная температура корпуса $\theta_K = 307,0 \text{ К}$, а нагретой зоны $\theta_3 = 343,3 \text{ К}$.

§ 6.7. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МНОГОБЛОЧНОЙ СТОЙКИ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Схематичное изображение конструкции многоблочной стойки с вертикально ориентированными субблоками с принудительной вентиляцией дано на рис. 6.18. Каркас рамы и блока сварной (сборный) из профилированной стали. Субблоки являются типовыми элементами замены и вставляются в блок по металлическим или пластмассовым направляющим. Субблоки бескаркасной конструкции без теплоотводящих шин. Несущий элемент субблока—плата из стеклотекстолита. Интегральные схемы установлены на субблоках с двух сторон. Таким образом, однорамная типовая стойка относится к классу аппаратов

кассетной конструкции в многоблочном исполнении. Стационарная ЭВМ работает в нормальных условиях эксплуатации. Охлаждающий воздух через коллектор 3 поступает в зазоры между платами субблоков. Для предотвращения утечки воздуха в области стойки, не занятые оборудованием, служат крышки 1 и перегородки 2.

Для получения тепловой модели проведем анализ и схематизацию процессов теплообмена. Тепловая энергия, выделяемая ИС, передается принудительной конвекцией протекающему воздуху, кондукцией и излучением плате субблока и излучением другим интегральным схемам, имеющим более низкую температуру. Тепловая энергия, воспринятая платами субблоков, может кондукцией передаваться каркасу блока (панели) и далее корпусу стойки по элементам крепления и монтажа, а также воздуху за счет вынужденной конвекции.

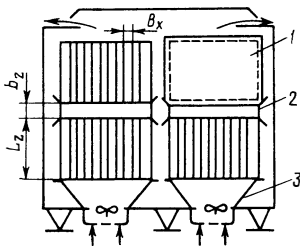


Рис. 6.18. Конструкция стойки с принудительной вентиляцией

Первый путь передачи тепловой энергии состоит из последовательно включенных тепловых сопротивлений прослойки между корпусом ИС и стеклотекстолитовой платой субблока, самой платы, контакта края платы с направляющими блока, металлических элементов каркаса блока, рамы и стойки с большим числом механических контактов. Тепловое сопротивление платы субблока велико ($\lambda = 0,37 \text{ Вт}^{\circ}\text{C}/(\text{м}\cdot\text{К})$), толщина $\delta = 1,5 \dots 2 \text{ мм}$, $\delta \ll L_y$ и L_z , где L_y и L_z — длина и высота платы), значительно также тепловое сопротивление контакта край платы с направляющими блока. В связи с этим частью тепловой энергии, отводимой по данному пути, можно пренебречь. Будем считать, что тепловая энергия, воспринимаемая платами субблоков, полностью передается воздуху принудительной конвекцией.

Область между двумя субблоками представляет собой симметрично обогреваемый вертикальный канал, в котором происходит теплообмен вынужденной конвекцией, а вся стойка — совокупность идентичных последовательно и параллельно соединенных каналов. Примем, что тепловая энергия, выделяемая в каждом канале, одинакова. Так как каналы в типовой стойке имеют равные геометрические размеры, то можно рассматривать процессы теплообмена в одном канале, высота которого равна высоте рамы.

Рассмотрим задачу определения требуемого расхода охлаждающего воздуха для обеспечения нормального теплового режима корпуса интегральной схемы при принудительной конвекции. Режим движения воздуха при вынужденной конвекции — турбулентный. Как отмечалось в § 6.6, температурное поле в пакете плат неравномерно как по высоте платы, так и в направлении осей x и y (рис. 6.14). Однако при принудительном охлаждении неравномерность по осям x и y незначительна.

Будем считать, что температура окружающего корпус интегральной схемы воздуха равна его температуре на выходе из центрального

канала. Тогда между корпусом ИС и окружающим его воздухом максимально допустимый перегрев

$$\Delta\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{ИС}} - \theta_{\text{в}}.$$

Из (6.12) определим требуемое значение коэффициента теплообмена на конвекцией (Вт/(м²·К)):

$$\alpha_{i\text{в}} = \Phi_i / (\Delta\theta_{\text{доп}} S), \quad (6.68)$$

где Φ_i — количество тепловой энергии, выделяемой в одном канале; S — суммарная площадь теплоотдающих поверхностей корпусов интегральных схем и плат субблоков, образующих канал.

По (6.31) рассчитаем эффективную ширину канала $b_{\text{эф}}$ и из (6.18) — среднее значение критерия Нуссельта:

$$\overline{Nu}_T = \alpha_{i\text{в}} 2b_{\text{эф}} / \lambda_{\text{в}}. \quad (6.69)$$

Так как режим движения воздуха турбулентный, то в зависимости от выполнения условия $L_K \leq 40b_{\text{эф}}$, на основании (6.35) или (6.36) подсчитывается критерий

$$Nu_{\infty} = \overline{Nu}_T L_K^{0,167} / [1,165 (40b_{\text{эф}})^{0,167}], \text{ если } L_K \leq 40b_{\text{эф}}, \quad (6.70)$$

или

$$Nu_{\infty} = \overline{Nu}_T (1 + 6,6b_{\text{эф}} / L_K), \text{ если } L_K > 40b_{\text{эф}}. \quad (6.71)$$

Из (6.37) определяем значения критерия Рейнольдса

$$Re = (Nu_{\infty} 0,019)^{1,25}. \quad (6.72)$$

По (6.21) находим требуемую скорость движения воздуха в канале (м/с):

$$v = Re v_{\text{в}} (2b_{\text{эф}}). \quad (6.73)$$

Расход потребного воздуха в одном канале (м³/с)

$$Q_i = 1,5vF \cdot 3600, \quad (6.74)$$

где F — живое сечение канала.

На однорамную стойку суммарный требуемый расход воздуха (м³/с)

$$Q_{\Sigma} = N_K Q_i, \quad (6.75)$$

где N_K — число каналов, т. е. промежутков между субблоками в стойке.

Пример 6.3. Определить необходимый расход воздуха в стойке с принудительной вентиляцией, обеспечивающий допустимую температуру корпуса интегральной схемы. Платы ТЭЗ ориентированы вертикально. Схематичное изображение стойки дано на рис. 6.18. Излучением и кондуктивной передачей тепловой энергии по элементам крепления и монтажа от корпуса ИС к плате ТЭЗ пренебрегаем. Температура воздуха на выходе из канала $\theta_{\text{вых}} = 298$ К; допустимая температура корпуса ИС $\theta_{\text{ИС}} = 348$ К; тепловая энергия, выделяемая одной ИС, $\Phi_{\text{ИС}} = 100$ МВт; число ИС на ТЭЗ $N_{\text{ИС}} = 100$ шт; размеры корпуса ИС по осям z, y, x (l, b, h) $18,5 \times 6,2 \times 4$ мм; размеры ТЭЗ $L_z = 150$ мм, $L_y = 200$ мм;

количество ТЭЭ в панели $N_T = 20$ шт.; зазор между ТЭЭ $b_x = 15$ мм; в направлении осей x, y, z число рядов панелей $N_1 = 2, N_2 = 1, N_3 = 2$; зазор между панелями $b_z = 40$ мм; количество рядов ТЭЭ в панели $N_p = 1$; давление окружающей среды — нормальное.

Р е ш е н и е. 1. Определяем допустимый перегрев между корпусом ИС и окружающим его воздухом:

$$\Delta\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{ИС}} - \theta_{\text{вых}} = 50 \text{ К.}$$

2. Подсчитываем теплоотдающую поверхность одного канала, которую будем считать равной площади поверхности корпусов ИС. Теплоотдающая поверхность одного корпуса ИС

$$S_{\text{ИС}} = 18,5 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 4 \cdot (18,5 + 6,2) \cdot 10^{-6} = 0,0232 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

$$\text{Тогда } S_K = 2N_{\text{ИС}}S_{\text{ИС}} = 2 \cdot 100 \cdot 0,0232 \cdot 10^{-2} = 0,0464 \text{ м}^2$$

3. По (6.68) требуемое значение коэффициента

$$\alpha_{\text{ив}} = 2N_{\text{ИС}} \Phi_{\text{ИС}} / (\Delta\theta_{\text{доп}} S_K) = 2 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-3} / (50 \cdot 0,0464) = 8,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

4. Находим эффективную ширину канала по (6.31):

$$b_{\text{эф}} = b_x - 2N_{\text{ИС}} V_{\text{ИС}} / (L_z L_y).$$

где $V_{\text{ИС}} = 18,5 \cdot 6,2 \cdot 4 \text{ мм}^3$.

Тогда

$$b_{\text{эф}} = 15 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 100 \cdot 18,5 \cdot 6,2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} / (150 \cdot 200) = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

5. По табл. 6.3 для $\theta_B = 298 \text{ К}$ находим коэффициент теплопроводности воздуха $\lambda_B = 2,64 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и определяем по (6.69)

$$\overline{Nu}_T = 8,6 \cdot 12 \cdot 10^{-3} / (2,64 \cdot 10^{-2}) = 7,8.$$

6. Подсчитываем высоту канала $L_K = N_3 L_z + b_z = 2 \cdot 150 \cdot 10^{-3} + 40 \times 10^{-3} = 0,34 \text{ м}$.

7. Так как $L_K < 40b_{\text{эф}}$ ($340 < 480$), по (6.70) определяем

$$Nu_{\infty} = 7,8 \cdot 0,34^{0,167} / (1,165 \cdot 0,48^{0,167}) = 6,31.$$

8. Рассчитываем по (6.72) значение критерия Рейнольдса:

$$Re = (6,31 / 0,019)^{1,25} = 1417.$$

9. При температуре $\theta_B = 298 \text{ К}$ по табл. 6.3 находим коэффициент вязкости воздуха $\nu_B = 15,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и рассчитываем по (6.73) требуемую скорость движения воздуха в канале:

$$v = 1417 \cdot 15,53 \cdot 10^{-6} / (2 \cdot 12 \cdot 10^{-3}) = 0,916 \text{ м}/\text{с}.$$

10. Находим живое сечение канала:

$$F = L_y b_x - 2N'_{\text{ИС}} b_{\text{ИС}} h_{\text{ИС}} = 200 \cdot 15 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 18 \cdot 6,2 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 0,00211 \text{ м}^2,$$

где $N'_{\text{ИС}}$ — число ИС на ТЭЭ в одном горизонтальном ряду.

11. Определяем по (6.74) требуемый расход воздуха в одном канале:

$$Q_i = 1,5 \cdot 0,916 \cdot 0,00211 \cdot 3600 = 10,436 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

12. Рассчитываем число каналов $N_K = N_T - 1$ и суммарный требуемый расход воздуха по (6.75):

$$Q_{\Sigma} = 19 \cdot 10,436 = 198 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Ответ. Требуемый суммарный расход воздуха в стойке $Q_{\Sigma} = 198 \text{ м}^3/\text{ч}$.

§ 6.8. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИ ЖИДКОСТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ МНОГООБЛОЧНОЙ СТОЙКИ

В конструкциях ЭВМ, реализованных с использованием средних и больших интегральных схем при большом коэффициенте заполнения объема, не удастся обеспечить нормальную температуру комплектующих элементов даже принудительным воздушным охлаждением. Вследствие этого в последнее время все чаще стали разрабатываться конструкции ЭВМ с жидкостным охлаждением. Один из вариантов такой конструкции показан на рис. 6.19.

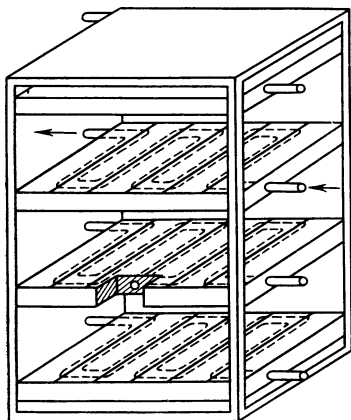


Рис. 6.19. Конструкция стойки с жидкостным охлаждением

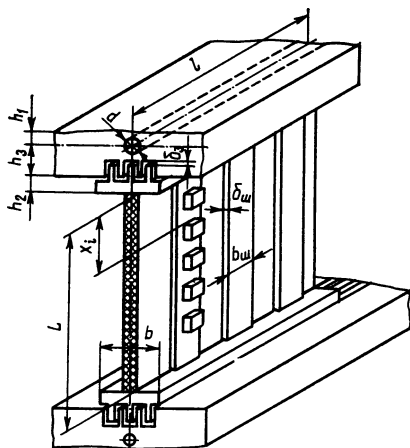


Рис. 6.20. Фрагмент панели с тепловым разъемом

К каркасу стойки крепятся металлические плиты (обычно алюминиевые), в них проходят змеевики, образующие контур жидкостного охлаждения. Хладагентом является дистиллированная вода. Над змеевиками сделаны пазы, которые служат направляющими для типовых элементов замены каркасной конструкции с теплоотводящими шинами. Сочленение каркаса ТЭЗ с «холодной» плитой образует «тепловой разъем». Тепловая энергия, выделяемая интегральными схемами, передается к «холодной» плите кондукцией через «тепловой разъем», поэтому он должен иметь небольшое тепловое сопротивление. «Тепловой разъем» выполняют в виде пластинчатого теплового соединителя (рис. 6.20), теплостокom которого является каркас субблока, а теплоприемником — «холодная» плита. Зазор между пластинами заполняется теплопроводящей смазкой с большим коэффициентом теплопроводности.

Рассмотрим задачу поверочного расчета температуры основания ИС при заданных: объемном расходе жидкости G_V , температуре на входе в «холодную» плиту $\theta_{вх}$, тепловой энергии, выделяемой ИС и

субблоками, и геометрических размерах конструкции. Будем предполагать, что отводом теплоты в окружающую среду конвекцией с воздухом и излучением можно пренебречь, т. е. тепловая энергия, выделяемая ИС, полностью передается кондукцией «холодной» плите и от нее вынужденной конвекцией протекающей в трубе жидкости. Температура воды по длине трубы постоянна. Температура верхней и нижней частей каркаса субблока (тепlostоков) одинакова.

Методика определения теплового сопротивления от ИС к корпусу блока была рассмотрена в § 6.4, поэтому здесь сделаем некоторые упрощения: будем пренебрегать тепловыми сопротивлениями зазора между основанием ИС и теплоотводящей шиной и контакта теплоотводящей шины с каркасом субблока.

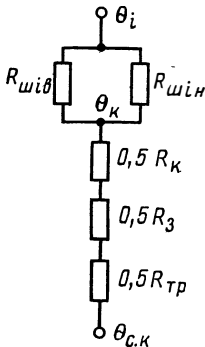


Рис. 6.21. Схема соединения тепловых сопротивлений при передаче тепловой энергии от ИС к стенке трубы

В соответствии с конструктивной реализацией ТЭЗ и блока и с учетом сделанных допущений передача тепловой энергии от ИС к жидкостному хладоносителю будет происходить через верхнюю и нижнюю части тепловой шины и далее через верхний и нижний «тепловые разъемы». Поскольку конструкция симметрична, тепловая схема будет иметь вид, показанный на рис. 6.21, где $R_{тр}$ — тепловое сопротивление стенки труба—основание теплоприемника; R_3 — тепловое сопротивление зазора пластинчатого теплового соединителя (ПТС); $R_{к}$ — тепловое сопротивление стенки каркаса субблока; $R_{ш^{iв}}$ и $R_{ш^{in}}$ — тепловые сопротивления верхней и нижней частей теплоотводящей шины.

Приведем методику определения температуры основания i -й интегральной схемы k -го субблока, исходя из известной температуры воды на входе в плиту блока.

На основании (6.44) температура воды на входе в канал k -го субблока

$$\theta_{вх\ k} = \theta_{вх} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} \Phi_j / (C_P \rho G_V). \quad (6.76)$$

Здесь $\sum_{j=1}^{k-1} \Phi_j$ — тепловая энергия, выделяемая предыдущими ТЭЗ.

На оси канала k -го субблока температура воды

$$\theta_{о.к} = \theta_{вх.к} + 0,5 \Phi_k / (2 C_P \rho G_V), \quad (6.77)$$

где Φ_k — тепловая энергия, выделяемая k -м ТЭЗ.

По (6.43) скорость течения воды в канале (м/с)

$$v = G_V / F,$$

где $F = \pi d^2 / 4$ — площадь поперечного сечения трубы.

По (6.21) значение критерия Рейнольдса

$$Re = vd / \nu_{ж}.$$

По (6.40) или (6.41) в зависимости от значения критерия Рейнольдса подсчитываем критерий Нуссельта, из (6.18) — коэффициент теплообмена конвекцией в трубе [Вт/(м²·К)]:

$$\alpha = \text{Nu} \lambda_{ж}/d.$$

Площадь поверхности трубы (одного колена змеевика) (м²)

$$S = \pi dl.$$

На основании (6.12) температура (К) стенки k -го канала ТЭЗ

$$\theta_{с.к} = \theta_{о.к} + 0,5\Phi_k/(\alpha S). \quad (6.78)$$

Температура каркаса субблока (К)

$$\theta_k = \theta_{с.к} + 0,5\Phi_k R_{\Sigma},$$

где $R_{\Sigma} = 0,5 (R_{\text{ТР}} + R_3 + R_k)$; $R_{\text{ТР}} = (h_1 + 0,5d)/(\lambda_1 bl)$; $R_3 = \delta_3/(\lambda_3 \times F_{\text{ПТС}})$; $F_{\text{ПТС}} = 2mh_3l$; $R_k = h_2/(\lambda_2 bl)$; λ_1 , λ_3 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности материала плиты, теплопроводящей смазки зазора пластинчатого теплового соединителя и каркаса субблока; m — число пластин теплового разъема (ПТС).

Тепловые сопротивления (К/Вт) теплопроводящей шины от i -й интегральной схемы к верхней и нижней частям каркаса субблока соответственно будут:

$$R_{\text{шiв}} = x_i/(\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}}); \quad R_{\text{шiн}} = (L - x_i)/(\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}}),$$

где $\lambda_{\text{ш}}$ — коэффициент теплопроводности шины; $S_{\text{ш}} = b_{\text{ш}}\delta_{\text{ш}}$ — площадь ее поперечного сечения.

Так как эти тепловые сопротивления (К/Вт) включены параллельно, то

$$R_{\text{шi}\Sigma} = R_{\text{шiв}} \parallel R_{\text{шiн}} = x_i (L - x_i)/(\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}} L).$$

Собственный перегрев i -й интегральной схемы (К) относительно температуры каркаса субблока

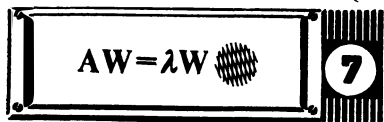
$$\Delta\theta_{iс} = \Phi_i R_{\text{шi}\Sigma} = \Phi_i x_i (L - x_i)/(\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}} L).$$

Используя принцип суперпозиции температурных полей (см. § 6.3), находим наведенный перегрев i -й интегральной схемы (К) от n интегральных схем, расположенных на одной шине с i -й:

$$\Delta\theta_{iн} = \frac{1}{\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}} L} \sum_{j=1}^n \Phi_j x_j (L - x_j). \quad (6.79)$$

Температура (К) основания i -й ИС

$$\theta_i = \theta_k + \frac{1}{\lambda_{\text{ш}} S_{\text{ш}} L} \sum_{j=1}^{n+1} \Phi_j x_j (L - x_j). \quad (6.80)$$



ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭВМ

§ 7.1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭВМ

Рассмотрим вопросы, решаемые конструктором при создании различного вида нестационарных вычислительных машин, которые устанавливаются на подвижных объектах. Внешние условия функционирования аппаратуры ЭВМ характеризуются следующими видами воздействий: климатические (температура, давление, влажность); механические (вибрации, ударные нагрузки, линейные ускорения и др.); различного рода излучения (радиация). Для бортовых вычислительных машин наиболее опасными являются механические воздействия, из-за которых возникает до 50% отказов.

Для обоснования конструкции ЭВМ прежде всего необходимо анализировать статистические данные о свойствах механических воздействий. Результаты анализа служат основой для проведения испытаний комплектующих изделий и типовых конструктивных элементов при случайных воздействиях. При анализе определяются формы и виды механических воздействий. Последние должны в максимальной степени соответствовать реальным условиям работы, а форма представления механических воздействий — наиболее просто реализовываться и описываться математическим аппаратом, позволяющим теоретически оценить те или иные конструктивные решения с точки зрения их надежности.

Анализ конструкции узлов и блоков ЭВМ должен базироваться на принятой расчетной модели конструкции. Оценка влияния конструкции на надежность работы всей ЭВМ — сложная проблема из-за трудности выбора критериев для оценки.

Вероятностные критерии для оценки функциональной надежности дают ориентировочный результат, так как сами коэффициенты, учитывающие конкретные условия работы, получаются слишком приближенно. Оценка конструкции, базирующаяся на статистической обработке результатов массовых испытаний типовых конструктивных элементов, может быть дана только тогда, когда конструкция уже отработана, производство налажено и нежелательно какое-либо вмешательство, ведущее к удорожанию производства.

Детальный анализ влияния конструкции на надежность работы может быть произведен на основе изучения основных технических характеристик узлов и блоков и степени их соответствия техническому заданию. Такие критерии получили названия *характеристических*. Они могут быть *качественными* или *количественными* (в том числе и вероятностными). Например, надежность работы ЭВМ в механическом аспекте можно характеризовать следующими группами: критерии,

обеспечивающие обоснованность задания вибрационных воздействий (под этим понимается правильность выбора вида и параметров виброускорений и свойств вибрационного воздействия); критерии для оценки вибрационных свойств конструкции (определяют правильность конструктивных решений с точки зрения недопустимости отказов из-за виброускорений); критерии для оценки эксплуатационных аспектов надежности (предназначены для того, чтобы не допустить превышение заданной жесткости виброускорений, и требуют соблюдения правил транспортировки и эксплуатации).

Следовательно, оценка и обеспечение надежности должны быть основаны на тщательном анализе данных, характеризующих вибрационное воздействие, изучении поведения комплектующих элементов при этих воздействиях и т. п.

Параметры вибрационного воздействия для нестационарных ЭВМ зависят от многих случайных факторов: количества и режимов работы источников возбуждения, упругих свойств конструкции, скорости движения и т. д. Поэтому само вибрационное воздействие — случайный процесс, который описывается вероятностными характеристиками, определяемыми при статистической обработке некоторого количества реализаций записи колебаний в естественных условиях. В тех случаях, когда вычислительная аппаратура должна функционировать в строго определенных условиях и есть возможность заранее сделать запись этих воздействий, можно отказаться от вероятностной оценки и ограничиться испытаниями в этих условиях. Во всех других случаях вероятностная постановка задачи — единственно возможный метод исследования. Основным недостатком такого метода является отсутствие полной информации о характере воздействий, что приводит к необходимости принимать приближения.

В настоящее время вибрационное воздействие принято считать стационарным случайным процессом с постоянным энергетическим спектром в рабочем диапазоне частот и нормальным законом распределения амплитуд.

Анализ причин возникновения отказов показывает, что они зависят от таких свойств случайного вибрационного воздействия, как значение нагрузки, ее частотные свойства и продолжительность действия. Эти свойства в свою очередь определяются первой функцией распределения вероятностей и спектральной плотностью мощностей. Первая функция распределения вероятностей стационарного эргодического процесса W_g совпадает с математическим ожиданием относительной продолжительности интервалов времени, в течение которых выполняется условие: значение воздействия g меньше или равно заданному g_0 . Оно характеризует интенсивность и продолжительность действия на конструкцию инерционных сил, вызванных вибрацией. Спектральная плотность мощности случайного процесса определяет плотность распределения дисперсий по частотам непрерывного спектра и характеризует интенсивность и частотные свойства вибрационной нагрузки. Теоретическая и экспериментальная оценки воздействия вибраций на конструкцию при таком подходе очень сложны, поэтому необходимо ввести для них ряд упрощений:

1. Представление стационарного случайного воздействия с постоянной спектральной плотностью в виде гармонической вибрации переменной частоты. Приравнивая среднеквадратичное значение реакции системы на случайную и гармоническую вибрации, определяем амплитуду гармонической вибрации. Например, для системы с одной степенью свободы это равенство будет иметь вид

$$3 [(\pi\omega_0 Q/2) S_0]^{1/2} = \sqrt{2} Q\sigma_{\text{гарм}}, \quad (7.1)$$

откуда

$$A_g = \sqrt{2} \sigma_{\text{гарм}} = 3 [(\pi\omega_0 S_0)/(2Q)]^{1/2}, \quad (7.2)$$

где ω_0 — резонансная частота конструкции; Q — добротность конструкции, воспринимающей вибрационное воздействие; S_0 — спектральная плотность дисперсии возмущения; $\sigma_{\text{гарм}}$ — среднеквадратичное значение амплитуды гармонического виброускорения; A_g — амплитуда гармонического колебания.

Для сложной конструкции, имеющей несколько резонансных частот, трудно учесть одновременное воздействие всех форм колебаний, поэтому с целью упрощения расчетов вводят эмпирическое соотношение

$$Q = 5 + 0,025\omega_0. \quad (7.3)$$

Такой вид испытаний на гармоническую вибрацию с переменной частотой широко распространен на практике и называется *испытанием по методу качающейся частоты*.

2. Замена широкополосной случайной вибрации узкополосным случайным возмущением с переменной средней частотой спектра. Этот вариант замены основан на том, что реакция системы на широкополосную вибрацию является узкополосной вибрацией с релейским законом распределения пиков ускорений. Такая замена дает более точный результат, но не учитывает одновременного воздействия всех форм колебаний и потому может быть рекомендована, когда определена полоса частот, в которой возможно разрушение конструкции.

3. Представление стационарной случайной вибрации полигармоническим процессом $g(t) = \sum_{i=1}^n g_i \sin \omega_i t$. Амплитуды гармонических составляющих и их частоты определяют, приравнивая соответственно моменты четного порядка и кривые спектральной плотности мощности случайной и полигармонической вибрации. Частота каждой гармоники должна меняться в диапазоне $\omega_{i-1} \leq \omega_i \leq \omega_{i+1}$. Условия эквивалентности являются довольно строгими.

Испытание комплектующих элементов следует проводить либо на гармоническую вибрацию, либо на узкополосную случайную вибрацию. В первом случае задают уровень виброускорения (или амплитуду колебаний), частоту и время воздействия. Связь между уровнем виброускорений и амплитудой A_g (мм) следующая:

$$A_g = 9810g/(4\pi^2\omega^2), \quad (7.4)$$

где ω — частота колебаний, Гц.

Среднюю частоту спектра берут равной резонансной частоте элемента. Во втором случае задают среднеквадратичное значение воздействия, ширину полосы и среднюю частоту спектра.

Испытание конструкции в целом необходимо проводить на случайное широкополосное воздействие или на полигармоническую вибрацию.

Вибропрочностью типового конструктивного элемента называется свойство элемента в заданных диапазонах частот и ускорений противостоять разрушающему действию вибрации и продолжать выполнять свои функции после воздействия вибрации.

Виброустойчивостью типового конструктивного элемента называется свойство элемента выполнять функции в условиях вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений.

При испытаниях на вибропрочность параметры элемента, могущие претерпеть изменения при воздействии вибраций, определяются до и после воздействия. При испытаниях на виброустойчивость параметры элементов контролируются непрерывно в ходе испытаний (ТУ на испытания должны содержать перечень таких параметров). Характеристика вибропрочности связана с транспортировочной вибрацией, а характеристика виброустойчивости — с эксплуатационной. Обе эти характеристики определяются значением испытательной нагрузки, временем ее действия. Например, для случая гармонической вибрации переменной частоты задают уровень нагрузки — 50 м/с^2 ; диапазон частот — от 5 до 5000 Гц; время действия — 10 ч.

При положительном исходе испытаний можно сказать, что характеристики вибропрочности или виброустойчивости не ниже указанной нагрузки. Естественно, что при этом подразумевается сопоставимость параметров реальной и испытательной вибраций. Однако не всегда в любой конструкции параметры реальной вибронгрузки будут совпадать с параметрами испытательной.

§ 7.2. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ЭВМ

Конструкция любой вычислительной машины является сложной механической системой, так как состоит из механических узлов, обладающих разной степенью жесткости. С точки зрения динамики эта конструкция считается системой линейной и стационарной. В процессе конструирования необходимо оценивать качество разрабатываемых конструктивных узлов и всей конструкции в целом с позиции передачи ею виброускорений. Так как специализированные ЭВМ работают в условиях широкополосной случайной вибрации, то характеристика качества конструкции должна определять, на каких частотах элементы конструкции имеют резонанс, а также в общем случае реакцию системы. Этим требованиям удовлетворяет передаточная функция $H(S)$ или частотная характеристика $H(j\omega)$.

Передаточной функцией $H(S)$ линейной стационарной динамической системы называется отношение преобразования Лапласа $X(S)$ выходной величины $x(t)$ к преобразованию Лапласа $F(S)$ входного

воздействия $f(t)$ при нулевых начальных условиях или

$$H(S) = X(S)/F(S), \quad (7.5)$$

$$\text{где } X(S) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-St} dt; \quad F(S) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-St} dt.$$

Так как виброускорение на данной частоте пропорционально амплитуде смещения, то частотную характеристику можно рассматривать как отношение реакции к возбуждающему виброускорению в функции от частоты. Если известна частотная характеристика, то реакция системы на виброускорение, приложенное к ее входу, для гармонического вибрационного воздействия

$$g_p = g_{вх} \eta(\omega) \cos(\omega t - \varphi + \varepsilon);$$

для полигармонической вибрации

$$g_p = \eta(\omega) \sum_{i=1}^n g_{вх i} \cos(\omega_i t - \varphi_i + \varepsilon_i);$$

для случайной вибрации

$$S_{g_p} = \eta^2(\omega) S_{g_{вх}}; \\ \sigma_p^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{g_{вх}} \eta^2(\omega) d\omega. \quad (7.6)$$

Здесь $\eta(\omega)$ — модуль частотной характеристики; φ — начальная фаза; S_{g_p} и σ_p — спектральная плотность мощности и дисперсия для стационарной случайной вибрации.

Частотная характеристика конструкции получается при исследовании расчетной модели конструкции, поведение которой при вибрациях можно описать аналитически. Расчетную модель конструкции можно получить выделением и идеализацией существенных и отбрасыванием несущественных (второстепенных) факторов. Она представляет собой совокупность твердых тел m , соединенных упругими механическими связями E , с сосредоточенными — модель первого вида (рис. 7.1, а) или с сосредоточенными и распределенными параметрами — модель второго вида (рис. 7.1, б).

Если собственная частота элемента конструкции существенно превышает частоту вибрационного воздействия, то этот элемент можно считать твердым телом; в противном случае он является нежесткой механической связью. Например, амортизатор представляется в виде упругого элемента с сосредоточенными параметрами.

Так как виброускорения, действующие на ЭВМ, задаются для трех взаимно перпендикулярных направлений, то и расчетную модель конструкции необходимо составлять для каждого направления. Построение расчетной модели удобно связывать с естественным разделением конструкции на сборочные узлы. Это облегчит общий анализ на-

дежности ЭВМ и оценку качества разрабатываемых сборочных узлов. Система, состоящая из упругой связи и твердого тела, показанная на рис. 7.2, а, где c — жесткость связи; b — коэффициент демпфирования, называется *элементарной вибрационной системой*.

Разбиение конструкции на элементарные вибрационные системы и установление соответствия конструктивных узлов ЭВМ элементам этих вибрационных систем может производиться из следующих соображений: если внутри данного конструктивного узла существует нежесткая механическая связь, то жесткая часть этого узла образует основание вибрационной системы, нежесткая механическая связь — упругую связь модели, а объектом является следующий конструктив-

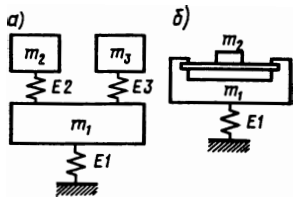


Рис. 7.1. Модель механической системы с сосредоточенными (а) и с сосредоточенными и распределенными (б) параметрами

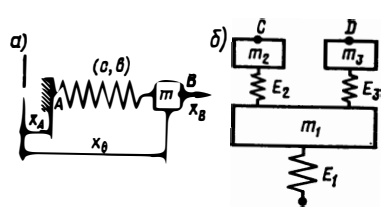


Рис. 7.2. Элементарная (а) и трехмассовая (б) вибрационные системы

ный узел, входящий в рассматриваемый (если его можно считать твердым телом), или его жесткая часть. Рассматривая последовательно конструкцию ЭВМ от стойки к модулю, получаем цепочку вибрационных систем, составляющих модель конструкции для данного геометрического направления. Сделаем несколько общих замечаний о возможных местах существования нежесткой механической связи. Нежесткая механическая связь в виде амортизаторов может существовать между всей конструкцией ЭВМ и тем объектом, на котором она устанавливается; корпусом ЭВМ и пакетом плат (блоком); основанием блока и платой; опорным контуром платы и модулями, устанавливаемыми на ней.

Если все эти нежесткие механические связи имеют место, то расчетная модель конструкции будет состоять из совокупности следующих вибрационных систем: амортизаторы — жесткая часть конструкции ЭВМ; система крепления в корпусе ЭВМ блока плат — жесткие элементы блока плат; система крепления платы в блоке — плата; плата (нежесткая механическая связь с распределенными параметрами) — модуль.

Но это разбиение условное, ориентировочное, поэтому в зависимости от принятого конструктивного решения некоторые узлы могут и не выделяться в качестве составной части вибрационной системы, и наоборот — появляться новые.

В том случае, если количество элементов в ЭВМ невелико и они устанавливаются на жестких платах (плата в данном случае не является нежесткой механической связью), то приходим к модели первого вида. Ее движение описывается системой обыкновенных линейных диф-

ференциальных уравнений, количество которых определяется числом степеней свободы расчетной модели.

Эту систему удобно записывать в матричной форме:

$$M\ddot{X} + CX + B\dot{X} = E(t),$$

где M , C , B — соответственно матрицы коэффициентов инерции (масс), жесткостей, коэффициентов демпфирования; X — обобщенная координата; $E(t)$ — n -мерный вектор-столбец обобщенных возмущающих сил.

Получение частотной характеристики в этом случае не представляет трудностей и может быть выполнено обыкновенным интегрированием системы дифференциальных уравнений при небольшом числе степеней свободы или методами цепных дробей и матриц переноса, когда число степеней свободы значительно.

Частотная характеристика: для одномассовой (элементарной) системы

$$H(j\omega) = 1/(1 - E m \omega^2), \quad (7.7)$$

для разветвленной трехмассовой системы (рис. 7.2, б)

$$H_{C(D)}(j\omega) = H_1 H_{2(3)} / [1 - (m_2/m_1) H_2 (H_1 - 1) - (m_3/m_1) \times \\ \times H_3 (H_1 - 1)]. \quad (7.8)$$

Здесь $E_1 = 1/(c + bj\omega)$; H_1 , H_2 , H_3 — частотные характеристики элементарных вибрационных систем.

Если отношение длины меньшей стороны печатной платы к ее толщине значительно больше десяти, то она становится нежесткой механической связью с распределенными параметрами между модулями, устанавливаемыми на ней, и ее опорным контуром. Виброускорения, действующие на модули, будут зависеть от координат точки установки модуля на плате. Так как печатная плата обладает малой жесткостью, то она является основной вибрационной системой в конструкции ЭВМ.

Движение механических систем с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, поэтому решение уравнений движения модели — довольно сложная проблема. Исследование такой системы может быть выполнено последовательным применением метода разложения движения упругой системы с распределенными параметрами по формам главных или нормальных колебаний, метода приведения акад. Ю. А. Шеманского и далее любым из методов исследования динамики систем с сосредоточенными параметрами, так как после использования двух первых методов приходим к системе обыкновенных линейных дифференциальных уравнений. Проиллюстрируем изложенную методику на примере исследования модели конструкции нестационарной ЭВМ (рис. 7.3). Модель показана на рис. 7.4, а, б, где $R_{пр}$ — приведенная реакция системы; c_1 , b_1 — соответственно жесткость и коэффициент демпфирования амортизаторов в данном главном геометрическом направлении; m_1 — масса корпуса ЭВМ и всех жестко связанных с ним элементов; m_2 — суммарная масса плат.

Разобьем модель на два участка: плата с опорным контуром — упругая система; твердое тело с нежесткой механической связью (c_1, b_1) — одномассовая система. Рассмотрим отдельно эти участки. Движение платы будет совершаться под действием кинематического возмущения за счет движения ее опорного контура по закону $x_I(t)$ и силы R_{np} , а движение твердого тела — по закону $x_0(t)$ и силы R_{np} .

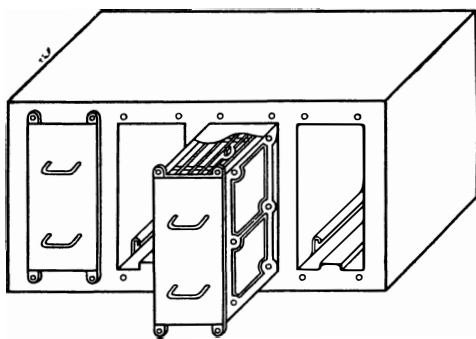


Рис. 7.3. Конструкция нестационарной ЭВМ

Представим относительное перемещение платы в виде ряда по формам ее главных колебаний: $W(z, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(t) f_i(z, y)$, тогда

$$x_{II}(z, y, t) = x_I(t) + \sum_{i=1}^{\infty} u_i(t) f_i(z, y),$$

где $x_I(t)$ — переносное движение упругой системы как твердого тела вместе с ее опорным контуром; $u_i(t)$ — перемещение точки упругой

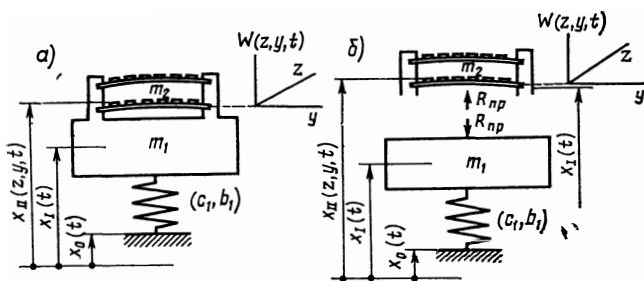


Рис. 7.4. Модель конструкции нестационарной ЭВМ как механической системы

системы в i -м главном колебании относительно ее недеформированного состояния; $f_i(z, y)$ — форма i -го главного колебания упругого тела (нормальная функция).

Дифференциальное уравнение движения упругой системы составим, используя принцип Даламбера и начало возможных перемещений. При выводе применим метод приведения акад. Ю. А. Шеманского. Так как главное колебание упругого тела в данном направлении может совершаться независимо от других его главных колебаний, то движение системы в каждом главном направлении можем рассматривать отдельно. Рассмотрим i -е главное колебание системы. На перемещении

$x_I + u_i f_i$ силы инерции упругой системы

$$F_{ин} = - \int_S m_e [\ddot{x}_I(t) + \ddot{u}_i(t) f_i(S)] dS, \quad (7.9)$$

где $S = (z, y)$; m_e — масса элементарной площадки упругой системы.

Сообщим системе бесконечно малое возможное перемещение $\delta u_i f_i$ в i -м главном колебании и подсчитаем работу всех сил, действующих на упругую систему при этом перемещении: работа сил инерции

$$A_{инi} = - \int_S m_e [\ddot{x}_I(t) + \ddot{u}_i(t) f_i(S)] \delta u_i(t) f_i(S) dS; \quad (7.10)$$

работа упругих сил

$$A_{упр i} = - (\partial v_i / \partial u_i) \delta u_i = - K_{iпр} u_i(t) \delta u_i(t), \quad (7.11)$$

где $v_i = 0,5 K_{iпр} u_i^2$ — потенциальная энергия упругой системы, обусловленная деформациями ее в i -м главном колебании; $K_{iпр}$ — приведенный коэффициент жесткости упругой системы, соответствующий i -му главному колебанию.

Приравнивая нулю полную работу на возможном перемещении, получим дифференциальное уравнение движения упругой системы:

$$\int_S m_e [\ddot{x}_I(t) + \ddot{u}_i(t) f_i(S)] f_i(S) dS + K_{iпр} u_i(t) = 0,$$

или

$$m_{iпр} \ddot{u}_i(t) + K_{iпр} u_i(t) = \Phi_{iпр}, \quad (7.12)$$

где $m_{iпр} = \int_S m_e f_i^2(S) dS$ — приведенная масса упругой системы в i -м главном колебании; $\Phi_{iпр} = - \int_S m_e \ddot{x}_I(t) f_i(S) dS$ — приведенная сила упругой системы при ее колебаниях по форме, определяемой нормальной функцией $f_i(S)$.

Предполагая, что затухание линейное и диссипативные связи между отдельными формами колебаний отсутствуют, можно ввести затухание в виде

$$F_{дем.пр} = 2\varepsilon_i \omega_i \dot{u}_i(t) \int_S m_e f_i^2(S) dS, \quad (7.13)$$

где ε_i — характеристики затухания отдельных форм собственных колебаний, равные логарифмическим декрементам затухания отдельных форм собственных колебаний, деленным на 2π ; ω_i — частота, соответствующая i -му главному колебанию.

Можно показать, что упругая сила в i -м главном колебании

$$F_{i упр.пр} = u_i(t) \omega_i^2 \int_S m_e f_i^2(S) dS. \quad (7.14)$$

Тогда на основании (7.12)—(7.14) уравнение движения упругой системы в координатах по формам главных колебаний будет:

$$\ddot{u}_i(t) \int_S m_e f_i^2(S) dS + u_i(t) \omega_i^2 \int_S m_e f_i^2(S) dS + \dot{u}_i(t) 2\varepsilon_i \omega_i \int_S m_e f_i^2(S) dS = - \int_S m_e \ddot{x}_1(t) f_i(S) dS. \quad (7.15)$$

Реакция упругой системы (платы) R_{np} на корпус-основание будет равна геометрической сумме, а так как они имеют одинаковое направление, — алгебраической сумме отдельных реакций:

$$R_{np} = - \sum_{i=1}^{\infty} \left[m_e u_i(t) \omega_i^2 \int_S f_i^2(S) dS + 2m_e \varepsilon_i \omega_i \dot{u}_i(t) \int_S f_i^2(S) dS \right]. \quad (7.16)$$

Следовательно, дифференциальное уравнение движения одномассовой системы с массой m_1 запишется в виде

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 x_1(t) + b_1 \dot{x}_1(t) - \sum_{i=1}^{\infty} m_e \int_S f_i^2(S) \times \times dS [u_i(t) \omega_i^2 + 2\varepsilon_i \omega_i \dot{u}_i(t)] = c_1 x_0(t) + b_1 \dot{x}_0(t). \quad (7.17)$$

С учетом (7.15) и (7.16) движение всей системы опишется следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\ddot{u}_i(t) + u_i(t) \omega_i^2 + 2\varepsilon_i \omega_i \dot{u}_i(t) = - \ddot{x}_1(t) \cdot \int_S f_i(S) dS \Big/ \int_S f_i^2(S) dS, \quad (7.18)$$

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + c_1 x_1(t) + b_1 \dot{x}_1(t) - \sum_{i=1}^{\infty} m_e \int_S f_i^2(S) dS \times \times [u_i(t) \omega_i^2 + 2\varepsilon_i \omega_i \dot{u}_i(t)] = c_1 x_0(t) + b_1 \dot{x}_0(t).$$

Решая систему (7.18), получаем частотную характеристику в виде

$$H(j, \omega, S) = \frac{(c_1 + b_1 j\omega) \left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\omega^2 \int_S f_i(S) dS}{(\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\varepsilon_i \omega_i \omega) \int_S f_i^2(S) dS} f_i(S) \right]}{-m_1 \omega^2 + c_1 + b_1 j\omega - m_e \omega^2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\omega_i^2 + 2j\varepsilon_i \omega_i \omega}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\varepsilon_i \omega_i \omega} \int_S f_i(S) dS}. \quad (7.19)$$

Итак, мы получили частотную характеристику модели в предположении, что нам известны частоты и формы главных колебаний упругой системы — платы.

§ 7.3. РАСЧЕТ ПЛАТЫ ТИПОВОГО ЭЛЕМЕНТА ЭВМ

Часто корпус ЭВМ крепится к основанию без амортизаторов. В этом случае плата становится не только основной, но и единственной вибраторной системой, в которой может иметь место резонансное усиление виброускорений. Если жесткость платы недостаточна, это усиление может оказаться настолько большим, что надежность конструкции не будет обеспечена. Жесткость платы зависит от ее геометрических размеров и способа крепления — граничных условий. На рис. 7.5 показаны различные способы крепления плат — граничные условия.

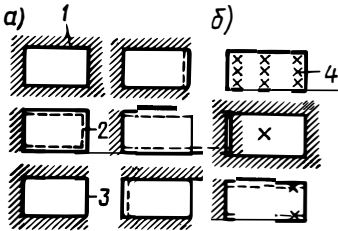


Рис. 7.5. Способы крепления плат, допускающие (а) и недопускающие (б) получение частотной характеристики аналитическим методом:

1 — зажатый край; 2 — опертый край; 3 — свободный край; 4 — точечное зажатие

Зажатым краем можно считать крепление ячейки в разьеме. Условия опертого края имеют место, например, для боковых стенок платы, которая вставляется по направляющим. Обычно способ крепления выбирают из конструктивных соображений. Разрабатывая конструкцию платы, предназначенной для

функционирования в условиях вибрации, надо иметь в виду, что от способа крепления платы зависит степень усиления ею виброускорений.

Частотная характеристика платы имеет вид

$$H(j, \omega, S) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\omega^2}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2j\epsilon_i \omega_i \omega} \frac{\int_z \int_y f_i(z, y) dz dy}{\int_z \int_y f_i^2(z, y) dz dy} f_i(z, y) \quad (7.20)$$

и зависит от длины, ширины, толщины, материала платы и способа ее крепления. Способ крепления платы определяет вид нормальных функций $f_i(z, y)$, а следовательно, и выражение для частотной характеристики. Получив выражения для нормальных функций и соответствующих им частот главных колебаний, можно решить вопрос о выборе геометрических размеров и материала платы, обеспечивающих надежную работу модулей при данном способе крепления плат. Например, пусть задано широкополосное случайное возмущение, тогда среднеквадратичное значение реакции конструкции на это возмущение, т.е. узкополосное вибраторное воздействие на модуль,

$$\sigma_p = \sqrt{\left(\int_0^{\infty} S(\omega) \eta^2(\omega) d\omega \right) / \pi}, \quad (7.21)$$

где $\eta(\omega)$ — модуль частотной характеристики платы; при выбранном способе крепления он зависит только от геометрических размеров и материала платы. Для удовлетворения критерия виброустойчивости, ес-

ли время воздействия эксплуатационной вибрации и время испытаний одинаково, необходимо, чтобы $\sigma_p \leq \sigma_n$, где σ_n — среднеквадратичное значение узкополосной вибрации при испытаниях на виброустойчивость.

Исследование упругих тел составляет предмет теории пластин и оболочек. Плата считается тонкой пластинкой, если отношение ее толщины к наименьшему из двух других ее размеров меньше 1/10. Для различных сочетаний граничных условий первая собственная частота тонких пластин (Γ_c)

$$\omega_1 = 0,159 (K_\alpha/a^2) \sqrt{Dg/(\rho h)}, \quad (7.22)$$

или с учетом распределенного веса микросхем

$$\omega_1 = 0,159 (K_\alpha/a^2) \sqrt{D/m_e}, \quad (7.23)$$

где

$$m_e = \rho h/g + G_M N/(Sg); \quad (7.24)$$

$$D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]; \quad (7.25)$$

K_α — коэффициент, формулы для определения которого приведены в табл. 7.1; a — наибольшая из сторон платы, м; E и ν — модуль упругости (н/м^2) и коэффициент Пуассона материала платы; D — жесткость изгиба платы, $\text{Н}\cdot\text{м}$; g — ускорение свободного падения; ρ — удельный вес материала платы, Н/м^3 ; h — толщина платы, м; m_e — распределенная по площади масса, кг/м^2 ; G_M — вес одного модуля, Н ; N — число модулей на плате; S — площадь платы, м^2 .

Для некоторых стеклотекстолитов, используемых для печатных плат, $E = (3 \div 3,8) 10^5 \text{ Н/м}^2$, $\nu = 0,17 \div 0,27$, $\rho = (1,9 \div 2,4) 10^{-3} \text{ Н/м}^3$.

Естественно, что изучены не все возможные конструктивные решения по способу крепления плат. Кроме того, желательно иметь выражения для определения всех частот и форм главных колебаний платы. Обратимся поэтому к методу исследования плат как упругих систем с распределенными параметрами. Колебания упругих систем с распределенными параметрами описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Например, уравнение свободных колебаний изотропной платы имеет вид

$$D_0 \left(\frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial z^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial y^4} \right) + m_e \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial t^2} = 0 \quad (7.26)$$























или

$$D_0 \left(\frac{\partial^4 W}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial z^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) = m_e \lambda W,$$

$$\text{если } W = (A \cos \sqrt{\lambda t} + B \sin \sqrt{\lambda t}) \bar{W}(z, y).$$

Решением этого уравнения являются формы и частоты собственных колебаний плат, которые должны удовлетворять конкретным краевым условиям. Например, для зажатого края граничные условия

Таблица 7.1

Способ крепления	K_{α}	Способ крепления	K_{α}
	$9,87 \sqrt{1+2,566 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$22,37 \sqrt{0,1 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$
	$22,37 \sqrt{1+0,48 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$22,37 \sqrt{1+0,1 \frac{a^2}{b^2}}$
	$22,37 \sqrt{1+0,57 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$22,37 \frac{a^2}{b^2}$
	$15,42 \sqrt{1+1,19 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$22,37$
	$15,42 \sqrt{1+0,95 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$3,52 \frac{a^2}{b^2}$
	$9,87 \sqrt{1+2,33 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$3,52$
	$3,52 \sqrt{1+5,97 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$15,42 \frac{a^2}{b^2}$
	$22,37 \sqrt{1+0,14 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$15,42$
	$22,37 \sqrt{1+0,61 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$9,87 \frac{a^2}{b^2}$
	$9,87 \sqrt{0,43 \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$		$9,87$
	$9,87 \sqrt{1+0,43 \frac{a^2}{b^2}}$		$9,87 (1+\frac{a^2}{b^2})$

получаются из условия равенства нулю прогиба и угла наклона касательной и запишутся в виде:

$$\begin{aligned} W = 0; \partial W / \partial z = 0; \text{ при } z = 0 \text{ или } z = a; \\ W = 0; \partial W / \partial y = 0, \text{ при } y = 0 \text{ или } y = b. \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к необходимости решения краевой задачи математической физики. Основным способом решения прикладных задач математической физики является вариационный метод. Вариационные методы основаны на том, что во многих случаях задачу интегрирования дифференциальных уравнений можно заменить равносильной задачей об отыскании функции, сообщающей некоторому интегралу наименьшее значение. Рассмотрим линейный дифференциальный оператор A , при действии которого на некоторую функцию W , характеризующую координаты смещения точек колеблющегося тела, получим левую часть дифференциального уравнения статики этого тела:

$$AW = 0.$$

Этот линейный дифференциальный оператор задан на функциях, удовлетворяющих некоторым граничным условиям, определяемым способом крепления тела:

$$RW/\gamma = 0,$$

где R/γ — линейный дифференциальный оператор граничных условий; γ — граница тела.

Для платы с зажатыми краями

$$A = D_0 \left(\frac{\partial^4}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial z^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right); \quad (7.27)$$

$$R/\gamma = |1; \partial / \partial z; \partial / \partial y|. \quad (7.28)$$

Рассмотрим теперь класс функций W , имеющих непрерывные производные тех порядков, которые встречаются в выражениях AW и RW в точках рассматриваемой области и удовлетворяющих нашим краевым условиям. Этот класс называется областью определения оператора A и обозначается D_A .

Собственными функциями оператора A , соответствующими формам собственных колебаний упругого тела и отвечающими собственным значениям λ_i , называются ненулевые функции, удовлетворяющие уравнению

$$AW = \lambda W,$$

где $W \in D_A$.

Собственные значения λ пропорциональны квадрату собственных частот упругого тела.

При решении прикладных задач обычно достаточно определить несколько первых собственных частот и соответствующих им собственных функций, так как колебания, которые характеризуются собственными функциями, соответствующими большим собственным значениям, имеют очень малые амплитуды и не представляют интереса с физической точки зрения.

В теории краевых задач математической физики показывается, что исходная задача на собственные значения оператора A сводится к задаче отыскания минимума функционала

$$bu = [u, u]/(u, u) = A(u, u)/(u, u)$$

или

$$au = (Au, u)$$

при условии нормировки $(u, u) = 1$, где $(u, u) = \int_S u u dS$, $[u, u] = (Au, u) = \int_S u A u dS$.

Функцию смещения упругого тела u можно разложить в ряд по координатным функциям:

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i f_i. \quad (7.29)$$

Координатные функции f_i должны составлять полную систему линейно независимых функций в области определения оператора D_A .

Искомые собственные функции находим как линейные комбинации конечного числа координатных функций:

$$W_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i,$$

где α_i — постоянные коэффициенты.

Задача сводится к нахождению таких α_i , при которых достигается минимум энергетического произведения:

$$(Au, u) = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n \alpha_k \alpha_m [f_k, f_m] \quad (7.30)$$

при условии нормировки $W_n = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n \alpha_k \alpha_m (f_k, f_m) = 1$.

Для нахождения условного экстремума составим функцию Лагранжа

$$\Phi(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = (A W_n, W_n) - \lambda (W_n, W_n). \quad (7.31)$$

Приравнивая к нулю $\partial\Phi/\partial\alpha_m$, получаем систему линейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k \{(A f_k, f_m) - \lambda (f_k, f_m)\} = 0, \quad (m = 1, 2, \dots, n). \quad (7.32)$$

Для того чтобы существовало нетривиальное решение, определитель этой системы должен равняться нулю, а это дает уравнение для определения собственных чисел. Коэффициенты разложения собственных функций определяют из системы уравнений (7.32) при подстановке туда значения λ .

§ 7.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТИПОВОЙ ПЛАТЫ

Применим аналитический метод для исследования платы, условно показанной на рис. 7.6. Здесь размер платы: $2a$ — по оси z ; $2b$ — по оси y . Дифференциальное уравнение свободных колебаний и оператор A для этой платы уже указывались (7.26) и (7.27).

Выберем систему координатных функций, удовлетворяющих граничным условиям. Поскольку область платы прямоугольна, то имеет смысл исходить из ортогональной в прямоугольнике тригонометрической системы:

$$\left\{ \frac{\sin}{\cos} \right\} k\pi \frac{z}{a} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} m\pi \frac{y}{b}.$$

Из конструктивного решения крепления платы вытекают следующие граничные условия: 1) так как плата зажата в точках M_i с координатами $(\pm a, 0)$; $(\pm a, \pm b)$; $(0, \pm b)$; $(0, 0)$, то граничные условия для них будут:

$$W_{M_i} = 0; \quad \partial W_{M_i} / \partial z = 0;$$

$$\partial W_{M_i} / \partial y = 0;$$

2) остальная граница прямоугольника свободна. Координатные функции можно не подчинять условию свободного края, если их энергетические нормы ограничены в совокупности.

Чтобы удовлетворить первому условию, введем весовой множитель

$$Q(z, y) = \sin^2(\pi z/a) + \sin^2(\pi y/b),$$

обращающийся в нуль вместе со своими первыми производными в точках M_i . Тогда координатные функции будут иметь вид

$$f_{k,m}(z, y) = Q(z, y) C_{k,m} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} k\pi \frac{z}{a} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} m\pi \frac{y}{b},$$

где $C_{k,m} = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{k^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right)^{-1}$ — множитель, обеспечивающий ограниченность энергетических норм координатных функций в совокупности. Например, $C_{0,0} = ab/\pi^2$.

Решение уравнения свободных колебаний платы

$$W(z, y) = Q(z, y) \sum_{k,m=0}^n \alpha_{k,m} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} k\pi \frac{z}{a} \left\{ \frac{\cos}{\sin} \right\} m\pi \frac{y}{b}.$$

Ограничиваясь случаем $0 \leq k + m \leq 2$ и вычисляя энергетические и скалярные произведения координатных функций, получаем матрицы этих произведений, от которых можно перейти к определителю

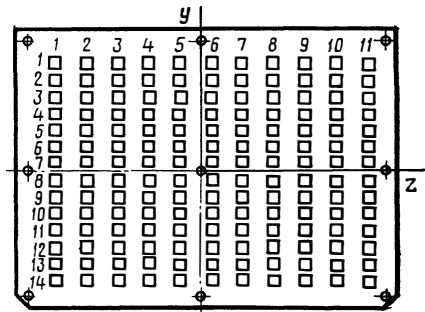


Рис. 7.6. Плата с точечным креплением

для вычисления собственных значений, т. е. квадрата собственных частот платы.

Найдем собственные частоты и координатные функции для платы с размерами $2a = 230$ мм, $2b = 326$ мм, $h = 1,2$ мм, на которой расположено 250 модулей, вес модуля около 1,5 Н, он распределен на площади 11×11 мм². Эту нагрузку можно считать распределенной, а массу единицы площади вычислять по (7.24): $m_e = 0,6 \cdot 10^{-6}$ кг/см².

Для материала этой платы модуль упругости $E = 3,78 \cdot 10^5$ Н/см², коэффициент Пуассона $\nu = 0,173$. Тогда

$$D = Eh^3/[12(1 - \nu)^2] = 53,5 \text{ Н}\cdot\text{см}.$$

После вычислений получаем:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{m_e}} \sqrt{\frac{27\gamma^4 + 4\gamma^2 + 8}{7\gamma^4}} = 163 \text{ Гц}, f_1 = \\ &= a_1 Q(z, y) \sin \frac{\pi z}{a}; \end{aligned}$$

$$\omega_2 = \frac{\pi}{2b^2} \sqrt{\frac{D}{m_e}} \sqrt{\frac{8\gamma^4 + 4\gamma^2 + 27}{7\gamma^4}} = 233 \text{ Гц}, f_2 = a_2 Q(z, y) \sin \frac{\pi y}{b},$$

$$\omega_3 = \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{m_e}} \sqrt{\frac{23\gamma^4 + 4\gamma^2 + 8}{3\gamma^4}} = 252 \text{ Гц}, f_3 = a_3 Q(z, y) \cos \frac{\pi z}{a};$$

$$\begin{aligned} \omega_4 &= \frac{\pi}{2a^2} \sqrt{\frac{D}{m_e}} \sqrt{\frac{50\gamma^4 + 54\gamma^2 + 59}{19\gamma^4}} = 254 \text{ Гц}; f_4 = \\ &= a_4 Q(z, y) \sin \frac{\pi z}{a} \sin \frac{\pi y}{b}. \end{aligned}$$

Здесь $\gamma = b/a$.

Таким образом, если плата с выбранным конструктивным решением по ее креплению не исследована в теории тонких пластинок, то ее можно исследовать по вышеприведенной методике.

Для пластин с четырьмя точками крепления частота собственных колебаний (Гц)

$$\omega_{m,n} = \frac{\pi}{2} \frac{(1 + \gamma^2)}{b^2} (n^2 \gamma^2 + m^2) \sqrt{\frac{D}{m_e}}. \quad (7.33)$$

Для пластин с числом точек крепления $n = 5, 6$ первая собственная частота (Гц)

$$\omega_1 = (\pi/2) (A + 1/b^2) \sqrt{D/m_e}, \quad (7.34)$$

где $A = 4/(a^2 + b^2)$ при $n = 5$ и $A = 1/(4a^2)$ при $n = 6$.

Способы крепления плат с точечным зажатием дают такие граничные условия для краевой задачи, которые не позволяют найти полную систему собственных функций и, следовательно, частотную характеристику этой парциальной системы и всей системы расчетным путем.

Для них могут быть только оценены собственные значения и отдельные собственные формы.

Однако частотные характеристики в сколь угодно сложной или неподдающейся расчету системе могут быть измерены. Наличие в этом случае даже неполной системы собственных функций парциальной упругой системы позволяет выявить наиболее опасные точки системы и выбрать минимальное число необходимых точек для экспериментального определения частотных характеристик. Если экспериментально получена частотная характеристика всей системы, то могут быть использованы почти все критерии для оценки и обеспечения надежности

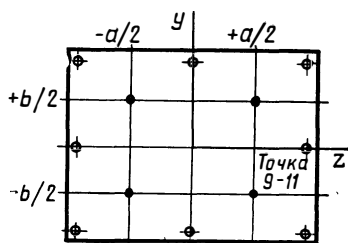


Рис. 7.7. Точки экстремума трех координатных функций платы субблока с точечным креплением

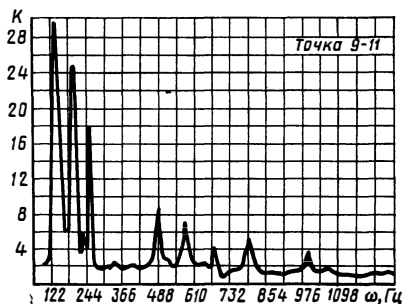


Рис. 7.8. Частотная характеристика точки 9—11 платы, показанной на рис. 7.7

конструкции ЭВМ в смысле недопустимости отказов из-за заданных виброускорений. При неполной системе собственных функций и соответствующих собственных значений можно применить такой критерий для оценки вибрационных свойств отдельных конструктивных решений, как совпадение резонансных частот конструктивных узлов. Следовательно, даже этот неполный расчет дает материал для введения конструктивных изменений с целью повышения надежности ЭВМ.

Для отыскания наиболее опасных точек платы необходим только вид нормальных функций. Так как решение уравнения свободных колебаний платы периодическое, то точки, соответствующие максимальным перегрузкам, определяются равно как максимумом, так и минимумом координатных функций. Таким образом, проблема локализации наиболее опасных точек платы сводится к нахождению экстремумов функций двух независимых переменных — координатных функций.

Экстремум функции двух независимых переменных ищется по следующей схеме. Определяют первые частные производные координатной функции $\partial f/\partial z$ и $\partial f/\partial y$. Решают систему уравнений

$$\partial f/\partial z = 0; \quad \partial f/\partial y = 0. \quad (7.35)$$

Полученные системы решений (z_1, y_1) , (z_2, y_2) подставляют во вторые производные координатной функции:

$$A = \partial^2 f/\partial z^2; \quad B = \partial^2 f/\partial z \partial y; \quad C = \partial^2 f/\partial y^2. \quad (7.36)$$

Затем составляют определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} A & B \\ B & C \end{vmatrix} = AC - B^2 = \left| \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z \partial y} \right)^2 \right|_{\substack{z=z_1 \\ y=y_1}}. \quad (7.37)$$

Если $\Delta > 0$, то функция $f(z, y)$ для системы значений (z_1, y_1) имеет максимум при $d^2 f / dz^2 < 0$ и минимум при $d^2 f / dz^2 > 0$. Если $\Delta < 0$, то $f(z, y)$ не имеет ни максимума, ни минимума. Произведенное исследование координатных функций на экстремум дало следующие результаты. Например, точки экстремума координатных функций $f_I(S)$, $f_{II}(S)$ и $f_{IV}(S)$, собственные частоты которых равны 163, 233 и 254 Гц соответственно, имеют координаты $(\pm a/2, \pm b/2)$ (рис. 7.7). По экспериментально полученной частотной характеристике (рис. 7.8) для точки 9—11 определены соответствующие данным резонансным частотам коэффициенты усиления:

Резонансная частота, Гц	. . 163	233	254
Коэффициент усиления	. . 30	25	18

§ 7.5. КОНСТРУИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МОДУЛЕЙ ЭВМ

Одна из основных функций несущих элементов — защита устанавливаемых на них модулей от механических воздействий. Для микросхем, монтируемых в субблоке, несущей конструкцией служит печатная плата, для блока и самой нестационарной ЭВМ — литая рамка или каркас, обладающие большой жесткостью и, следовательно, высокой собственной частотой. Как уже отмечалось выше, основной вибрационной системой конструкции ЭВМ является плата. Частотная характеристика платы зависит от ее материала, геометрических размеров и граничных условий, которые определяются способом крепления платы. Снижение коэффициента усиления и повышение собственных частот за счет изменения геометрических размеров платы и выбора материала с соответствующими физико-механическими свойствами весьма ограничено. Значительно больше возможностей у конструктора для изменения граничных условий.

Оценим эффективность наиболее распространенных в практике конструирования ЭВМ способов крепления: зажатый край и точечное зажатие. Важная характеристика элемента конструкции — первая собственная частота. Напомним, что если она не попадет в диапазон воздействующих виброускорений (будет больше верхней граничной частоты), то этот элемент можно считать абсолютно твердым телом. Пусть у печатной платы $a = b = 10$ см, $D = 60$ Н·см, $m_e = 0,6 \cdot 10^{-6}$ кг/см². Тогда для случая зажатого контура (см. табл. 7.1, схема 9) по (7.23) получим первую собственную частоту $\omega_1 = 582$ Гц, для двух зажатых и двух свободных краев (схема 15) — $\omega_1 = 360$ Гц и для крепления платы в четырех точках по (7.33) — $\omega_1 = 314$ Гц.

Из этих оценок видно, что точечное зажатие — менее жесткое граничное условие, чем зажатие по краю. Отметим, что при зажатии в четырех точках первая собственная частота $\omega_1 = 582$ Гц обеспечива-

ется при $a = b = 7,2$ см, это приводит к потере 48% монтажной площади. Первая собственная частота платы с пятью точками крепления при $a = b = 10$ см, рассчитанная по (7.34), будет равна $\omega_1 = 470$ Гц, т. е. выше, чем у платы с двумя зажатými и двумя свободными краями, а для платы с девятью точками крепления (см. рис. 7.6) $\omega_1 = 1508$ Гц при $a = b = 10$ см, т. е. значительно выше, чем при зажатии по контуру.

Таким образом, для улучшения качества несущей конструкции с точки зрения передачи ею механических воздействий можно рекомендовать введение опорных поверхностей по контуру платы и в ее вну-

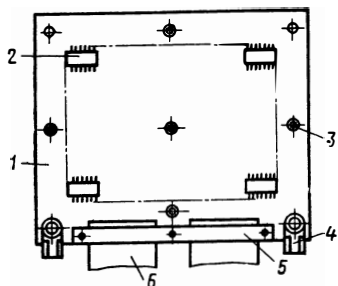


Рис. 7.9. Конструкция субблока с креплением в четырех точках с пятью упорами:

1 — печатная плата; 2 — микро-схема; 3 — упор; 4 — шарнир; 5 — планка; 6 — кабель гибкий

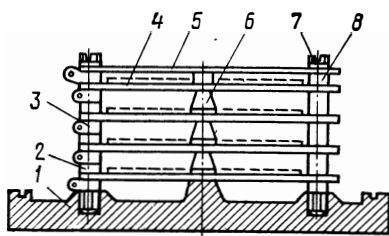


Рис. 7.10. Пакет субблоков книжной конструкции

тренней области в виде накладок или рамок. Взаимное прилегание плат по опорным поверхностям при сборке их в пакет дает условие зажатого края. Большой эффект дает увеличение точек крепления по контуру платы и во внутренней области или введение дополнительных точечных упоров, которые обеспечивают точечное зажатие при контактировании упоров с корпусом. Эти же меры приводят к уменьшению коэффициентов усиления виброускорений. Координаты дополнительных точек крепления или опорных точек определяются в результате исследования на экстремум координатных функций (см. § 7.4).

Если не предусматривать специальных воздушников, что значительно усложняет конструкцию, зажатый по всему контуру край образует замкнутые полости и поэтому может использоваться только в тех случаях, когда тепловой режим обеспечивается за счет кондукции и излучения. Заметим, что контактирование металлических накладок или рамок субблоков со стенками корпусов блоков улучшает отвод теплоты кондукцией. Рассмотрим некоторые конструктивные решения субблоков и блоков нестационарных ЭВМ.

На рис. 7.9 показана конструкция субблока, крепление которого осуществляется зажатием в четырех точках при сборке в пакет.

Пакет плат книжной конструкции изображен на рис. 7.10. Субблоки 4 крепят к корпусу 1 с помощью винтов 7 с использованием распорных втулок 8. Высота распорных втулок должна быть равна высоте упоров 6 и больше высоты микросхем с учетом прогибов и ам-

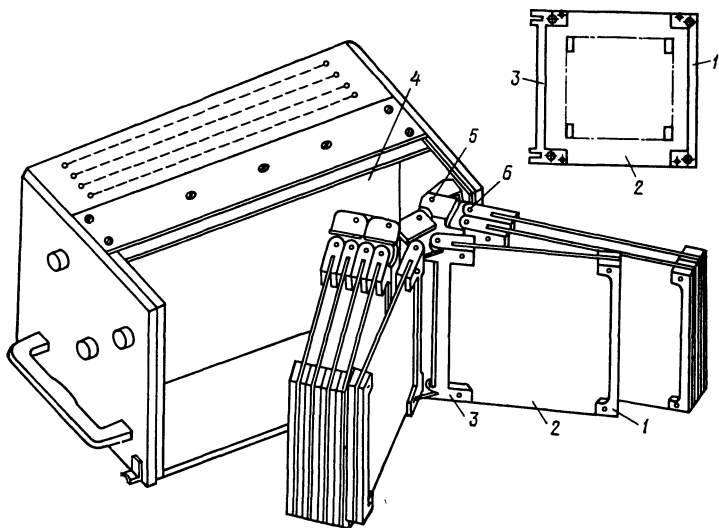


Рис. 7.11. Блок книжной конструкции с двойными шарнирами

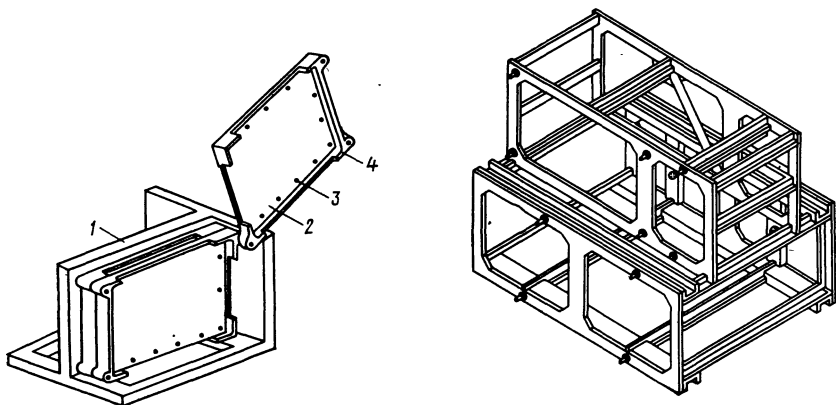


Рис. 7.12. Конструкция блока с горизонтальной осью разворота субблоков

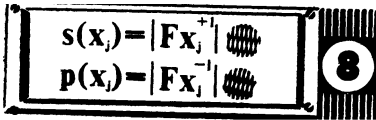
Рис. 7.13. Конструкция рамы нестационарной ЭВМ

плитуды колебаний. Крышка 5 обеспечивает плотное взаимное прилегание плат субблоков по опорным поверхностям упоров. Элементы шарнирного устройства 2, 3 исключают возможность соприкосновения субблоков при раскрытии. Внутриблочные соединения могут быть выполнены объемным монтажом или гибким печатным кабелем.

Конструкция блока, представленная на рис. 7.11, обеспечивает условие зажатого края по двум сторонам за счет взаимного прилегания при сборке плат 2 в пакет по накладкам 1 и 3. Накладка 3 имеет петли для шарнирного крепления субблоков в пакете. Пакет с помощью винтов крепится к средней стенке 4, являющейся несущим элементом блока. Двойные шарниры 5 и 6 обеспечивают наилучшее раскрытие при большом числе субблоков.

На рис. 7.12 показана конструкция блока с каркасными субблоками. Плата 2 крепится винтами или пустотелыми заклепками 3 к литой раме 4. Такое крепление обеспечивает комбинированное граничное условие: плата зажата в точках крепления, а на остальной части оперта. Литая рама имеет три прилива, два из которых используются для фиксации субблока в блоке, третий является элементом шарнирного крепления. Субблоки каркасной конструкции могут быть одно-, двух- и многоплатные. Субблоки крепятся винтами или шпильками к средней стенке 1 блока веерной конструкции с осью раскрытия, перпендикулярной плоскости блока. Внутриблочные соединения осуществляют гибкими кабелями.

Блоки нестационарных ЭВМ объединяются в несущей раме. Конструкция рамы, предназначенной для установки герметичных блоков с естественным охлаждением, представлена на рис. 7.13.



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ

§ 8.1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Формальная постановка задач конструкторского проектирования на языке теории графов помогает четко их формулировать и нередко дает возможность использовать для их решения существующие методы преобразования графов.

Граф можно представить как некоторое множество, на элементах которого определены следующие двуместные отношения: рефлексивности, симметричности и бинарное. Если пара элементов, входящих в отношение, рассматривается как элемент нового множества, то граф определяют как два непересекающихся множества X (множество вершин) и U (множество ребер), причем элементы второго множества задают отношение между элементами первого.

Множество ребер разбивают на три непересекающихся подмножества (петли, звенья — неориентированные ребра, и дуги — ориентированные ребра) в соответствии со справедливостью следующих высказываний:

1) $(\exists x_i \in X)((x_i, x_i) \in R_1)$ — на элементе x_i существует отношение рефлексивности R_1 , т. е. при вершине x_i есть петля;

2) $(\exists x_i, x_j \in X)((x_i, x_j) \in R_2 \ \& \ (x_j, x_i) \in R_2 \ \& \ (i \neq j))$ — между элементами x_i и x_j существует отношение симметричности R_2 , в графе эти две вершины соединяются неориентированным ребром — звеном;

3) $(\exists x_i, x_j \in X)((x_i, x_j) \in R_3 \rightarrow (x_j, x_i) \notin R_3 \ \& \ (i \neq j))$ — элементы x_i и x_j находятся в бинарном отношении R_3 , в графе они соединяются ориентированным ребром — дугой, идущей из вершины x_i в вершину x_j . Здесь $i, j \in I = \overline{1, n}$, $|X| = n$ — количество вершин графа.

Граф, между элементами которого существуют все три вида отношений (истинны высказывания 1, 2, 3), называется *смешанным*. При геометрическом представлении графа вершины x изображаются кружками (точками), петли — замкнутыми кривыми, звенья — линиями, дуги — стрелками. На рис. 8.1, а показан смешанный граф, множество вершин которого $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, множество ребер $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8\}$, причем последнее распадается на три подмножества: $\dot{U} = \{u_3, u_8\}$ — петли, $\tilde{U} = \{u_2, u_4, u_7\}$ — звенья и $\vec{U} = \{u_1, u_5, u_6\}$ — дуги. Заметим, что ребра определяются следующим образом: $u_1 = (x_1, x_2)$; $u_2 = (x_1, x_2) = (x_2, x_1)$; $u_3 = (x_2, x_2)$; $u_4 = (x_2, x_3) = (x_3, x_2)$; $u_5 = (x_3, x_4)$; $u_6 = (x_4, x_3)$; $u_7 = (x_4, x_2) = (x_2, x_4)$; $u_8 = (x_4, x_4)$.

Так как бинарное отношение задается упорядоченной парой, неверной будет запись $u_1 = (x_2, x_1)$, $u_5 = (x_4, x_3)$, $u_6 = (x_3, x_4)$. Если две вершины имеют общее ребро, то они называются *смежными* и каждая вершина *инцидентна* этому ребру (аналогично два ребра будут смежными, если они имеют общую вершину и ребро инцидентно каждой своей вершине).

Граф $G = (X, U)$ будет конечным, если число его вершин $|X| = n$ конечно. В дальнейшем будем рассматривать только конечные графы. Граф G , у которого $X = \emptyset$ и $U = \emptyset$, т. е. не содержащий ни вершин, ни ребер, называется *пустым* и обозначается G_\emptyset .

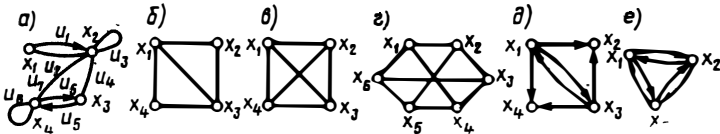


Рис. 8.1. Графы смешанный (а), неориентированный (б), полный четырехвершинный неориентированный (в), однородный шестивершинный граф степени «3» (г), ориентированный (д), полный трехвершинный ориентированный (е)

Граф называется *неориентированным* (рис. 8.1, б), если никакие две его вершины не находятся в бинарном отношении, т. е. $\vec{U} = \emptyset$, а $\bar{U} \neq \emptyset$. Число ребер, инцидентных вершине $x_i \in X$, называют ее *локальной степенью* и обозначают $\rho(x_i)$. Через локальные степени вершин количество ребер графа будет

$$m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho(x_i), \quad (8.1)$$

где $|X| = n$.

Неориентированный граф, у которого любая пара вершин соединена ребрами, т. е. $(\forall x_i, x_j \in X) (\exists u = (x_i, x_j) \& (i \neq j))$, называется *полным* (рис. 8.1, в). Так как у полного графа $\rho(x_i) = n - 1$, то число его ребер

$$m = n(n - 1)/2. \quad (8.2)$$

Граф называется *однородным* степени k , если $(\forall x_i \in X) \rho(x_i) = k$. Однородный шестивершинный граф показан на рис. 8.1, г.

Граф будет *ориентированным* (рис. 8.1, д), если никакие две его вершины не находятся в отношении симметричности, т. е. $\vec{U} \neq \emptyset$, а $\bar{U} = \emptyset$. Число ребер $s(x_i)$, выходящих из вершины x_i , называется *полустепенью исхода*, а число ребер $p(x_i)$, заходящих в вершину x_i , — *полустепенью захода*. Количество ребер ориентированного графа

$$r = \sum_{i=1}^n s(x_i) \text{ или } r = \sum_{i=1}^n p(x_i). \quad (8.3)$$

Ориентированный граф будет *полным*, если

$$(\forall x_i, x_j \in X) (\exists u_k = (x_i, x_j), u_l = (x_j, x_i) \in U),$$

причем $i \neq j, k \neq l$, т. е. у каждой пары вершин существует по две дуги, по одной в каждом направлении. Полный трехвершинный ориентированный граф показан на рис. 8.1, *е*. Число ребер полного ориентированного графа

$$m = n(n - 1). \quad (8.4)$$

Граф называется *двудольным* или *графом Кенига*, если его множество вершин X распадается на два непересекающихся подмножества X_1 и X_2 , таких, что существуют отношения между элементами этих

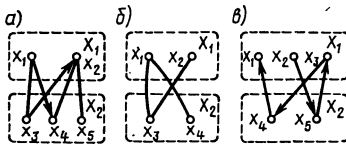


Рис. 8.2. Двудольные графы

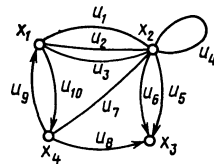


Рис. 8.3. Смешанный мультиграф

множеств и не существует отношений между элементами каждого множества, т. е.

$$(\forall u \in U) (u = (x_i, x_j) \rightarrow (x_i \in X_1 \& x_j \in X_2) \vee (x_i \in X_2 \& x_j \in X_1)), \\ i \neq j.$$

На рис. 8.2 показаны смешанный (*а*), неориентированный (*б*) и ориентированный (*в*) двудольные графы.

Приведенное выше понятие графа необходимо расширить, допустив возможность существования у пары вершин более чем одного ребра данного вида. Такой граф называется *мультиграфом*, а максимальное количество кратных ребер — *мультичислом*. На рис. 8.3 приведен пример смешанного мультиграфа, у которого мультичисло неориентированных ребер $\tilde{r} = 3$, а ориентированных — $\vec{r} = 2$.

Рассмотрим неориентированный граф без петель и кратных ребер. Последовательность смежных ребер называется *маршрутом*. В общем случае ребра в маршруте могут встречаться неоднократно. Если все ребра маршрута различны, он называется *цепью*. Замкнутая цепь называется *циклом*. Цепи и циклы будут простыми, если они не содержат повторяющихся вершин. Маршрут можно задавать последовательностью вершин, входящих в составляющие его ребра. На графе G (рис. 8.4, *а*) $x_1, x_2, x_3, x_5, x_2, x_1, x_4$ — маршрут, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_2, x_5$ — цепь, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 — простая цепь, $x_1, x_2, x_3, x_5, x_2, x_4, x_1$ — цикл, x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 — простой цикл.

Две вершины $x_i, x_j \in X$ называются *связанными*, если в графе $G = (X, U)$ существует маршрут $S = S(x_i, x_j)$. Граф будет *связным*, если любые две его вершины связаны, т. е.

$$(\forall x_i, x_j \in X) \exists S(x_i, x_j).$$

Ребро, удаление которого приводит к разбиению графа на два не связанных между собой подграфа (на две компоненты связности), называется *перешейком*. На рис. 8.4, б и $u = (x_6, x_7)$ — перешеек. Вершина называется *расщепляющейся*, если в ней можно граф разделить на две компоненты связности путем ее дублирования в обеих. В этом графе расщепляющейся является вершина x_5 . Отметим, что отношение связности для вершин является отношением эквивалентности (см. [7]).

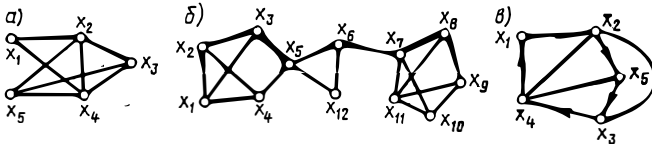


Рис. 8.4. Неориентированный граф с циклами (а); с перешейком и расщепляющейся вершиной x_5 (б); разбиение плоскости гамильтоновым циклом $x_1, x_2, x_5, x_3, x_4, x_1$ (в)

Цикл, включающий в себя все ребра графа, называется *эйлеровым*. Связный граф содержит эйлеров цикл, если локальные степени всех его вершин четны:

$$(\forall x_i \in X) \sum_{\text{mod } 2} \rho(x_i) \equiv 0.$$

Простой цикл, проходящий через все вершины графа, называется *гамильтоновым*. Это понятие используется при определении планарности

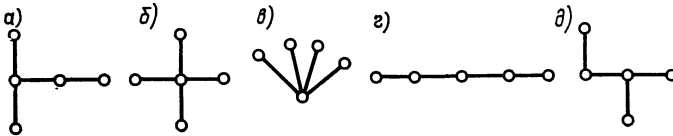


Рис. 8.5. Различные деревья на пяти вершинах

сти графа. Согласно [15] граф G имеет гамильтонов цикл, если сумма локальных степеней любой пары вершин больше или равна числу его вершин, т. е.

$$\forall x_i, x_j \in X (\rho(x_i) + \rho(x_j)) \geq n, i \neq j, |X| = n. \quad (8.5)$$

В графе (см. рис. 8.4, а) $x_1, x_2, x_5, x_3, x_4, x_1$ — гамильтонов цикл.

Если граф изобразить таким образом, чтобы гамильтонов цикл представлял собой самонепересекающуюся кривую, то этот цикл разобьет плоскость на внутреннюю и внешнюю области. На рис. 8.4, в ребро x_2, x_3 расположено на внешней области, а цикл указан стрелками.

Связный граф, не имеющий циклов, называется *деревом*. Начальная вершина дерева называется *корнем*, выходящие из него цепи — *ветвями*. Дерево, имеющее n вершин, содержит $m = n - 1$ ребер. На одних и тех же вершинах можно построить различные деревья. Пример таких деревьев для пяти вершин дан на рис. 8.5, а — д.

Число различных деревьев, которые можно построить на n вершинах (см. [15]):

$$t_n = n^{n-2}. \quad (8.6)$$

Среди различных деревьев отметим звездное (корень смежен со всеми остальными вершинами) и последовательное (корнем является один из концов), показанные на рис. 8.5, в, г.

Дерево называется *покрывающим граф*, если оно содержит все его вершины. Для графа, изображенного на рис. 8.4, в, покрывающим будет, например, звездное дерево с корнем в вершине x_4 .

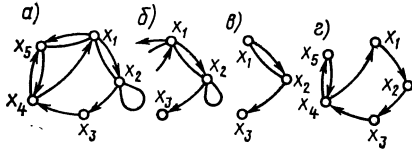


Рис. 8.6. Граф и его части

Если $i \in I = \{1, 2, \dots, l\}$, то граф можно определить как объединение G_i , т. е. $G = \bigcup_{i \in I} G_i$, если $X = \bigcup_{i \in I} X_i$, $U = \bigcup_{i \in I} U_i$.

Часть графа $G_i = (X_i, U_i)$ называется *куском* (рис. 8.6, б), если $X_i \subset X$, $U_i \subseteq U$, причем в U_i входят все ребра, инцидентные X_i . Множество ребер куска таково, что $U_i = U_{i,i} \cup_{j \in I} U_{i,j}$, где $U_{i,i}$ — множество ребер, оба конца которых инцидентны X_i , а $\cup_{j \in I} U_{i,j}$ — множество ребер, один конец которых инцидентен X_i , а второй — $X \setminus X_i$ (напомним, что $X \setminus X_i \leftrightarrow x \in X \text{ \& } x \notin X_i$). Часть графа $G_i = (X_i, U_i)$ называется *подграфом* (рис. 8.6, в), если $X_i \subset X$, $U_i \subseteq U$, т. е. подграф образуется удалением из графа части вершин и инцидентных им ребер.

Часть графа $G_i = (X_i, U_i)$ называется *суграфом* (рис. 8.6, г), если $X_i = X$, а $U_i \subset U$, т. е. суграф получается удалением из графа части ребер.

Матричный способ задания графов. Графы могут быть заданы матрицами инциденций и смежности.

Матрица инциденций задает связь между вершинами $x_i \in X$ и ребрами $u_j \in U$. Таким образом, матрица инциденций — это прямоугольная матрица.

$$Q = \|q_{i,j}\|_{n \times m}; |X| = n; |U| = m,$$

строки которой соответствуют вершинам, а столбцы — ребрам. Элементы матрицы инциденций для смешанного графа могут получать одно из пяти различных значений, например:

$$q_{i,j} \begin{cases} a, & \text{если вершина } x_i \text{ является началом дуги } u_j; \\ b, & \text{если вершина } x_i \text{ является концом дуги } u_j; \\ c, & \text{если } u_j \text{ — звено, инцидентное вершине } x_i; \\ d, & \text{если } u_j \text{ — петля при вершине } x_i; \\ 0, & \text{если вершина } x_i \text{ и ребро } u_j \text{ не инцидентны.} \end{cases}$$

Матрица инциденций графа (см. рис. 8.3) будет иметь вид

$$Q = \begin{vmatrix} c & c & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b & a \\ c & c & c & d & a & a & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & b & 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c & a & a & b \end{vmatrix}.$$

Матрица смежности задает связь между вершинами $x_i, x_j \in X$. Таким образом, матрица смежности смешанного графа — это квадратная матрица размером $n \times n$, элементы которой определяются по правилу:

$$r_{i,j} = \begin{cases} \overset{\circ}{n}(x_i) d, & \text{если } i = j; \\ \vec{n}(x_i, x_j) a + \overleftarrow{n}(x_i, x_j) b + \tilde{n}(x_i, x_j) c, & \text{если } i \neq j, \end{cases}$$

где $\overset{\circ}{n}(x_i)$ — число петель при вершине x_i ; $\vec{n}(x_i, x_j)$ — число дуг, идущих из x_i в x_j ; $\overleftarrow{n}(x_i, x_j)$ — число дуг, идущих из x_j в x_i ; $\tilde{n}(x_i, x_j)$ — число звеньев, соединяющих вершины x_i и x_j .

Матрица смежности графа (см. рис. 8.3) будет

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 3c & 0 & a+b \\ 3c & d & 2a & c \\ 0 & 2b & 0 & b \\ a+b & c & a & 0 \end{vmatrix}.$$

Элементы матрицы смежности ориентированного и неориентированного графов без петель могут соответственно определяться по правилам:

$$r_{i,j} = \begin{cases} \vec{n}(x_i, x_j), & \text{если существуют дуги, идущие из } x_i \text{ в } x_j; \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases}$$

$$r_{i,j} = \begin{cases} \tilde{n}(x_i, x_j) & \text{если существуют звенья, соединяющие } x_i \text{ и } x_j; \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Матрица смежности неориентированного графа без кратных ребер совпадает с матрицей двуместного предиката связности, определенного на множестве X .

Аналитический способ задания графов. Этот способ основан на использовании понятия отображения. В соответствии с определением граф будет задан, если задано множество X и его в общем случае многозначное отображение в себя. Для смешанных графов образ каждой вершины x_i разобьем на два непересекающихся подмножества: $F^{+1}x_i \subseteq X$ — подмножество тех вершин $x_j \in X$, в которые заходят дуги из вершины x_i — прямое отображение; $Gx \subseteq X$ — подмножество тех вершин $x_j \in X$, с которыми вершину x_i связывают звенья или петли.

При таком задании граф обозначается $G = (X, F)$. Например, граф, показанный на рис. 8.6, а, этим способом будет задан множествами:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}; \\ F^{+1}x_1 &= \{x_2, x_5\}; \Gamma x_1 = \{x_2, x_5\}; F^{+1}x_2 = \{x_3\}; \Gamma x_2 = \{x_1, x_2\}; \\ F^{+1}x_3 &= \{x_4\}; \Gamma x_3 = \emptyset; F^{+1}x_4 = \{x_1, x_5\}; \Gamma x_4 = \emptyset; \\ F^{+1}x_5 &= \{x_4\}; \Gamma x_5 = \{x_1\}. \end{aligned}$$

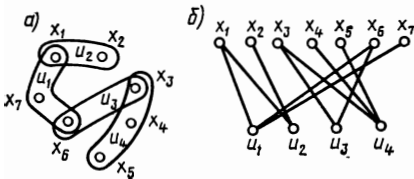


Рис. 8.7. Гиперграф (а) и его кенигово представление (б)

При аналитическом задании мультиграфов необходимо учитывать кратность ребер. Мультиграф будет задаваться множеством X и его отображением в множество кортежей над X . Тогда для смешанного мультиграфа: $F^{+1}x_i$ — кортеж, состоящий из тех вершин $x_j \in X$, в которые заходят дуги из вершины x_i (x_j могут повторяться в соответствии с кратностью дуг); Γx_i — кортеж, состоящий из тех $x_j \in X$, с которыми вершину x_i связывают звенья (x_j в кортеже повторяются в соответствии с кратностью звеньев).

Мультиграф (см. рис. 8.3) этим способом будет задан множествами:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; \\ F^{+1}x_1 &= \{x_4\}; \Gamma x_1 = \{x_2, x_2, x_2\}; \\ F^{+1}x_2 &= \{x_3, x_3\}; \Gamma x_2 = \{x_1, x_1, x_1, x_2, x_4\}; \\ F^{+1}x_3 &= \emptyset; \Gamma x_3 = \emptyset; \\ F^{+1}x_4 &= \{x_1, x_3\}; \Gamma x_4 = \{x_2\}. \end{aligned}$$

Используется также понятие обратного отображения $F^{-1}x_i$ — это подмножество тех вершин $x_j \in X$, из которых исходят дуги, заходящие в x_i . Например, множество вершин, смежных вершине x_i , определяется как $X' = F^{+1}x_i \cup F^{-1}x_i \cup \Gamma x_i$.

Гиперграфы и ультраграфы. Гиперграф можно определить как множество X , на элементах которого определен некоторый набор n -местных отношений. Тогда каждое ребро $u_j \in U$ гиперграфа — это некоторое подмножество $X_j \in X$, на котором соответствующий предикат набора имеет значение «истина». Гиперграф $H = (X, U)$ будет задан, если задано множество вершин X и определено множество его ребер U . При геометрическом представлении гиперграфа вершины изображаются кружками (точками), а ребра — в виде контуров, охватывающих входящие в них вершины. На рис. 8.7а показан гиперграф, множество вершин которого $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$, множество ребер $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, причем каждое ребро представляет собой следующее подмножество:

$$u_1 = \{x_1, x_6, x_7\}; u_2 = \{x_1, x_2\}; u_3 = \{x_3, x_6\}; u_4 = \{x_3, x_4, x_5\}.$$

Гиперграф может быть представлен в виде двудольного графа (графа Кенига) $G_H = (Y, V)$, где $Y = Y_1 \cup Y_2$, $Y_1 = X$, $Y_2 = U$, $Y_1 \cap Y_2 = \emptyset$; V — отношение инцидентности (обладающее свойством симметричности) между множествами X и U . Для гиперграфа (рис. 8.7, а) кенигово представление дано на рис. 8.7, б.

Гиперграф в форме $G_H = (Y, V)$ будет задан, если заданы множества X, U и многозначное отображение множества X в U или U в X . Аналитическое задание гиперграфа (рис. 8.7, а, б) будет представлено множествами: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$, $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ и одним из отображений: — X в U :

$$\begin{aligned} \Gamma x_1 &= \{u_1, u_2\}; \Gamma x_2 = \{u_2\}; \Gamma x_3 = \{u_3, u_4\}; \Gamma x_4 = \{u_4\}; \Gamma x_5 = \{u_4\}; \\ &\Gamma x_6 = \{u_1, u_3\}; \Gamma x_7 = \{u_1\} \end{aligned}$$

или — U в X :

$$\Gamma u_1 = \{x_1, x_6, x_7\}; \Gamma u_2 = \{x_1, x_2\}; \Gamma u_3 = \{x_3, x_6\}; \Gamma u_4 = \{x_3, x_4, x_5\}.$$

Матрица инцидентий гиперграфа $A_H = \|a_{i,j}\|_{n \times m}$ ($|X| = n$, $|U| = m$) задает инцидентность каждого элемента $x_i \in X$ ($i = 1, n$) соответствующему элементу $u_j \in U$ ($j = 1, m$). Элементы этой матрицы определяются по правилу:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \in \Gamma u_j; \\ 0, & \text{если } x_i \notin \Gamma u_j. \end{cases}$$

Матрица инцидентий гиперграфа (рис. 8.7) будет иметь вид

$$A_H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

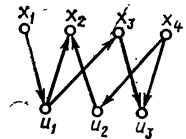


Рис. 8.8. Кенигово представление ультраграфа

Если между элементами $x_i \in X$ и $u_j \in U$ задать бинарные отношения инцидентности, приходим к понятию ультраграфа. Пример кенигова представления ультраграфа дан на рис. 8.8.

Аналитическое задание ультраграфа представляет собой множества X, U и многозначные (прямые) отображения X в U и U в X (образы вершин и ребер по бинарному отношению инцидентности). Ультраграф (рис. 8.8) этим способом будет описан следующими массивами:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; U = \{u_1, u_2, u_3\}; \\ F^{+1}x_1 &= \{u_1\}; F^{+1}x_2 = \emptyset; F^{+1}x_3 = \{u_3\}; F^{+1}x_4 = \{u_2, u_3\}; \\ F^{+1}u_1 &= \{x_2, x_3\}; F^{+1}u_2 = \{x_2\}; F^{+1}u_3 = \emptyset. \end{aligned}$$

Ультраграф можно задать также в виде множеств X, U и прямого и обратного отображения множества X в U или U в X . Обратным

отображением вершины $F^{-1}x_i$ будем называть множество ребер $U' \subseteq U$, для которых в кениговом представлении ультраграфа справедливо

$$(u_j, x_i) \in R, \quad j = \overline{1, m},$$

где R — бинарное отношение инцидентности.

Под *обратным отображением ребра* $F^{-1}u_j$ будем понимать множество вершин $X' \subseteq X$, для которых справедливо

$$(x_i, u_j) \in R, \quad i = \overline{1, n},$$

где R — то же, что и выше.

Ультраграф (рис. 8.8) этими двумя способами будет задан через отображения X в U :

$$F^{+1}x_1 = \{u_1\}; \quad F^{+1}x_2 = \emptyset; \quad F^{+1}x_3 = \{u_3\}; \quad F^{+1}x_4 = \{u_2, u_3\};$$

$$F^{-1}x_1 = \emptyset; \quad F^{-1}x_2 = \{u_1, u_2\}; \quad F^{-1}x_3 = \{u_1\}; \quad F^{-1}x_4 = \emptyset$$

или через отображения U в X :

$$F^{+1}u_1 = \{x_2, x_3\}; \quad F^{+1}u_2 = \{x_2\}; \quad F^{+1}u_3 = \emptyset;$$

$$F^{-1}u_1 = \{x_1\}; \quad F^{-1}u_2 = \{x_4\}; \quad F^{-1}u_3 = \{x_3, x_4\}.$$

Матричным способом ультраграф задается двумя матрицами: $\mathbf{A}'_u = \|\|a'_{i,j}\|\|_{n \times m}$ — матрица инцидентности вершины — ребра и $\mathbf{A}''_u = \|\|a''_{i,j}\|\|_{m \times n}$ — матрица инцидентности ребра — вершины, элементы которых определяются по правилам:

$$a'_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_j \in F^{+1}x_i; \\ 0, & \text{если } u_j \notin F^{+1}x_i, \end{cases} \quad a''_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_j \in F^{+1}u_i; \\ 0, & \text{если } x_j \notin F^{+1}u_i. \end{cases}$$

Для ультраграфа (рис. 8.8) матрицы будут иметь вид

$$\mathbf{A}'_u = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{array} \right\|; \quad \mathbf{A}''_u = \left\| \begin{array}{cccc} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|.$$

Ультраграф может быть задан одной матрицей $\mathbf{A}_u = \|\|a_{i,j}\|\|_{n \times m}$, если ее элементы определить по правилу

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_j \in F^{+1}x_i; \\ -1, & \text{если } u_j \in F^{-1}x_i; \\ 0, & \text{если } u_j \notin F^{+1}x_i \text{ \& } u_j \notin F^{-1}x_i. \end{cases}$$

Для ультраграфа (рис. 8.8) матрица

$$\mathbf{A}_u = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{array} \right\|.$$

В прикладных задачах широко используется понятие *взвешенного графа*. Множеству вершин и ребер графа или одному из них ставятся во взаимно однозначное соответствие некоторые множества, элементы которых содержательно являются какими-либо характеристиками соответственно вершин и ребер и называются *весами*.

§ 8.2. ИЗОМОРФИЗМ И ПЛАНАРНОСТЬ ГРАФОВ

Изоморфизм и изоморфное вложение графов. В общем случае графы $G = (X, U)$ и $H = (Y, V)$ будут изоморфными, если существует взаимно однозначное соответствие $X \leftrightarrow Y$, $U \leftrightarrow V$, такое, что при соответствии вершин $x_i, x_j \in X$ вершинам $y_k, y_l \in Y$ для всех ребер, соединяющих вершины x_i, x_j , существуют ребра такого же типа, соединяющие вершины y_k, y_l , или:

$$(\forall u_i (x_i, x_j) \in U) (\exists v_r (y_k, y_l) \in V) \\ (x_i \equiv y_k \ \& \ x_j \equiv y_l),$$

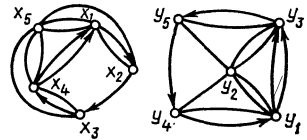


Рис. 8.9. Изоморфные смежные мультиграфы

где U — множество ребер, связывающих x_i и x_j ; V — множество ребер, связывающих y_k и y_l .

Другими словами, графы будут изоморфны, если один может быть получен из другого простой переиндексацией вершин и соединяющих их ребер. Отметим, что отношение изоморфизма является отношением эквивалентности. На рис. 8.9 показаны два изоморфных смежных мультиграфа.

Соответствие вершин X и Y устанавливается подстановкой

$$t = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ y_3 & y_5 & y_4 & y_1 & y_2 \end{pmatrix}.$$

Распознавание изоморфизма графов — достаточно сложная задача. Существует следующая теорема об изоморфизме двух ориентированных графов: для того чтобы граф G был изоморфен графу H , необходимо и достаточно выполнение следующих условий:

а) $(\forall x_i \in X) (\exists y_j \in Y) [(s(x_i) = s(y_j)) \ \& \ (p(x_i) = p(y_j))]$;

б) существует подстановка $t \in T$, такая, что G переводит в H . Здесь s, p — полустепени исхода и захода; T — симметрическая группа подстановок множества элементов, которая ставит во взаимно однозначное соответствие каждому элементу $x_i \in X$ графа G элемент $y_j \in Y$ графа H , такой, что $s(x_i) = s(y_j)$ и $p(x_i) = p(y_j)$.

Граф G изоморфно вкладывается в граф H , если G изоморфен какому-либо суграфу или подграфу $H' \subseteq H$. Граф G (рис. 8.10, а) изоморфно вкладывается в граф H (рис. 8.10, б), так как G изоморфен подграфу $H' \subseteq H$, показанному на рис. 8.10, в.

Соответствующая подстановка имеет вид

$$t = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ y_3 & y_7 & y_1 & y_2 & y_4 \end{pmatrix}.$$

Планарность графов. Связанный неориентированный граф называется *планарным*, если он изоморфен плоскому графу, т. е. может быть изображен на плоскости таким образом, что его ребра пересекаются только в вершинах. Планарность графа не изменяется при удалении петель и кратных ребер, при разбиении ребер посредством вве-

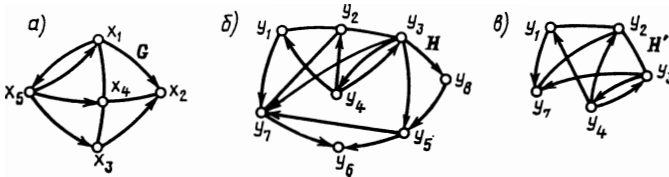


Рис. 8.10. К изоморфному вложению графов

дения новой вершины или стягивания в одно ребер, инцидентных вершине $x_i \in X$ с локальной степенью $\rho(x_i) = 2$, путем удаления этой вершины.

Графы, которые можно получать один из другого применением операции разбиения или стягивания ребер, называют *изоморфными* с точностью до вершин степени «2» (рис. 8.11, а).

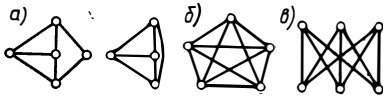


Рис. 8.11. Графы изоморфные с точностью до вершин степени «2» (а) и непланарные (б, в)

Перед определением планарности графа целесообразно выполнить над ними следующие преобразования: удалить петли и кратные ребра; стянуть ребра, инцидентные вершинам с $\rho(x_i) = 2$; разбить граф на компоненты связности путем удаления

ребер перешейков и разделения в расщепляющихся вершинах.

Теперь задача определения планарности графа и его плоского изображения сводится к исследованию каждой компоненты связности в отдельности. Граф без кратных ребер планарен, если

$$m \leq n + 2, \quad (8.7)$$

где $|U| = m$, $|X| = n$.

Верхнюю оценку числа ребер, при котором возможна планарность графа, имеющего гамильтонов цикл, получим из следующих рассуждений: внутри и вне гамильтонова цикла можно провести без пересечения не более $(n - 3)$ ребер, n ребер включает сам цикл, тогда

$$m = n + 2(n - 3) = 3(n - 2), \quad (8.8)$$

т. е. если $m > 3(n - 2)$ — граф непланарный. Для определения планарности графа, число ребер которого лежит в пределах $n + 2 < m < 3(n - 2)$, можно использовать критерий *Понтрягина—Ку-*

ратовского: граф планарен, если он не содержит подграфов, изоморфных с точностью до вершин степени «2» графам G_5 (полный пятивершинный, рис. 8.11, б) и $G_{3,3}$ (однородный двудольный степени «3», рис. 8.11, в).

Однако применение этого критерия требует большого перебора и на его основе нельзя сформулировать правила построения плоского графа. Определение планарности графа и поиск его плоской реализации может быть сделан методом *Бадера*. Над исходным графом $G = (X, U)$ выполняются указанные выше преобразования.

Определяется гамильтонов цикл каждого подграфа $G_i = (X_i, U_i)$. Ребра, не вошедшие в гамильтонов цикл, помещают в его внутреннюю или внешнюю область и строят для них граф пересечений $H = (Y, V)$. Вершины $y_k \in Y$ этого графа сопоставляются пересекающимся ребрам исследуемого подграфа. Ребро соединяет вершины y_k, y_j , если соответствующие им ребра подграфа G_i пересекаются. Исследуется, является ли граф H двудольным, если да, то граф G_i планарен. Вершины графа пересечений H разбиваются на два подмножества несмежных вершин, т. е. ребра графа G_i разделяются на два подмножества непересекающихся ребер, одно из которых помещается во внутреннюю область гамильтонова цикла, другое — во внешнюю.

На рис. 8.12, а показан граф $G = (X, U)$, который после удаления ребер, соединяющих вершины x_7 и x_{13} и расщепления в вершине x_3 разделяется на три подграфа G_1, G_2, G_3 . Плоская реализация подграфа G_1 очевидна (рис. 8.12, б). В подграфе G_2 гамильтонов цикл проходит через вершины $x_3, x_4, x_9, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_3$. Удалив петли и кратные ребра, поместим оставшиеся ребра подграфа G_2 во внутреннюю область гамильтонова цикла (рис. 8.13, а). Граф пересечений ребер подграфа G_2 показан на рис. 8.13, б. Нетрудно убедиться, что он двудольный. Плоское изображение подграфа показано на рис. 8.12, в.

В подграфе G_3 гамильтонов цикл проходит через вершины $x_{13}, x_{18}, x_{15}, x_{17}, x_{14}, x_{16}, x_{13}$. После его представления в виде самонепересекающейся кривой плоское изображение подграфа G_3 получим, поместив одно из ребер $(x_{13}, x_{17}), (x_{14}, x_{18})$ во внутреннюю, а второе во

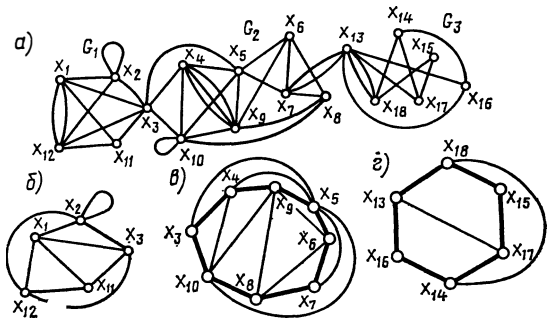


Рис. 8.12. Планарный граф (а) и/плоские изображения подграфов G_1 (б), G_2 (в) и G_3 (з)

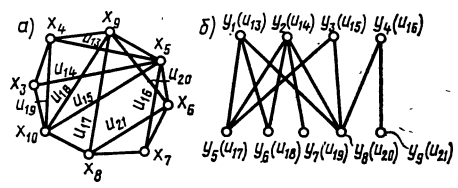


Рис. 8.13. Преобразование подграфа G_2 (а) в граф пересечений его ребер (б)

внешнюю область (рис. 8.12, з). Можно сделать вывод, что граф G — планарен.

В том случае, если граф $G = (X, U)$ непланарен, то может быть поставлена задача его разбиения на плоские суграфы. Минимальное число l плоских суграфов, на которые может быть разбит граф G , называется его *толщиной*. По графу пересечений $H = (Y, V)$ можно определить подмножество ребер $U' \subset U$, которые надо удалить из графа $G = (X, U)$, чтобы превратить его в плоский суграф $G_1 = (X, U_1)$, где $U_1 = U \setminus U'$. Количество таких ребер, т. е. $|U'|$, называется *числом планарности графа*. Если оставшийся суграф $G' = (X, U')$ не планарен, то из него опять выделяют плоский суграф и т. д., пока не будет получено разбиение графа G на l плоских суграфов $G_i = (X, U_i)$, причем $U = \bigcup_{i=1}^l U_i$.

§ 8.3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СХЕМ И МОНТАЖНОГО ПРОСТРАНСТВА

Основными исходными данными для схемно-топологических задач конструирования являются схема электрическая функциональная или принципиальная и параметры типовых конструкций. Возможность формальной постановки этих задач и качество их решения в значительной степени зависят от математических моделей схемы и монтажного пространства. В общем случае к математической модели необходимо предъявить следующие основные требования: информационная полнота, т. е. полнота отображения в модели свойств объекта, необходимых для решения задач конструкторского проектирования; высокая степень формализации отображаемого объекта; наличие математического аппарата, позволяющего выполнять формальные преобразования над моделью; однозначность и простота перехода от объекта к модели и обратно; возможность использования модели в существующих алгоритмах или возможность получения моделей, с которыми эти алгоритмы работают; наглядность представления объекта.

В наибольшей степени изложенным требованиям удовлетворяет граф, являющийся содержательной моделью объекта проектирования. Геометрическое задание графа наглядно представляет отображаемый объект, а матричный и аналитический способы — формально.

Для основных задач схемно-топологического конструирования (компоновка, размещение и трассировка) в модели должна быть отражена следующая информация о схеме: связанность элементов схемы с точностью до вывода с учетом направления распространения сигнала и фактора неизвестности соединений в пределах одного комплекса, т. е. электрической цепи; топологические свойства элементов, обуславливающие ограничения на построение соединений (порядок расположения выводов, возможность прохода соединений между ними и под элементом); метрические параметры элементов, т. е. их размеры, координаты и размеры полей контактов; сведения об инвариантности выводов.

Для различных задач этапа и алгоритмов их решения требуется различная информация об объекте конструирования. Например, при разрезании схемы на части и размещении элементов одного типоразме-

ра существенной является только информация о связанности элементов в смысле числа электрических связей между ними без учета различия между входами и выходами; при решении задач поиска повторяющихся частей схем и их идентификации необходимо задавать направление связей между элементами с точностью до контактов этих элементов; при решении задачи трассировки для определения планарности схем и числа пересечений основными являются топологические свойства элементов.

В связи с этим возможно использование моделей, несущих только ту часть информации о схеме, которая необходима для решения данной задачи конкретным алгоритмом. При переходе от схемы к графу должна быть обеспечена адекватность модели и объекта в смысле отображения этой информации.

Рассмотрим два основных способа перехода от схемы к графу: элементам схемы или их выводам (в зависимости от требуемой степени детализации отображения схемы) ставятся во взаимно однозначное соответствие вершины графа, а связи между ними представляются ребрами. Получаем модель схемы в виде неориентированного или ориентированного обыкновенного графа (мультиграфа); каждому выводу или элементу схемы ставится во взаимно однозначное соответствие вершина гиперграфа (ультраграфа, если необходимо учитывать направление распространения сигнала), тогда каждое ребро гиперграфа (ультраграфа) соответствует электрической цепи, соединяющей эти элементы или их выводы.

При первом способе перехода от схемы к графу важным является представление электрической цепи ребрами графа, так как электрическая цепь обычно связывает более двух выводов элементов схемы.

Представление схемы неориентированным мультиграфом. В этом случае, чтобы задать информацию о связанности элементов или их выводов, каждая цепь (комплекс) интерпретируется полным подграфом, что приводит к появлению избыточных ребер. Количество вершин подграфа определяется числом элементов или выводов, соединяемых данной цепью. При этом учитывается фактор неизвестности соединения, так как покрывающие деревья, построенные на полном подграфе, соответствуют возможным вариантам соединения элементов данной цепью. Модель схемы получается объединением полных подграфов. При такой интерпретации часто применяется вероятностный подход — каждому ребру $u_i \in U$ полного подграфа присваивается вес

$$p_i = 1/(k - 1), \quad (8.9)$$

где k — количество вершин полного подграфа.

Модель схемы (рис. 8.14, *а*) при сопоставлении элементам схемы вершин графа представлена на рис. 8.14, *б*. Введение избыточных ребер может сделать граф непланарным, хотя интерпретируемая им схема — планарна. По данному графу нельзя получить правильную оценку числа электрических связей между частями схемы. Например, количество ребер, попадающих в разрез между кусками G_1 и G_2 графа G (рис. 8.14, *б*, $X_1 = \{x_1, x_3\}$, $X_2 = \{x_2, x_4\}$), равно четырем (для вероятностного графа сумма весов ребер равна $4/3$), в то время как в

схеме в этом случае разрезается одна цепь. Однако при такой модели схемы между этими показателями существует сильная корреляционная связь, так что оптимизация одного приводит, как правило, к оптимизации другого (см. [17]).

При сопоставлении выводов элементов вершин графа граф схемы (см. рис. 8.14, а) распадается на отдельные компоненты связности (рис. 8.15, а), количество которых определяется числом электрических цепей схемы. Объединяя эти компоненты связности в соответствии с принадлежностью выводов элементам схемы, получим рассмотренную выше модель.

Модель схемы, полученная объединением полных подграфов, может использоваться для решения задач размещения элементов (ин-

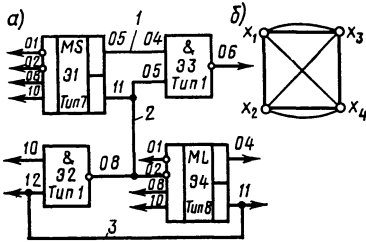


Рис. 8.14. Фрагмент принципиальной электрической схемы (а) и ее граф (б)

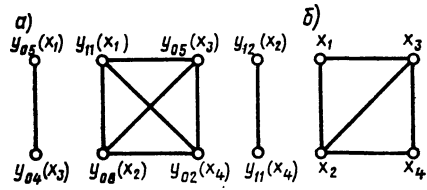


Рис. 8.15. Графы схемы, показанной на рис. 8.14, а, при сопоставлении вершин графа выводам (а) и при представлении цепей фиксированными деревьями (б)

формация о метрических параметрах элементов может учитываться в весовых характеристиках вершин) и компоновки алгоритмами, в которых определяющим является фактор связности. Модель схемы в виде отдельных компонентов связности несет информацию о соединяемых выводах элементов для задачи трассировки.

Электрическая цепь может быть представлена фиксированным деревом (рис. 8.15, б). В этом случае исключаются избыточные ребра, однако не учитывается фактор неизвестности соединений и неверно отражается связность элементов схемы, так как любые две несмежные вершины дерева не связаны между собой, в то время как в схеме между соответствующими элементами существует электрическая связь. Такая модель может быть использована для решения топологических задач трассировки, если нет ограничений на проведение соединений под элементами и между их контактами.

Модель схемы в виде ориентированного мультиграфа. Такое представление схемы используется для задач, в которых необходимо учитывать направления связей между элементами. В этих задачах точная оценка числа линий связи между элементами или частями схемы не существенна. В данном случае, чтобы определить, что сигнал с выхода одного элемента поступает на вход другого, используется следующий способ представления электрических цепей дугами ориентированного графа: каждая цепь, соединяющая выходы n источников сигналов с

входами m приемников интерпретируется двудольным ориентированным подграфом, таким, что

$$(\forall x_i \in X_1, \forall x_j \in X_2) \exists u = (x_i x_j); X = X_1 \cup X_2; X_1 \cap X_2 = \emptyset,$$

где X_1 — множество вершин источников сигналов ($|X_1| = n$); X_2 — множество вершин приемников сигналов ($|X_2| = m$), т. е. каждая вершина, поставленная в соответствие элементу—источнику сигнала для данной цепи, соединена дугой с каждой вершиной, соответствующей элементу—приемнику сигнала.

При таком способе представления цепей также появляются избыточные ребра. Модель схемы получается объединением двудольных ориентированных графов. Логическая функция элемента схемы может быть задана в качестве весовой характеристики соответствующей вершины графа. Граф схемы (см. рис. 8.14, а) показан на рис. 8.16, а. В этом графе весовая характеристика, например, вершины x_1 равна семи, т. е. определяется типом элемента Э1. Модель не отображает схему с точностью до вывода элемента, поэтому является корректной

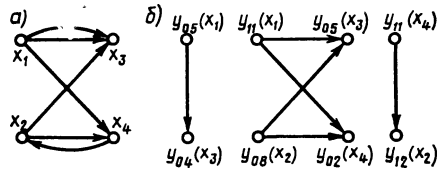


Рис. 8.16. Ориентированные графы схемы, изображенной на рис. 8.14, а

для схем, реализованных на элементах с одним выходом и равнозначными входами. Корректность модели для схем, построенных на элементах с неравнозначными входами и выходами, может быть обеспечена введением весов ребер. Вес каждого ребра представляет собой упорядоченную пару, первый элемент которой характеризует выход элемента-источника, а второй — вход элемента-приемника (в простейшем случае пару составляют номера выводов этих элементов). Данная модель предназначена для решения частных задач компоновки (поиск повторяющихся частей схем, установление идентичности схем).

Идентификация с точностью до выводов элементов схем может быть получена также при сопоставлении выводов вершинам графа (рис. 8.16, б). Граф схема распадается на l компонент связности, где l — число электрических цепей схемы.

Представление схемы гиперграфом и ультраграфом. Рассмотрим модель в виде гиперграфа, когда множество элементов схемы соответствует множеству вершин X , а множество электрических цепей—множеству ребер U ($|X| = n$ — число элементов в схеме; $|U| = m$ — число электрических цепей схемы).

Каждое ребро гиперграфа U_k представляется подмножеством тех вершин $X_k \subseteq X$, соответствующие которым элементы соединены k -й электрической цепью.

При задании схемы гиперграфом учитывается фактор неизвестности соединения, так как для того чтобы определить, соединены ли i -й и j -й элементы схемы k -й электрической цепью, достаточно проверить условие $x_i, x_j \in X_k$. Так как один элемент схемы может при-

надлежать разным цепям, то в общем случае

$$X_k \cap X_l \neq \emptyset (k, l \in K = \overline{1, m}).$$

Количество связей между некоторым подмножеством X' вершин гиперграфа и его дополнением $X \setminus X'$ подсчитывается как число ребер $U_k \equiv X_k$, для которых выполняется условие:

$$\exists x_i, x_j \in X_k (x_i \in X' \text{ \& } x_j \in X \setminus X'); \quad (8.10)$$

$$i, j \in J = \overline{1, n}; k \in K = \overline{1, m}.$$

Отсюда видно, что по гиперграфу можно точно оценить число электрических соединений между частями или элементами схемы. Например, схема, данная на рис. 8.14, а, интерпретируется гиперграфом, показанным на рис. 8.17. Множество вершин этого гиперграфа $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, множество ребер $U_1 \equiv X_1 = \{x_1, x_3\}$; $U_2 \equiv X_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$; $U_3 \equiv X_3 = \{x_2, x_4\}$.

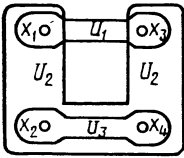


Рис. 8.17. Гиперграф схемы, данной на рис. 8.14, а

Число электрических цепей, соединяющих элементы 1 и 3 с остальными, будет равно единице. Подсчет числа ребер гиперграфа, для которых выполняется условие (8.10) при $X' = \{x_1, x_3\}$, дает такое же значение. При матричном представлении модели схемы в виде гиперграфа принадлежность

i -го элемента схемы j -й электрической цепи с точностью до вывода элемента может быть задана, если элементы матрицы определять по правилу:

$$t'_{i,j} = \begin{cases} k_i, & \text{если } x_i \in \Gamma u_j; \\ 0, & \text{если } x_i \notin \Gamma u_j, \end{cases}$$

где k_i — номер вывода i -го элемента схемы.

Такая матрица для схемы, изображенной на рис. 8.14, а будет иметь вид

$$T' = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 5 & 11 & 0 \\ 0 & 8 & 12 \\ 4 & 5 & 0 \\ 0 & 2 & 11 \end{matrix} \right\| \end{matrix}.$$

Идентификация с точностью до вывода при аналитическом представлении гиперграфа может быть обеспечена присваиванием весов, характеризующих эти выводы, вершинам, входящим в ребра. Рассматриваемый гиперграф будет представлен следующими массивами:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; U = \{u_1, u_2, u_3\};$$

$$u_1 = \{x_1, x_3\}; u_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; u_3 = \{x_2, x_4\};$$

$$k_1 = \{5, 4\}; k_2 = \{11, 8, 5, 2\}; k_3 = \{12, 11\},$$

причем u_j поставлено во взаимно однозначное соответствие k_j .

Из гиперграфа с помощью соответствующих преобразований (см. [17]) может быть получена модель схемы в виде неориентированного мультиграфа.

При представлении схемы ультраграфом множеству элементов схемы ставится во взаимно однозначное соответствие множество вершин X , а множеству электрических цепей — множество ребер U . Направление передачи сигналов в такой модели схемы задается следующим образом: пусть i -й элемент схемы принадлежит j -й цепи, тогда бинарное отношение инцидентности задано на паре (x_i, u_j) , если x_i сопоставлено элементу — источнику сигнала, и (u_j, x_i) — если x_i интерпретирует элемент — приемник сигнала. Кенигово представление ультраграфа — модели схемы, показанной на рис. 8.14, а, дано на рис. 8.18.

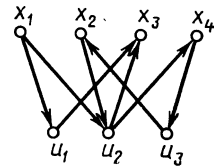


Рис. 8.18. Кенигово представление ультраграфа схемы рис. 8.14, а

Отображение схемы с точностью до выводов элементов может быть обеспечено введением весов, характеризующих эти выводы. Например, при задании ультраграфа в виде множеств X , U и отображения U в X весами вершин, входящих в $F^{+1}u_j$ и $F^{-1}u_j$, могут быть номера контактов элементов, сопоставленных этим вершинам. Тогда данная схема будет описана следующими массивами:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4\}; U = \{u_1, u_2, u_3\}; \\ F^{+1} u_1 &= \{x_3\}; F^{+1} u_2 = \{x_3, x_4\}; F^{+1} u_3 = \{x_2\}; \\ K^{+1} u_1 &= \{4\}; K^{+1} u_2 = \{5, 2\}; K^{+1} u_3 = \{12\}; \\ F^{-1} u_1 &= \{x_1\}; F^{-1} u_2 = \{x_1, x_2\}; F^{-1} u_3 = \{x_4\}; \\ K^{-1} u_1 &= \{5\}; K^{-1} u_2 = \{11, 8\}; K^{-1} u_3 = \{11\}. \end{aligned}$$

При матричном представлении элементы матрицы можно определить по правилу

$$t_{i,j} = \begin{cases} k_i, & \text{если } u_j \in F^{+1} x_i; \\ -k_i, & \text{если } u_j \in F^{-1} x_i; \\ 0, & \text{если } u_j \notin F^{+1} x_i \text{ \& } u_j \notin F^{-1} x_i. \end{cases}$$

Такая матрица для схемы, изображенной на рис. 8.14, а, будет иметь вид

$$T_u = \left\| \begin{array}{ccc} 5 & 11 & 0 \\ 0 & 8 & -12 \\ -4 & -5 & 0 \\ 0 & -2 & 11 \end{array} \right\|.$$

Ультраграф, так же как и гиперграф, учитывает фактор неизвестности соединений и позволяет точно оценить число электрических соединений.

Для всех рассмотренных моделей не выполняется требование информационной полноты. В наибольшей степени оно удовлетворяется при представлении схемы ультраграфом при наличии дополнительных

сведений о конструктивно-технологических характеристиках элементов и их логических функциях. При интерпретации элементов схемы вершинами графа эти сведения для всех моделей могут быть заданы в виде весовых характеристик вершин. Топологические свойства элементов схемы не отображены ни в одной из рассмотренных моделей.

При представлении схемы в виде неориентированного мультиграфа и гиперграфа не удовлетворяется требование однозначности перехода от модели к схеме.

Теория неориентированных и ориентированных графов развита достаточно хорошо. Разработано большое количество алгоритмов решения задач схемно-топологического конструирования методами теории графов. Аппарат теории гиперграфов и ультраграфов в настоящее время только развивается.

Математические модели монтажного пространства. Под *монтажной областью типовой конструкции* понимается метрическое пространство, в котором устанавливаются входящие в нее типовые конструкции предыдущих уровней и выполняется электрическое соединение их выводов. Формальная постановка и решение задач топологического конструирования невозможно без получения математической модели монтажного пространства. К математической модели монтажного пространства предъявляются требования высокой степени формализации и наиболее полного и точного отображения метрических параметров и топологических свойств конструкции.

Метрическими параметрами являются габаритные размеры зоны монтажа, допустимая ширина проводников и зазора между ними, координаты и размеры внешних монтажных площадок, шаг установки и размеры модулей, координаты и размеры полей их контактов. К топологическим свойствам относятся число слоев МПП и переходов со слоя на слой, наличие замкнутых областей, запрещенных для проведения соединений (например, из-за невозможности прокладки трасс между выводами и под микросхемами), ограничения на взаимное расположение соединений в монтажной области и на количество монтажных проводов, подводимых к одному выводу.

Монтажное пространство типовой конструкции обычно имеет прямоугольную форму. Для типовой конструкции, начиная с субблока и выше, характерно регулярное монтажное пространство, которое в наибольшей степени удовлетворяет требованию конструктивно-технологической унификации. Позиции установки типовых конструкций предыдущего ранга фиксированы и имеют постоянный шаг. При разработке топологии ИС и БИС, и проектировании субблока на разногабаритных элементах нельзя заранее зафиксировать позиции для размещения элементов. Монтажное пространство в этом случае является нерегулярным.

В качестве математической модели монтажного пространства используется неориентированный топологический граф (граф решетки) G_T . Плоскость монтажного пространства разбивается на элементарные площадки, стороны которых равны шагу проложения проводника по соответствующему направлению (для печатного монтажа элементарная площадка — квадрат). Каждой элементарной площадке ставится

в соответствие вершина графа решётки. Две вершины соединены ребром, если между соответствующими элементарными площадками может быть проведено соединение с учетом метрических и топологических параметров типовых конструкций, устанавливаемых в данном монтажном пространстве. Модель монтажного пространства фрагмента верхнего слоя печатной платы (рис. 8.19, а) с ортогональным монтажом при запрещении проведения проводников под микросхемами показана на рис. 8.19, б. Если проводники разрешается проводить под углом 45° , каждой вершине может быть инцидентно восемь ребер (рис. 8.20, а). Фрагмент математической модели монтажного пространства многослойной печатной платы показан на рис. 8.20, б, где вертикальные ребра интерпретируют межслойные переходы. Из множества вершин этого графа можно выделить следующие подмножества: вершины, сопоставленные контактным площадкам выводов модулей (такие вершины обозначены кружками), вершины, представляющие внешние выводы типовой конструкции, и вершины, интерпретирующие контактные площадки межслойных переходов (такие вершины обозначены заштрихованными кружками).

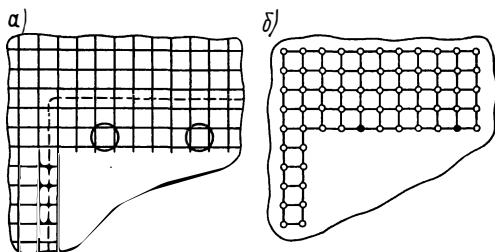


Рис. 8.19. Фрагмент верхнего слоя печатной платы (а), модель его монтажной плоскости (б)

Из множества вершин этого графа можно выделить следующие подмножества: вершины, сопоставленные контактным площадкам выводов модулей (такие вершины обозначены кружками), вершины, представляющие внешние выводы типовой конструкции, и вершины, интерпретирующие контактные площадки межслойных переходов (такие вершины обозначены заштрихованными кружками).

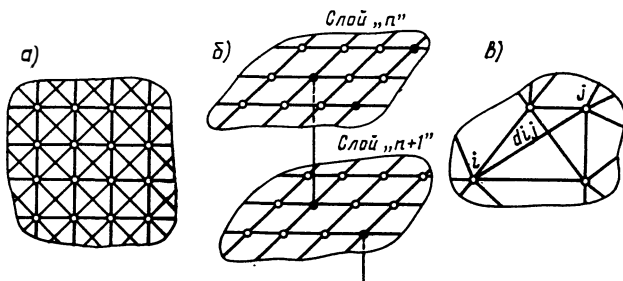


Рис. 8.20. Фрагменты графа трасс

В случае выполнения соединений монтажными проводами в любом направлении вершины графа решетки сопоставляются выводам конструктивного элемента (микросхемы, разъема, соединительной платы и т. п.). Варианты различных соединений представляются полным графом, построенным на этих вершинах (рис. 8.20, в). В конкретной реализации соединений необходимо учитывать ограничения на число проводников, подводимых к одному контакту.

Расстояние между i -м и j -м узлами графа решетки в общем случае будет

$$d_{i,j} = (|S_i - S_j|^k + |t_i - t_j|^k)^h; \quad i, j = \overline{1, m}; \quad (8.11)$$

$$k = (1; 2); \quad h = (0,5; 1),$$

где m — число узлов графа решетки.

При ортогональной трассировке $k = h = 1$, выражение (8.11) принимает вид

$$d_{i,j} = |S_i - S_j| + |t_i - t_j|. \quad (8.12)$$

Для регулярного монтажного пространства в качестве модели поля размещения может быть использован граф решетки, вершины ко-

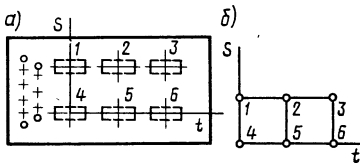


Рис. 8.21. Плата субблока (а) и модель поля размещения (б)

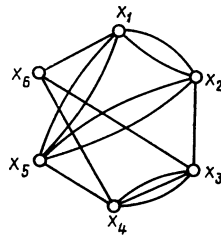


Рис. 8.22. Граф схемы соединения модулей

торого сопоставлены установочным позициям типовых конструкций предыдущего уровня. Граф решетки для платы, показанной на рис. 8.21, а, изображен на рис. 8.21, б. Приближенный подсчет суммарной длины соединений между модулями может быть выполнен следующим образом (см. [10]). Пусть моделью схемы соединений является неориентированный мультиграф G (рис. 8.22), а моделью платы — граф решетки G_r . Для графа G , отображенного в решетку G_r (вершины графа G располагаются в узлах решетки G_r), строится матрица расстояний D_r , элементы которой подсчитываются по (8.12). Если шаги установки модулей по осям S и t равны, расстояния между соседними узлами решетки принимаются равными единице. Матрица расстояний графа (см. рис. 8.21, б) имеет вид

$$D_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Суммарная длина ребер графа G , отображенного в решетку G_r , определяется как полусумма элементов матрицы геометрии D_y . Для получения матрицы геометрии D_y необходимо выполнить поэлементное умножение матрицы D_r и матрицы смежности R графа G . Матрицы смежности и геометрии рассматриваемого графа соответственно будут

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad D_y = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 4 & 3 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 9 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для данного случая суммарная длина ребер $L(G) = 25$.

$$N_i = \sum_{j \in I} x_{i,j}$$

9

КОМПОНОВКА ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

§ 9.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОМПОНОВКИ. КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Содержательно задача компоновки заключается в определении схемного состава типовых конструкций каждого уровня. Эта задача обычно решается «снизу—вверх», т. е. известна схема соединения элементов i — 1-го уровня, необходимо распределить их по типовым конструкциям следующего i -го уровня. Можно выделить два варианта постановки этой задачи: компоновка схем в типовые конструкции, не имеющие схемной унификации; компоновка схем в модули заданного схемно-унифицированного набора.

Компоновка схем в конструктивно унифицированные модули i -го уровня сводится к разрезанию схемы соединения элементов i — 1-го уровня на части заданного размера, например схемы электрической принципиальной устройства на типовые элементы замены. Эта задача характерна для типовых конструкций, начиная с уровня субблоков.

Компоновка схем в схемно-унифицированные типовые конструкции называется *покрытием*. Примером ее может служить задача перехода от схемы электрической функциональной к схеме электрической принципиальной, реализованной на наборе ИС, СИС и БИС. Покрытие — более сложная задача, чем разрезание, особенно в тех случаях, когда модули набора состоят из связанных элементов. Основной проблемой здесь является установление идентичности модуля и некоторой части схемы (подсхемы).

В качестве критериев оптимизации при решении задачи компоновки могут быть использованы следующие: 1. Минимум суммарного числа модулей, необходимых для реализации схемы (критерий связан с избыточностью реализации):

$$N_i = \sum_{j \in I} x_{i,j},$$

где $x_{i,j}$ — число модулей j -го типа i -го уровня, полученное в результате компоновки схемы.

2. Минимум числа типов используемых (скомпонованных) модулей или максимум коэффициента их повторяемости. Коэффициент повторяемости

$$k_{\text{повт}} = 1 - nm/N_{i-1},$$

где n — число типов модулей; m — число элементов i — 1-го уровня в модуле (типовой конструкции); N_{i-1} — общее количество элементов i — 1-го уровня в схеме.

3. Минимальная избыточность в реализации

$$\Delta m_i = \sum_{k=1}^{N_i} \Delta m_{i,k},$$

где $\Delta m_{i,k}$ — число неиспользованных элементов в каждом модуле i -го уровня.

4. Минимум межмодульных соединений

$$R_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_i} R_{i,k}$$

($R_{i,k}$ — число внешних связей каждого модуля i -го уровня) или минимум суммарного числа внешних выводов всех модулей

$$S_i = \sum_{k=1}^{N_i} S_{i,k}$$

($S_{i,k}$ — число внешних выводов каждого модуля i -го уровня).

Критерии 1—3 непосредственно связаны с конструкторскими характеристиками аппаратуры и показателем стоимости. Критерий 4 ведет к повышению надежности конструктивной реализации схемы за счет сокращения числа разъемных соединений, уменьшению помех и задержек сигналов благодаря снижению суммарной длины соединений. Использование того или иного критерия зависит как от вида задачи компоновки (разрезание или покрытие), так и от уровня иерархии. Например, при покрытии схемы электрической функциональной заданным набором ИС критерий 2 не является определяющим, в то время как при покрытии схемы устройства некоторым набором ТЭЗ этот критерий имеет важное значение.

Особенности конструкторско-технологической базы и схемотехнические требования накладывают на компоновку ряд ограничений. Основными из них являются число элементов в типовой конструкции каждого уровня и число их выводов, а также требование на совместную или отдельную компоновку в одной типовой конструкции определенных элементов предыдущего уровня, связанное с обеспечением нормального теплового режима, помехозащищенности и простоты диагностики. При компоновке БИС основное ограничение — площадь, отведенная под схему, а критерий компоновки — минимум числа внешних выводов.

Существующие алгоритмы компоновки можно условно разделить на следующие классы (см. [10]): алгоритмы, использующие методы целочисленного программирования; последовательные алгоритмы формирования состава типовой конструкции; итерационные алгоритмы последовательного улучшения приближенного решения; смешанные алгоритмы.

В точной постановке задача компоновки может быть сформулирована как задача нелинейного целочисленного программирования (см. [1]). Пусть схема состоит из множества $E = \{e_i / i = \overline{1, N}\}$ элемен-

тов, которые соединены множеством $T = \{t_j/j = \overline{1, M}\}$ цепей. Зададим схему матрицей инцидентности элементы — цепи:

$$A = \|a_{i,j}\|_{N \times M}, \text{ элемент которой}$$

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент } e_i \text{ входит в цепь } t_j; \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Необходимо сконструировать схему в L подсхем (модулей), каждая из которых должна иметь не более m_l элементов и k_l внешних выводов.

Так как каждый элемент схемы может входить только в одну типовую конструкцию, задача ставится следующим образом: необходимо разбить множество E на L подмножеств таким образом, чтобы достигался, например, минимум межмодульных соединений или суммарного числа внешних выводов всех подсхем.

Решением задачи должна быть матрица $X = \|x_{i,l}\|_{N \times L}$, элемент которой

$$x_{i,l} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент } e_i \text{ входит в } l\text{-ю подсхему;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

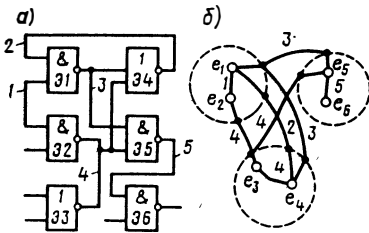


Рис. 9.1. Фрагмент схемы (а) и ее компоновка в три модуля (б)

Количество элементов l -й подсхемы определяется как $\sum_{i=1}^N x_{i,l}$. Введем целочисленную переменную:

$$y_{j,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я цепь соединяет элементы } l\text{-й и какой-нибудь другой подсхемы;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда количество внешних выводов l -й подсхемы $\sum_{j=1}^M y_{j,l}$.

Суммарное количество внешних выводов всех подсхем

$$S = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^M y_{j,l} \quad (9.1)$$

число межмодульных соединений

$$R = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{l=1}^L y_{j,l} - 1 \right) \quad (9.2)$$

Из (9.1) и (9.2) видно, что уменьшение показателя S ведет к уменьшению R и наоборот, а при разбиении схемы на две части $S = 2R$.

На рис. 9.1 показан фрагмент схемы (внешние соединения для простоты не указаны) и условное изображение ее компоновки в три моду-

ля. Матрицы \mathbf{A} , \mathbf{X} , \mathbf{Y} для этого примера будут иметь вид:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{Y} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

а показатели $S = 8$, $R = 5$.

Можно показать, что

$$y_{j, l} = \left[\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} x_{i, l} \right] \left[\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} (1 - x_{i, l}) \right]. \quad (9.3)$$

Теперь с учетом (9.1)—(9.3) задача компоновки формулируется как задача нелинейного целочисленного программирования: найти значения элементов матрицы \mathbf{X} , при которых обеспечивался бы

$$\min S = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^M \left(\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} x_{i, l} \right) \left(\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} (1 - x_{i, l}) \right)$$

или

$$\min R = \sum_{j=1}^M \left[\sum_{l=1}^L \left(\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} x_{i, l} \right) \left(\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} (1 - x_{i, l}) \right) - 1 \right]$$

при ограничениях: на количество элементов в подсхеме

$$\sum_{i=1}^N x_{i, l} \leq m_l;$$

на количество выводов подсхем

$$\sum_{j=1}^M \left[\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} x_{i, l} \right] \left[\bigvee_{i=1}^N a_{i, j} (1 - x_{i, l}) \right] \leq k_l.$$

Решение задачи компоновки в такой постановке для реальных схем не представляется возможным даже на современных ЭВМ (см. [1]). Понимание математической сущности задачи помогает разрабатывать эффективные приближенные алгоритмы.

При представлении схемы неориентированным мультиграфом, в котором вершины сопоставлены элементам схемы, а ребра — межэлементным соединениям, задача компоновки схемы в типовые конструкции, не имеющие схемной унификации, ставится как задача разрезания графа $G = (X, U)$ на совокупность кусков $G_l = (X_l, U_l)$, $l \in L = 1, \bar{L}_k$, где L_k — число типовых конструкций (см. [10]). Со-

вокупность кусков $B(G_l)$ называется *разрезанием графа* $G = (X, U)$, если

$$\begin{aligned} & (\forall G_l \in B(G_l)) (G_l \neq \emptyset); l \in L; \\ & (\forall G_l, G_p \in B(G_l)) (X_l \cap X_p = \emptyset \ \& \ U_l \cap U_p = U_{l,p}); l, p \in L; \\ & \bigcup_{l \in L} G_l = G, \end{aligned}$$

где $U_{l,p}$ — множество ребер, попадающих в разрез между кусками G_l и G_p .

При использовании в качестве критерия компоновки минимума междомодульных соединений разрезание будет оптимальным, если

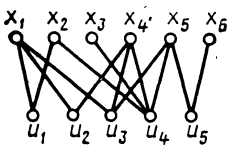


Рис. 9.2. Кенигово представление гиперграфа схемы, изображенной на рис. 9.1

$$(\forall G_l \in B(G_l)) \left(\left| \bigcup_{\substack{p \in L \\ p \neq l}} U_{l,p} \right| \right) = \min. \quad (9.4)$$

В § 8.3 было показано, что модель схемы в виде неориентированного мультиграфа не позволяет получить точную оценку числа электрических связей между частями схемы. Точная оценка может быть сделана при использовании в качестве модели схемы гиперграфа $G = (X, U)$, в котором множество вершин X сопоставлено элементам схемы, а множество ребер U представляет цепи схемы.

Задача компоновки схемы в « L_k » типовых конструкций ставится как задача разбиения множества X на « L_k » подмножеств $X_l, l = \overline{1, L_k}$ так, чтобы оптимизировать некоторую целевую функцию.

Рассмотрим оценку показателя S суммарного числа внешних выводов частей схемы по ее гиперграфу $G = (X, U)$. Пусть гиперграф задан в виде множества вершин $X = \{x_i / i = \overline{1, N}\}$, множества ребер $U = \{u_j / j = \overline{1, M}\}$ и многозначного отображения X в U — $\Gamma X = \{\Gamma x_i / i = \overline{1, N}\}$, причем $\Gamma x_i = U_i \subseteq U$ — множество ребер, содержащих вершину x_i . Количество внешних выводов s_l l -й части схемы определяется как число ребер u_j , содержащих хотя бы по одной вершине из X_l и X_p , т. е.

$$s_l = \left| \bigcup_{p \in L} \Gamma X_l \cap \Gamma X_p \right|; l \in L = \overline{1, L_k}; l \neq p. \quad (9.5)$$

Тогда суммарное количество внешних выводов

$$S = \sum_{i=1}^{L_k} s_i. \quad (9.6)$$

Например, для гиперграфа (рис. 9.2) схемы, показанной на рис. 9.1:

$$\begin{aligned} X &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, (x \leftrightarrow e); U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}; \Gamma x_1 = \\ &= \{u_1, u_2, u_3\}; \Gamma x_2 = \{u_1, u_4\}; \Gamma x_3 = \{u_4\}; \Gamma x_4 = \{u_2, u_3, u_4\}; \\ &\Gamma x_5 = \{u_3, u_4, u_5\}; \Gamma x_6 = \{u_5\}. \end{aligned}$$

Для компоновки схемы в три узла, как показано на рис. 9.1, б: $X_1 = \{x_1, x_2\}$; $X_2 = \{x_3, x_4\}$; $X_3 = \{x_5, x_6\}$. Тогда $\Gamma X_1 = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$; $\Gamma X_2 = \{u_2, u_3, u_4\}$; $\Gamma X_3 = \{u_3, u_4, u_5\}$.

На основании (9.5) число внешних выводов частей схемы будет:

$$s_1 = |\Gamma X_1 \cap \Gamma X_2 \cup \Gamma X_1 \cap \Gamma X_3| = |\{u_2, u_3, u_4\} \cup \{u_3, u_4\}| = \\ = |\{u_2, u_3, u_4\}| = 3;$$

$$s_2 = |\Gamma X_2 \cap \Gamma X_1 \cup \Gamma X_2 \cap \Gamma X_3| = |\{u_2, u_3, u_4\} \cup \{u_3, u_4\}| = \\ = |\{u_2, u_3, u_4\}| = 3;$$

$$s_3 = |\Gamma X_3 \cap \Gamma X_1 \cup \Gamma X_3 \cap \Gamma X_2| = |\{u_3, u_4\} \cup \{u_3, u_4\}| = \\ = |\{u_3, u_4\}| = 2; S = \sum_{i=1}^3 s_i = 8.$$

Задача компоновки схемы формулируется следующим образом: необходимо разбить множество X вершин гиперграфа на « L_k » непересекающихся подмножеств X_l , $l = \overline{1, L_k}$ таким образом, чтобы обеспечивался

$$\min S = \sum_{l=1}^{L_k} \left| \bigcup_{p \in L} \Gamma X_l \cap \Gamma X_p \right|; l \in L = \overline{1, L_k}; l \neq p,$$

причем по определению разбиения множества

$$X_l \neq \emptyset, X_l \cap X_p = \emptyset, \bigcup_{l \in L} X_l = X.$$

Точное решение задачи компоновки в приведенных постановках возможно лишь методом полного перебора. Практическое применение находят последовательные, итерационные и смешанные алгоритмы.

§ 9.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАЗБИЕНИЯ СХЕМ

Идея последовательных алгоритмов компоновки по связности заключается в следующем: выбирается некоторый исходный элемент схемы, из которого сначала и состоит формируемый узел. Далее к узлу присоединяется один или группа элементов, их выбор осуществляется по правилу, учитывающему связность элементов узла с элементами, еще не включенными в него. Процедура продолжается до тех пор, пока выполняется ограничение по числу элементов или числу внешних выводов. Формирование узлов может быть продолжено по принципу последовательного выделения: сформированный узел удаляется из схемы, последовательным алгоритмом формируется новый узел. Процесс повторяется до тех пор, пока схема не будет разбита на требуемое число частей или не будет выяснена невозможность этого. Выбор начального элемента основывается на схмотехнических соображениях (некоторые элементы могут быть заранее назначены в определенные субблоки).

В качестве критерия, по которому выбирается очередной элемент, обычно используется максимум его связей с элементами, уже включенными в подсхему. Если таких элементов несколько, предпочтение отдается элементу, имеющему минимум связей с элементами, не вошедшими в формируемый узел (принцип максимальной конъюнкции — минимальной дизъюнкции).

Последовательный алгоритм разрезания мультиграфа схемы. Очередную вершину выбирают (см. [10]) по минимуму относительного веса:

$$\delta(x_q) = \rho(x_q) - a(x_q), \quad (9.7)$$

где $\rho(x_q)$ — локальная степень вершины x_q ; $a(x_q)$ — число ребер, соединяющих вершину x_q с вершинами формируемого куска.

Алгоритм приводит к получению локального оптимума в смысле критерия (9.4). Рассмотрим основные пункты алгоритма в предположении, что мультиграф G задан множеством вершин $X = \{x_k/k = \overline{1, N}\}$ и многозначным отображением Γ множества X в себя.

1. Включаем в множество вершин X_l формируемого куска G_l некоторую вершину x_q , т. е. $X_l = \{x_q\}$.

2. Определяем множество вершин, смежных вершинам X_l , т. е. ΓX_l .

3. Для каждой вершины подмножества $X' = \{x_i : x_i \in \Gamma X_l \text{ \& } x_i \notin X_l\}$ подсчитываем показатель $\delta(x_i)$.

4. Находим $\delta(x_i) = \min \delta(x_i); x_i \in \Gamma X_l \text{ \& } x_i \notin X_l$.

5. Вершину x_i включаем в множество X_l , т. е. выполняем $X_l = X_l \cup x_i$.

6. Проверяем $|X_l| < m_l$, где m_l — число элементов в l -й подсхеме. Если условие выполняется, то переходим к п. 2, иначе — к п. 7.

7. Кусок G_l сформирован.

8. Конец работы алгоритма.

Последовательный алгоритм разбиения гиперграфа схемы. На текущем шаге алгоритма в качестве кандидатов на включение в формируемое подмножество X_l будем рассматривать только вершины, связанные с вершинами, уже вошедшими в X_l . Гиперграф задаем в виде множества вершин $X = \{x_i/i = \overline{1, N}\}$, множества ребер $U = \{u_j/j = \overline{1, M}\}$ и многозначных отображений X в U , т. е. $\Gamma X = \{\Gamma x_i/i = \overline{1, N}\}$, и U в X , т. е. $\Gamma U = \{\Gamma u_j/j = \overline{1, M}\}$, причем $\Gamma x_i = U_i \subseteq U$ — множество ребер, содержащих вершину x_i , и $\Gamma u_j = X_j \subseteq X$ — множество вершин, инцидентных ребру u_j .

Множество вершин — кандидатов на включение в X_l определяется следующим образом: по отображению X в U находим множество ребер, содержащих вершины подмножества $X_l : \Gamma X_l = U' \subseteq U$. Затем по отображению U в X получаем множество вершин, инцидентных ребрам подмножества $U' : \Gamma U' = X' \subseteq X$. Кандидатами на включение в X_l будут вершины, удовлетворяющие условию

$$x_i \in \Gamma U' \text{ \& } x_i \in X \setminus X_l.$$

Очередную вершину x_i выбирают по минимуму ребер u_j , содержащих хотя бы по одной вершине из $X_l \cup x_i$ и $X \setminus \{X_l \cup x_i\}$. Для таких ребер должно выполняться условие

$$\exists x_q, x_p \in \Gamma u_j (x_q \in \{X_l \cup x_i\} \& x_p \in X \setminus \{X_l \cup x_i\}).$$

На основании (9.5) количество ребер, для которых выполняется это условие:

$$S(X_l \cup x_i) = |\Gamma \{X_l \cup x_i\} \cap \Gamma \{X \setminus \{X_l \cup x_i\}\}|. \quad (9.8)$$

Основные пункты алгоритма последовательного разбиения гиперграфа:

1. Включаем в формируемое множество X_l некоторую вершину $x_q : X_l = \{x_q\}$.

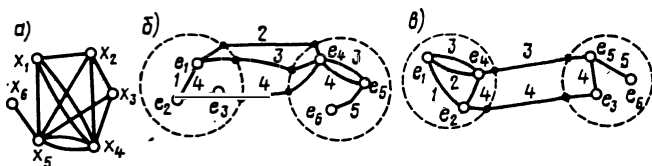


Рис. 9.3. Мультиграф схемы, данной на рис. 9.1, и ее компоновка последовательными алгоритмами разрезания мультиграфа и гиперграфа

2. По отображению X в U определяем множество ребер U' , инцидентных вершинам подмножества X_l , т. е. $\Gamma X_l = U' \subseteq U$.

3. По отображению U в X находим множество вершин, соединяемых этими ребрами $\Gamma U' = X' \subseteq X$.

4. Для варианта включения каждой вершины множества $X'' = \{x_i : x_i \in \Gamma U' \& x_i \in X \setminus X_l\}$ подсчитываем по (9.8) $S(X_l \cup x_i)$.

5. Определяем вершину x_i , для которой значение $S(X_l \cup x_i)$ минимально.

6. Проверяем условие $S(X_l \cup x_i) \leq k_l$, где k_l — число внешних выводов l -й части схемы. Если условие выполняется, то переходим к п. 7, иначе — к п. 9.

7. Вершину x_i включаем в формируемое множество: $X_l = X_l \cup x_i$.

8. Проверяем условие $|X_l| < m_l$, где m_l — число элементов l -й части схемы. Если условие выполняется, то переходим к п. 2, иначе — к п. 10.

9. Дальнейшее формирование подмножества X_l невозможно из-за нарушения ограничения по числу внешних выводов, переходим к п. 11.

10. Подмножество X_l сформировано.

11. Конец работы алгоритма.

Проиллюстрируем работу обоих последовательных алгоритмов на примере разбиения схемы (см. рис. 9.1) на два узла по три элемента в каждом. Модель этой схемы в виде мультиграфа показана на рис. 9.3, а. Напомним, что при переходе от схемы к графу каждая цепь представляется полным подграфом, построенным на вершинах, инцидентных

этой цепи, а мультиграф получается объединением полных подграфов. Работа алгоритма разрезания мультиграфа:

1.1. Пусть на первом шаге $X_1 = \{x_1\}$.

2.1. Множество вершин, смежных X_1 , будет

$$\Gamma X_1 = \{x_2, x_4, x_5\}.$$

3.1. Для $X' = \{x_2, x_4, x_5\}$ подсчитываем показатели $\delta(x_i)$:
 $\delta(x_2) = 4 - 1 = 3$; $\delta(x_4) = 6 - 2 = 4$; $\delta(x_5) = 6 - 1 = 5$.

4.1. Выбираем вершину x_2 .

5.1. Включив последнюю в X_1 , получим $X_1 = \{x_1, x_2\}$.

6.1. Кусок не сформирован, переходим к п. 2.

2.2. $\Gamma X_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$.

3.2. Для $X' = \{x_3, x_4, x_5\}$ подсчитываем $\delta(x_3) = 3 - 1 = 2$;
 $\delta(x_4) = 6 - 3 = 3$; $\delta(x_5) = 6 - 2 = 4$.

4.2. Выбираем вершину x_3 .

5.2. Включаем последнюю в $X_1 = \{x_1, x_2, x_3\}$.

6.2. Кусок сформирован, заканчиваем работу алгоритма.

Результат разрезания показан на рис. 9.3, б. Число внешних выводов $S = 6$, суммарное число межсоединений $R = 3$.

Кенигово представление гиперграфа схемы (см. рис. 9.1) показано на рис. 9.2. Множество вершин гиперграфа $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, множество ребер $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$, отображение X в U :

$\Gamma x_1 = \{u_1, u_2, u_3\}$; $\Gamma x_2 = \{u_1, u_4\}$; $\Gamma x_3 = \{u_4\}$; $\Gamma x_4 = \{u_2, u_3, u_4\}$;
 $\Gamma x_5 = \{u_3, u_4, u_5\}$; $\Gamma x_6 = \{u_5\}$, отображение U в X :

$$\Gamma u_1 = \{x_1, x_2\}; \Gamma u_2 = \{x_1, x_4\}; \Gamma u_3 = \{x_1, x_4, x_5\}; \Gamma u_4 = \\ = \{x_2, x_3, x_4, x_5\}; \Gamma u_5 = \{x_5, x_6\}.$$

Работа алгоритма разбиения гиперграфа (без проверки условия п. 6):

1.1. Пусть на первом шаге $X_1 = \{x_1\}$.

2.1. Множество ребер, инцидентных вершинам подмножества, будет $\Gamma X_1 = U' = \{u_1, u_2, u_3\}$.

3.1. Множество вершин, соединяемых этими ребрами: $\Gamma U' = X' = \{x_1, x_2, x_4, x_5\}$.

4.1. Множество вершин — кандидатов на включение в X_1 : $X'' = \{x_2, x_4, x_5\}$.

Подсчитываем $S(X_1 \cup x_i) = S_i$: $S_2 = |\Gamma(x_1, x_2) \cap$

$$\begin{aligned} & \cap \Gamma(x_3, x_4, x_5, x_6)| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4\} \cap \{u_2, u_3, u_4, u_5\}| = \\ & = |\{u_2, u_3, u_4\}| = 3; S_4 = |\Gamma(x_1, x_4) \cap \Gamma(x_2, x_3, x_5, x_6)| = \\ & = |\{u_1, u_2, u_3, u_4\} \cap \{u_1, u_3, u_4, u_5\}| = |\{u_1, u_3, u_4\}| = 3; \\ & S_5 = |\Gamma(x_1, x_5) \cap \Gamma(x_2, x_3, x_4, x_6)| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} \cap \\ & \cap \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}| = 5. \end{aligned}$$

5.1. Выбираем вершину x_2 .

6.1—7.1. Включив последнюю в X_1 , получим $X_1 = \{x_1, x_2\}$.

8.1. Проверяем $|X_1| = 2 < 3$, переходим к п. 2.

2.2. Множество ребер, инцидентных вершинам X_1 : $\Gamma X_1 = U' = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$.

3.2. Множество вершин $\Gamma U' = X' = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$.

4.2. Множество вершин $X'' = \{x_3, x_4, x_5\}$.

Подсчитываем:

$$S_3 = |\Gamma(x_1, x_2, x_3) \cap \Gamma(x_4, x_5, x_6)| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4\} \cap \{u_2, u_3, u_4, u_5\}| = |\{u_2, u_3, u_4\}| = 3;$$

$$S_4 = |\Gamma(x_1, x_2, x_4) \cap \Gamma(x_3, x_5, x_6)| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4\} \cap \{u_3, u_4, u_5\}| = |\{u_3, u_4\}| = 2;$$

$$S_5 = |\Gamma(x_1, x_2, x_5) \cap \Gamma(x_3, x_4, x_6)| = |\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} \cap \{u_2, u_3, u_4, u_5\}| = |\{u_2, u_3, u_4, u_5\}| = 4.$$

5.2. Выбираем вершину x_4 .

6.2—7.2. Включаем вершину x_4 в $X_1 = \{x_1, x_2, x_4\}$.

8.2. Подмножество X_1 сформировано, заканчиваем работу алгоритма.

Результат разбиения показан на рис. 9.3, в. Число внешних выводов $S = 4$, суммарное число межсоединений $R = 2$. Как видим, компоновка схемы алгоритмом разбиения гиперграфа существенно лучше, чем алгоритмом разрезания мультиграфа, как по критерию числа внешних выводов S , так и по критерию числа межсоединений R .

В работе [11] отмечается, что результаты работы последовательных алгоритмов зависят от назначения первой вершины и последующих вершин с равными оценками.

§ 9.3. ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ КОМПОНОВКИ

Алгоритмы этой группы предназначены для улучшения некоторой исходной компоновки методом парных или групповых перестановок элементов из одной части схемы в другую таким образом, чтобы оптимизировать целевую функцию с учетом заданных ограничений. Начальная компоновка может быть получена вручную или последовательным алгоритмом.

Рассмотрим идею парных перестановок. Положим для определенности, что лучшему варианту компоновки соответствует минимум некоторого показателя F . Пусть множество элементов схемы E разбито на два узла — соответственно подмножества A и B .

Обозначим исходный вариант компоновки k_0 , а значение целевой функции F_0 . Предположим, что выбрана пара элементов $a_i \in A$ и $b_i \in B$, таких, что их перестановка приведет к уменьшению значения целевой функции. После перестановки a_i и b_i получаем вариант компоновки k_1 и значение целевой функции F_1 , причем $\Delta F_1 = F_0 - F_1 > 0$. Процесс повторяется до тех пор, пока существуют перестановки, уменьшающие значение F . В результате получаем последовательность вариантов компоновки $k_0, k_1, k_2, \dots, k_s$, которым соответствует монотонно убывающая последовательность значений целевой функции $F_0 > F_1 > F_2 > \dots > F_s$.

Такой итерационный процесс может привести к локальному оптимуму (F_L, k_L) , что иллюстрируется рис. 9.4, а. Пройти локальный оптимум позволяет метод групповых перестановок. Рассмотрим один из способов определения группы. Для всех пар элементов $a_i \in A$ и $b_i \in B$ определяется приращение ΔF . Выбирается пара элементов, обозначим их a_1 и b_1 , с максимальным ΔF и временно осуществляется их перестановка (значение ΔF может быть положительным, отрицательным и равным нулю). Процесс повторяется «к» раз до тех пор, пока все элементы подмножеств A и B не поменяются местами. Строится зависимость ΔF от шага обмена (рис. 9.4, б). По полученной кри-

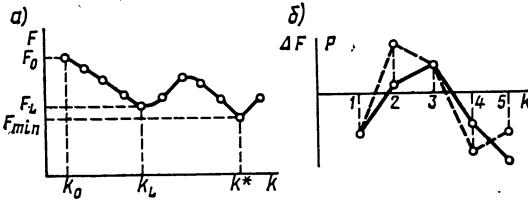


Рис. 9.4. Изменение значения целевой функции F , приращения ΔF и их сумма P (— ΔF , — — — P)

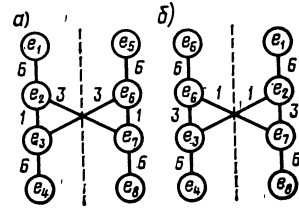


Рис. 9.5. Пример группового обмена:
а — исходная компоновка; б — результат обмена

вой определяется шаг обмена k^* , при котором $P = \sum_{t=1}^T \Delta F_t > 0$ и максимальна ($T = 1, 2, \dots, k$). Выполняется обмен группы a_1, a_2, \dots, a_{k^*} из узла A на группу b_1, b_2, \dots, b_{k^*} из узла B .

Пример группового обмена (см. [19]), улучшающего критерий межэлементных связей, показан на рис. 9.5. Здесь цифрами около линий, соединяющих элементы, указано число связей между ними. Обмен любой пары элементов не уменьшает число межсоединений. Перенос же элементов e_1 и e_2 в узел B , а элементов e_5 и e_6 в узел A приведет к уменьшению межузловых связей с 6 до 2. Итерационные алгоритмы компоновки обеспечивают лучшее качество решения, чем последовательные, однако требуют больших затрат машинного времени. Для окончания итерационного процесса может быть задано число итераций или их требуемая точность в виде условия $\Delta F_t / F_t \leq \epsilon$. Рассмотрим итерационные алгоритмы улучшения компоновки схемы по ее мультиграфу и гиперграфу, осуществляющие только парные перестановки.

Итерационный алгоритм компоновки по мультиграфу схемы. Пусть мультиграф $G = (X, U)$ разрезан на два куска $G' = (X', U')$ и $\bar{G}' = G \setminus G'$. Для каждой вершины $x_i \in X$ мультиграфа вводится характеристика (см. [10]), которая количественно оценивает связность этой вершины с другими, лежащими вне данного куска, по отношению к вершинам, лежащим внутри его. Эта характеристика для вершины x_i определяется так:

$$\alpha(x_i) = \begin{cases} r_i(\bar{G}') - r_i(G'), & \text{если } x_i \in X'; \\ r_i(G') - r_i(\bar{G}'), & \text{если } x_i \in X \setminus X'; \end{cases} \quad (9.9)$$

$$(9.10)$$

где $r_i(\bar{G}')$ — количество ребер, соединяющих вершину x_i с вершинами куска \bar{G}' ; $r_i(G')$ — количество ребер, соединяющих вершину x_i с вершинами куска G' .

Перестановка двух вершин $x_i \in X'$ и $x_j \in X \setminus X'$ приводит к уменьшению числа ребер, попадающих в разрез:

если вершины x_i и x_j не смежны, при $\alpha(x_i) + \alpha(x_j) > 0$;

если вершины x_i и x_j смежны, при $\alpha(x_i) + \alpha(x_j) > 2m_{i,j}$,

где $m_{i,j}$ — количество ребер, связывающих вершины x_i и x_j .

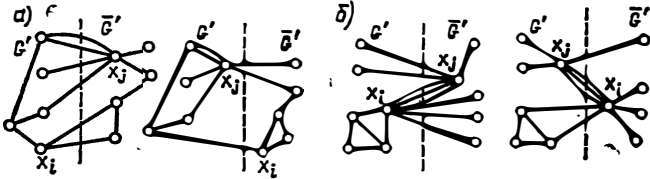


Рис. 9.6. Перестановка несмежных (а) и смежных (б) вершин x_i и x_j

Причем количество соединительных ребер уменьшается на

$$\Delta S_{i,j} = \alpha(x_i) + \alpha(x_j), \quad (9.11)$$

или

$$\Delta S_{i,j} = \alpha(x_i) + \alpha(x_j) - 2m_{i,j} \quad (9.12)$$

при перестановке несмежных (а) и смежных (б) вершин соответственно (рис. 9.6).

Очевидно, что парная перестановка вершин x_i и x_j приведет к изменению показателя α только у вершин, смежных x_i и x_j , поэтому после выполнения очередного обмена можно подсчитывать значения α только у таких вершин и корректировать приращение ΔS у тех парных обменов, в которых они участвуют.

Изложим основные пункты алгоритма, считая, что мультиграф задан множеством вершин X и многозначным отображением X в себя.

1. Для всех $x_i \in X'$ и $x_j \in X \setminus X'$ подсчитываем по (9.9) или (9.10) показатели $\alpha(x_i)$ и $\alpha(x_j)$.

2. Для всех возможных парных обменов по (9.11) или (9.12) определяем приращение $\Delta S_{i,j}$.

3. Находим $\Delta S_{p,q} = \max \Delta S_{i,j}$. Проверяем условие $\Delta S_{p,q} > 0$. Если условие выполняется, то переходим к п. 4, иначе — к п. 8.

4. Осуществляем перестановку вершин x_p и x_q .

5. Определяем вершины, смежные x_p и x_q :

$$\Gamma x_p = X_p \text{ и } \Gamma x_q = X_q.$$

6. Для вершин подмножеств X_p и X_q подсчитываем показатель α .

7. Для возможных парных обменов с участием $x_l \in X_p$, $x_t \in X_q$ находим новые значения ΔS . Переходим к п. 3.

8. Конец работы алгоритма.

Итерационный алгоритм компоновки при задании схемы гиперграфом. Пусть множество вершин X гиперграфа разбито на два непере-

секающихся подмножества X' и $X \setminus X'$, т. е. имеется начальная компоновка. На основании (9.5) при перестановке вершин $x_i \in X'$ и $x_j \in X \setminus X'$ изменение числа внешних связей

$$\Delta S_{i,j} = |\Gamma X' \cap \Gamma (X \setminus X')| - |\Gamma ((X' \cup x_j) \setminus x_i) \cap \Gamma ((X \setminus \{X' \cup x_j\}) \cup x_i)|. \quad (9.13)$$

Определение приращения ΔS по этой формуле неэкономно с точки зрения затрат машинного времени. Перестановка вершин x_i и x_j вызывает изменение состояния только тех ребер, которые инцидентны этим вершинам.

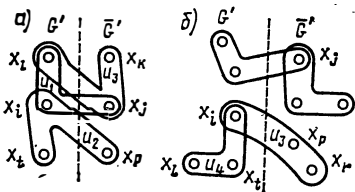


Рис. 9.7. Ребра гиперграфа, остающиеся в разрезе (а) и изменяющие свое состояние относительно разреза (б) при перестановке вершин x_i и x_j

Для ребер, инцидентных вершине x_i , возможны следующие состояния:

1. Останутся в разрезе между кусками G' и $G \setminus G'$ те ребра, которые содержат вершину x_j или хотя бы по одной вершине $x_i \in X'$ и $x_p \in X \setminus X'$. На рис. 9.7, а это ребра $u_1 = \{x_l, x_i, x_j\}$ и $u_2 = \{x_i, x_i, x_p\}$.

2. Будут удалены из разреза между кусками G' и $G \setminus G'$ те ребра, которые не содержат вершины x_j и ни одной из вершин $x_i \in X'$. Множество вершин X_h , входящих в такое ребро u_h , должно удовлетворять условию

$$(X_h \setminus x_i) \cap (X' \cup x_j) = \emptyset. \quad (9.14)$$

На рис. 9.7, б таким ребром является $u_3 = \{x_i, x_p, x_r\}$.

3. Появятся в разрезе между кусками G' и $G \setminus G'$ те ребра, в которые не входили вершины из куска $G \setminus G'$. Для подмножеств вершин X_h таких ребер u_h должно выполняться условие

$$X_h \cap (X \setminus X') = \emptyset. \quad (9.15)$$

На рис. 9.7, б это ребро $u_4 = \{x_i, x_i, x_l\}$.

Аналогичные замечания справедливы и для ребер, инцидентных вершине $x_j \in X \setminus X'$.

На основании изложенного приращение

$$\Delta S_{i,j} = (s_i^- + s_j^-) - (s_i^+ + s_j^+), \quad (9.16)$$

где s_i^- и s_j^- — количество ребер, которые будут удалены из разреза при перестановке вершин x_i и x_j соответственно; s_i^+ и s_j^+ — количество ребер, которые появятся в разрезе при перестановке вершин x_i и x_j соответственно.

После обмена вершин x_i и x_j можно пересчитать значение ΔS только у тех парных перестановок, в которых участвуют вершины, имеющие общие ребра с x_i и x_j .

Основные пункты алгоритма.

1. Для пары вершин $x_i \in X'$ и $x_j \in X \setminus X'$ определяем инцидентные им ребра: $\Gamma x_i = U_i$ и $\Gamma x_j = U_j$.

2. Находим множество вершин, входящих в каждое ребро:

$$\forall u_k \in U_i (\Gamma u_k = X_k); \forall u_l \in U_j (\Gamma u_l = X_l).$$

3. Подсчитываем показатель s_i^- — количество ребер $u_k \in U_i$, для которых выполняется условие $(X_k \setminus x_i) \cap (X' \cup x_j) = \emptyset$, и показатель s_i^+ — количество ребер $u_k \in U_i$, для которых справедливо $X_k \cap (X \setminus X') = \emptyset$.

4. Подсчитываем показатель s_j^- — количество ребер $u_l \in U_j$, для которых выполняется условие $(X_l \setminus x_j) \cap \{(X \setminus X') \cup x_i\} = \emptyset$, и s_j^+ — количество ребер $u_l \in U_j$, для которых справедливо $X_l \cap X' = \emptyset$.

5. Определяем приращение $\Delta S_{i,j} = (s_i^- + s_j^-) - (s_i^+ + s_j^+)$.

6. Повторяем пп. 1—5 для всех возможных парных обменов.

7. Находим $\Delta S_{p,q} = \max \Delta S_{i,j}$. Проверяем условие $\Delta S_{p,q} > 0$. Если оно выполняется, то переходим к п. 8, иначе — к п. 12.

8. Осуществляем перестановку вершин $x_p \in X'$ и $x_q \in X \setminus X'$.

9. Для вершин x_p и x_q определяем инцидентные им ребра: $\Gamma x_p = U_p$ и $\Gamma x_q = U_q$.

10. Находим множество вершин, входящих в эти ребра: $\Gamma U_p = X_p$ и $\Gamma U_q = X_q$.

11. Повторяем пп. 1—5 для всех возможных парных обменов, в которых участвуют вершины $x_i \in X_p$ и $x_r \in X_q$. Переходим к п. 7.

12. Конец работы алгоритма.

Компоновка схем с помощью итерационного алгоритма может выполняться как по способу последовательного выделения узлов, описанному в § 9.2, так и по способу последовательного разделения. При последовательном разделении схема разбивается на две равные части. Итерационным алгоритмом выполняется улучшение компоновки. Далее каждая часть опять разделяется на две и к каждой паре применяется итерационный алгоритм. Процесс повторяется до тех пор, пока не получим разбиение схемы на требуемое число узлов.

§ 9.4. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИДЕНТИЧНОСТИ ЧАСТЕЙ СХЕМ

При решении задачи компоновки часто возникает необходимость установления идентичности отдельных частей схемы ЭВМ. Эта задача сводится к распознаванию изоморфизма графов, если граф является корректной моделью схемы в смысле полноты отображения в нем свойств схемы, определяющих логику ее функционирования. В этом случае изоморфизм графов означает тождественность функционирования отображаемых ими схем. Рассмотрим алгоритм определения изоморфизма взвешенных ориентированных мультиграфов. Такие графы — корректная модель в указанном выше смысле, например для функциональных схем, построенных на логических (базовых) элементах с равнозначными входами и одним выходом.

При распознавании изоморфизма взвешенных ориентированных графов $G = (X, F)$ и $H = (Y, P)$ используются следующие характеристики мультиграфа: полустепень исхода a_i и захода b_i каждой вер-

шины x_i , т. е. количество ребер, исходящих из этой вершины и входящих в нее; тип (вес) t_i вершины x_i (определяется логической функцией элемента схемы, которому поставлена во взаимно однозначное соответствие данная вершина); мощность прямого отображения $F^{+1}x_i$ вершины x_i ; мощность обратного отображения $F^{-1}x_i$ вершины x_i .

Например, для вершины x_2 графа, показанного на рис. 9.8, эти характеристики будут: $a_2 = 1, b_2 = 3, |F^{+1}x_2| = 1, |F^{-1}x_2| = 2$ (сравнить с соответствующими характеристиками вершины x_4 : $a_4 = 1, b_4 = 3; |F^{+1}x_4| = 1, |F^{-1}x_4| = 3$).

Для того чтобы графы H и G были изоморфны, необходимо выполнение условия:

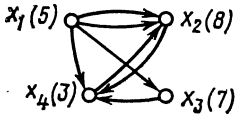


Рис. 9.8. Ориентированный граф

$$(\forall x_i \in X) (\exists y_j \in Y) ((a_i = c_j) \& (b_i = d_j) \& (t_i = t_j) \& (|F^{+1}x_i| = |P^{+1}y_j|) \& (|F^{-1}x_i| = |P^{-1}y_j|)). \quad (9.17)$$

Здесь c_j и d_j — полустепени исхода и захода вершины графа H .

Но это условие не является достаточным, что доказывается, в частности, примером, показанным на рис. 9.9, а. Поскольку полный набор инвариантов в настоящее время неизвестен, не представляется возможным определить, изоморфны ли графы без построения графа соответствия, т. е. подстановки $f: G \xrightarrow{f} H$.

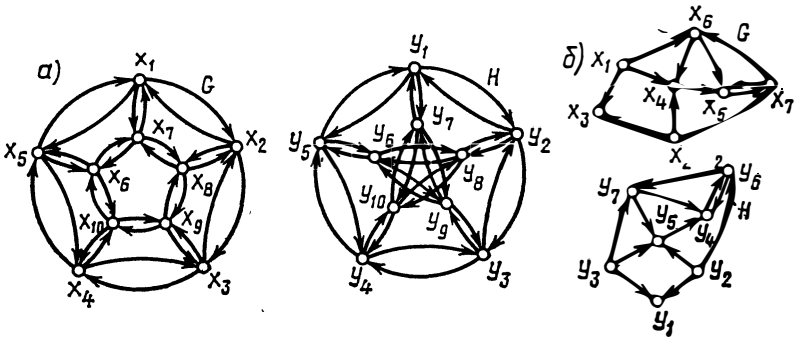


Рис. 9.9. Неизоморфные (а) и изоморфные (б) ориентированные графы G и H

Граф соответствия строится следующим образом:

1. Проверяется условие (9.17) возможности изоморфизма.

2. Рассматривается условие существования единственной вершины с некоторой полустепенью захода и исхода и мощностью прямого и обратного отображения:

$$(\exists x_i \in X) (\exists x_j \in X) ((t_i = t_j) \& (a_i = a_j) \& (b_i = b_j) \& (|F^{+1}x_i| = |F^{+1}x_j|) \& (|F^{-1}x_i| = |F^{-1}x_j|));$$

$$|X| = n; i \neq j; i, j \in I = \overline{1, n}. \quad (9.18)$$

Тем вершинам графа G , для которых условие (9.18) выполняется, можно поставить в соответствие вершины графа H по правилу:

$$\begin{aligned} \langle x_i \equiv y_j \rangle &\leftrightarrow ((t_i = t_j) \& (a_i = c_j) \& (b_i = d_j) \& (|F^{+1} x_i| = \\ &= |P^{+1} y_j|) \& (|F^{-1} x_i| = |P^{-1} y_j|)). \end{aligned} \quad (9.19)$$

Таким образом, определяется частичная подстановка

$$n_i = \langle x_i \equiv y_j \rangle. \quad (9.20)$$

Найденные вершины исключаются из X и Y .

При невыполнении условия (9.18) проверяется условие

$$n' = \{n_i\} = \emptyset. \quad (9.21)$$

Если условие (9.21) выполняется, то переходим к п. 3. В противном случае и при неполной подстановке переходим к п. 4.

3. Анализ состава прямого и обратного отображений вершин, не включенных в граф соответствия, т. е. проверка условия:

$$(\exists x_i \in X') (\exists x_j \in X') ((F^{+1} x_i \sim F^{+1} x_j) \& (F^{-1} x_i \sim F^{-1} x_j)); i \neq j, \quad (9.22)$$

где X' — множество вершин одного типа с одинаковыми полустепенями захода и исхода и имеющих одинаковые мощности прямых и обратных отображений.

Считается, что

$$\begin{aligned} (F^{+1} x_i \sim F^{+1} x_j) &\leftrightarrow (\forall x_k \in F^{+1} x_i) (\exists x_n \in F^{+1} x_j) \times \\ &\times ((t_k = t_n) \& (a_k = a_n) \& (b_k = b_n) \& (|F^{+1} x_k| = \\ &= |F^{+1} x_n|) \& (|F^{-1} x_k| = |F^{-1} x_n|)). \end{aligned} \quad (9.23)$$

Аналогично для обратных отображений $F^{-1} x_i, F^{-1} x_j$. Те вершины, для которых условие (9.22) выполняется, могут быть включены в граф соответствия, причем

$$\begin{aligned} \langle x_i \equiv y_j \rangle &\leftrightarrow ((t_i = t_j) \& (a_i = c_j) \& (b_i = d_j) \& (|F^{+1} x_i| = \\ &= |P^{+1} y_j|) \& (|F^{-1} x_i| = |P^{-1} y_j|) \& (F^{+1} x_i \sim \\ &\sim P^{+1} y_j) \& (F^{-1} x_i \sim P^{-1} y_j)). \end{aligned} \quad (9.24)$$

Проверяется условие (9.21). Если оно выполняется, то устанавливается невозможность работы алгоритма. В противном случае рассматривается условие

$$n' = n. \quad (9.25)$$

Если (9.25) выполняется, то работа алгоритма заканчивается, при невыполнении (9.25), когда не построено ни одного нового ребра графа соответствия, устанавливается возможность получения только частичной подстановки, при построении хотя бы одного нового ребра алгоритм возвращается к п. 2.

4. Анализ прямого и обратного отображений по полученным частичным подстановкам. Отыскивается подстановка, в подмножествах пря-

мого и обратного отображений которой есть хотя бы одна вершина, не вошедшая в граф соответствия. Для этой подстановки выполняется пп. 2 и 3, если $X' \neq \emptyset$ ($X' \subseteq F'x_i$ при рассмотрении прямого отображения и $X' \subseteq F^{-1}x_i$ — обратного).

Таким образом, рассматриваются все частичные подстановки, полученные до п. 4 и в ходе его выполнения. Если в ходе выполнения п. 4 не получено ни одного нового ребра графа соответствия, то переходим к п. 3.

При выполнении условия (9.25) работа заканчивается; в случае неполной подстановки возвращаемся к п. 2.

Рассмотрим работу алгоритма на примере. Пусть требуется установить, изоморфны ли графы H и G , изображенные на рис. 9.9, б, причем вершины $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ — первого типа, остальные — второго.

Условие (9.17) выполняется, следовательно, изоморфизм возможен. Условие (9.18) выполняется только для вершины x_3 . В графе H ей соответствует вершина y_1 .

Рассмотрение отображения вершины x_3 (п. 4) никаких результатов не дает, переходим к п. 3, в ходе выполнения которого устанавливается соответствие $\langle x_4 \equiv y_5 \rangle, \langle x_5 \equiv y_4 \rangle$; далее, в п. 4 при анализе отображения (обратного) вершины x_4 определяется следующее ребро графа соответствия $\langle x_6 \equiv y_7 \rangle$; теперь условие (9.18) выполняется для вершины x_7 : строится ребро $\langle x_7 \equiv y_6 \rangle$; при рассмотрении обратного отображения вершины x_6 определяется подстановка $\langle x_1 \equiv y_3 \rangle$ и, наконец, для вершины x_2 выполняется условие (9.18), получаем последнее ребро графа соответствия $\langle x_2 \equiv y_2 \rangle$. Таким образом, граф соответствия построен полностью.

§ 9.5. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОКРЫТИЯ

Содержательно задача покрытия схемы заданным набором модулей рассмотрена в § 9.1. При описании алгоритмов покрытия будем считать, что в модулях заданного набора имеются все типы элементов по-

крываемой схемы. Модули наборов (рис. 9.10) можно условно разбить на два класса (см. [10]): 1. Модули, состоящие из несвязанных элементов, все входы и выходы которых являются внешними выводами модулей. 2. Модули, состоящие из связанных элементов.

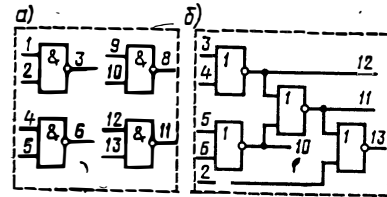


Рис. 9.10. Модули, состоящие из несвязанных (а) и связанных (б) элементов

Постановка задачи покрытия как задачи целочисленного линейного программирования. Задача покрытия схемы соединения элементов ($i - 1$)-го

уровня заданным набором модулей первого класса (элементами i -го ранга) может быть сформулирована как задача целочисленного линейного программирования. Пусть критерием оптимизации является минимум числа модулей, используемых для покрытия схемы,

при ограничениях на число элементов в модулях и число внешних выводов.

Набор заданных модулей характеризуется матрицей

$$A = \| a_{j, l} \|_{m \times n}.$$

Здесь m — число различных элементов $(i - 1)$ -го уровня во всех модулях заданного набора и в схеме; n — число типов модулей в наборе.

Элемент матрицы $a_{j, l}$ равен числу элементов $(i - 1)$ -го уровня j -го типа в l -м модуле набора. Пусть покрываемая схема построена в базовых элементах 2И-НЕ, 8И-НЕ, 3И-НЕ, 4И-НЕ, 2И-2ИЛИ-НЕ. Для реализации предложена серия 155. Тогда матрица

$$A = \begin{matrix} & \text{ЛА2} & \text{ЛА3} & \text{ЛА4} & \text{ЛА1} & \text{ЛР1} \\ \text{2И-НЕ} & \parallel 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \parallel \\ \text{8И-НЕ} & \parallel 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \parallel \\ \text{3И-НЕ} & \parallel 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \parallel \\ \text{4И-НЕ} & \parallel 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \parallel \\ \text{2И-2ИЛИ-НЕ} & \parallel 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \parallel \end{matrix}.$$

Поэлементный состав схемы задается вектором-столбцом $B = \{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m\}$, каждый элемент которого b_j равен числу элементов j -го типа в схеме. Обозначим через x_l количество модулей l -го типа, необходимых для покрытия схемы. Тогда задача покрытия ставится следующим образом: найти такие x_l , которые обеспечивали бы

$$\min N = \sum_{l \in L} x_l; L = \overline{1, n};$$

при ограничениях $\sum_{l \in L} a_{j, l} x_l \geq b_j; j = \overline{1, m}; a_{j, l} \geq 0; x_l$ — целое для всех l .

Содержательно ограничения означают, что количество элементов j -го типа во всех модулях, используемых для покрытия схемы $\sum_{l \in L} a_{j, l} x_l$, должно быть больше или равно количеству таких элементов b_j в схеме. Условие целочисленности возникает из-за того, что модуль заданного набора имеет законченное конструктивное оформление и может быть использован только полностью. В программном обеспечении современных ЭВМ имеются стандартные подпрограммы решения задачи целочисленного программирования. Основное ограничение при решении задачи покрытия в такой постановке — требуемое машинное время.

Эвристический алгоритм покрытия. Эвристический алгоритм моделирует процесс поиска в схеме подсхемы, аналогичной модулю заданного набора. Элементы схемы просматриваются и включаются в подсхему последовательно один за другим, поэтому алгоритм относится к классу последовательных.

Покрываемая схема представляется взвешенным ориентированным мультиграфом $G = (X, F)$, множество вершин которого сопоставлено элементам схемы, а множество ребер — связям схемы. Каждый модуль заданного набора, являющийся совокупностью связанных элементов ($i - 1$)-го уровня, интерпретируется ориентированным мультиграфом $H_i = (Y_i, P_i)$. Таким образом, заданному набору сопоставляется множество ориентированных графов $H = \{H_i | i = \overline{1, n}\}$, где n — число типов модулей в наборе. Задача покрытия сводится к разрезанию графа схемы G на подграфы G_{lr} , если ребра, попадающие в разрез, считать инцидентными некоторой псевдовершине:

$$G = \bigcup_{i \in L} \left(\bigcup_{r \in R_i} G_{lr} \right); G_{lr} \subseteq H_i; G_{lr} \neq \emptyset; L = \overline{1, n_{\text{реал}}}; R_i = \overline{1, q_i},$$

где $n_{\text{реал}}$ — число типов модулей, используемых для покрытия схемы; q_i — число модулей i -го типа, выделенных в схеме.

При использовании эвристического алгоритма для каждого графа H_i решается задача его вложения в граф схемы G . Найденный подграф G_{lr} удаляется из графа G . Если в графе схемы не удастся найти подграф G_i , то переходят к поиску подграфа $G_{i+1} \subseteq H_{i+1}$. Процесс повторяется до тех пор, пока вся схема не будет покрыта модулями заданного набора или выяснится невозможность этого. При положительном результате получается вариант состава в виде множества $Q = \{q_i | i = \overline{1, n_{\text{реал}}}\}$, каждый элемент которого q_i равен числу модулей i -го типа в схеме, поэлементный состав этих модулей и списки межмодульных и внешних связей. Очевидно, что результат покрытия зависит от порядка вложения H_i в G . Задавая различный порядок вложения графов $\{H_i | i = \overline{1, n}\}$ в граф схемы G , можно сформировать несколько вариантов состава. Выбирается тот из них, который обеспечивает экстремум одной из целевых функций:

$$\max k_{\text{повт}} = \left(1 - n_{\text{реал}} |Y_{\text{ср}}| \left/ \sum_{i=1}^{n_{\text{реал}}} q_i |Y_i| \right. \right); \quad (9.26)$$

$$\min k_{\text{изб}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{реал}}} \sum_{r=1}^{q_i} (|Y_i| - |X_{lr}|) \left/ \sum_{i=1}^{n_{\text{реал}}} q_i |Y_i| \right.; \quad (9.27)$$

$$\min N_{\text{реал}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{реал}}} q_i, \quad (9.28)$$

где $k_{\text{повт}}$ — повторяемость модулей; $|Y_{\text{ср}}|$ — среднее число элементов в модуле; $|Y_i|$ — число элементов в модуле i -го типа; $k_{\text{изб}}$ — относительная избыточность реализации; $|X_{lr}|$ — число используемых элементов модуля i -го типа (если $G_{lr} \subset H_i$); $N_{\text{реал}}$ — число модулей в реализации.

При описании работы алгоритма граф H_i будем называть *эталонным*. Основными решающими правилами эвристического алгоритма

являются:

$$(\forall y_j \in Y_l) (\exists x_i \in X) [(t_j = t_i) \& (c_j \geq a_i) \& (d_j \geq b_i)]; \quad (9.29)$$

$$(\forall y_k \in (F^{+1} y_j \cup F^{-1} y_j) \& y_k \in Y_l^*, x_k \in (F^{+1} x_i \cup F^{-1} x_i) \& x_k \in X_l^*) (|v(y_j, y_k)| = |u(x_i, x_k)| \& |v(y_k, y_j)| = |u(x_k, x_i)|); \quad (9.30)$$

$$\left[\left(c_j - \sum_{k=1}^{j-1} |v(y_j, y_k)| \right) \geq \left(a_i - \sum_{k=1}^{j-1} |u(x_i, x_k)| \right) \right] \& \left[\left(d_j - \sum_{k=1}^{j-1} |v(y_k, y_j)| \right) \geq \left(b_i - \sum_{k=1}^{j-1} |u(x_k, x_i)| \right) \right]. \quad (9.31)$$

Здесь t_j и t_i — типы вершин y_j и x_i , определяемые их логическими функциями; c_j, d_j — полустепени исхода и захода для вершины y_j ; a_i, b_i — полустепени исхода и захода для вершины x_i ; $Y_l^* \subseteq Y$ — подмножество просмотренных вершин эталонного графа H_l^* ; $X_l^* \subseteq X$ — подмножество вершин формируемого подграфа G_l^* ; $|v(y_j, y_k)|$ — число ребер, выходящих из рассматриваемой y_j -й вершины эталона в уже просмотренные вершины $\{y_k/k = 1, j - 1\}$; $|v(y_k, y_j)|$ — число ребер, заходящих в вершину y_j из вершин y_k ; $|u(x_i, x_k)|$ — число ребер, выходящих из рассматриваемой x_i -й вершины графа схемы G в вершины x_k , уже включенные в формируемый подграф G_l^* ; $|u(x_k, x_i)|$ — число ребер, заходящих в рассматриваемую x_i -ю вершину из вершин x_k , включенных в подграф G_l^* .

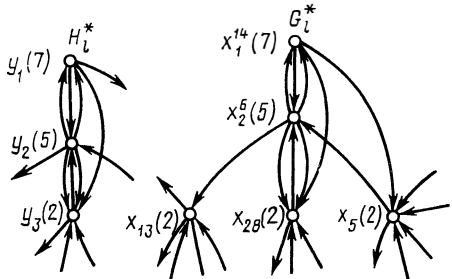


Рис. 9.11. Куски графов H_l^* и G_l^* на третьем шаге работы эвристического алгоритма покрытия

На j -м шаге работы алгоритма для очередного элемента l -го модуля заданного набора (вершины y_j графа H_l) ищется аналогичный элемент схемы (вершина x_i графа G), имеющий тот же тип и такие же связи с элементами, уже включенными в подсхему, как и j -й элемент модуля набора с его k -ми элементами ($k = \overline{1, j - 1}$). Количество связей этого элемента схемы с элементами, не включенными в подсхему, может быть меньше или равно количеству связей j -го элемента модуля набора с его p -ми элементами ($p = \overline{j + 1, |Y_l|}$). Сравнение полустепеней захода и исхода позволяет исключить из рассмотрения элементы схемы, имеющие большее количество внешних связей, чем соответствующие элементы модуля набора.

На рис. 9.11 показаны куски графов H_l^* и G_l^* на третьем шаге работы алгоритма. Около вершин в скобках цифрами обозначены их типы. В качестве верхнего индекса при вершинах, уже включенных в кусок G_l^* , показаны их номера в графе G . Множество вершин-кандидатов

$X'_i = \{x_{13}, x_{28}, x_5\}$. Вершиной, аналогичной y_3 , является только x_{28} . Действительно:

$$\begin{array}{ll} c_3 = 2, d_3 = 5; & a_{28} = 2, b_{28} = 5; \\ F^{+1} y_3 \cap Y'_i = \{y_2\}; & F^{+1} x_{28} \cap X'_i = \{x_2\}; \\ F^{-1} y_3 \cap Y'_i = \{y_1, y_2\}; & F^{-1} x_{28} \cap X'_i = \{x_1, x_2\}; \\ |v(y_3, y_1)| = 0; & |u(x_{28}, x_1^4)| = 0; \\ |v(y_3, y_2)| = 1; & |u(x_{28}, x_2^6)| = 1; \\ |v(y_1, y_3)| = 1; & |u(x_1^4, x_{28})| = 1; \\ |v(y_2, y_3)| = 2. & |u(x_2^6, x_{28})| = 2. \end{array}$$

Основные пункты эвристического алгоритма покрытия:

1. Проверяем по типам вершин возможность вложения графа H_i в граф G , т. е. $(\forall y_j \in Y_i) (\exists x_i \in X) (t_j = t_i)$. Если условие не выполняется, то переходим к п. 26, иначе — к п. 2.

2. Выделяем из графа схемы подмножество вершин X'_j , которые удовлетворяют условию

$$(\forall x_i \in X'_j \subseteq X) [(t_i = t_j) \& (a_i \leq c_j) \& (b_i \leq d_j)].$$

3. Текущую вершину x_i ставим в соответствие вершине y_j ($x_i \equiv y_j$).

4. Если вершина эталона y_j является по порядку первой ($j = 1$), то переходим к п. 21, иначе — к п. 5.

5. Определяем обратные отображения $F^{-1} x_i$ и $F^{-1} y_j$.

6. Для очередных вершин $y_k \in F^{-1} y_j$ и $x_k \in F^{-1} x_i$ проверяем выполнение условия $y_k \in Y'_i$ & $x_k \in X'_i$. Если условие выполняется, то переходим к п. 8, иначе — к п. 7.

7. Проверяем выполнение условия $y_k \notin Y'_i$ & $x_k \notin X'_i$. Если условие выполняется, то переходим к п. 10, иначе — к п. 20.

8. Проверяем выполнение условия $|v(y_k, y_j)| = |u(x_k, x_i)|$. Если условие выполняется, то переходим к п. 9, иначе — к п. 20.

9. Подсчитываем общее количество связей рассматриваемых вершин x_i и y_j с вершинами $x_k \in X'_i$ и $y_k \in Y'_i$:

$$\begin{aligned} S_i &= \sum_{k=1}^{j-1} |u(x_k, x_i)|; \\ S_j &= \sum_{k=1}^{i-1} |v(y_k, y_j)|. \end{aligned}$$

10. Анализируем, все ли вершины из обратных отображений $F^{-1} y_j$ и $F^{-1} x_i$ просмотрены. Если нет, то переходим к п. 6, иначе — к п. 11.

11. Для вершин y_j и x_i проверяем условие (9.31) по заходящим ребрам: $(d_j - S_j) \geq (b_i - S_i)$. Если условие не выполняется, то переходим к п. 20, иначе — к п. 12.

12—18. Повторяют пп. 5—11 для прямого отображения. При выполнении условия (9.31) по выходящим ребрам переходим к п. 21.

19. При невыполнении условия (9.31) по выходящим ребрам, переходим к п. 20.

20. Анализируем, все ли вершины из подмножества кандидатов X'_j просмотрены. Если все, то переходим к п. 24, иначе — к п. 3.

21. Включаем вершину x_i в формируемый подграф G_i^* , т. е. $X_i^* = X_i^* \cup x_i$.

22. Если подграф G_i не построен полностью, т. е. $|X_i^*| < |Y_i|$, то увеличиваем значение j на единицу и переходим к п. 2, иначе — к п. 23.

23. Подграф G_i , идентичный эталонному подграфу H_i , сформирован. Переходим к п. 27.

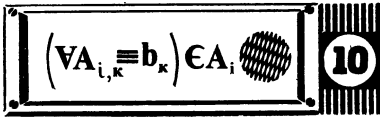
24. Возвращаемся на предыдущий ($j - 1$)-й шаг алгоритма. Проверяем условие $j - 1 = 0$. Если условие выполняется, то переходим к п. 26, иначе — к п. 25.

25. Анализируем, все ли вершины из подмножества X'_{j-1} просмотрены. Если да, то переходим к п. 24, иначе выполняем пп. 4—20 для ($j - 1$)-го шага алгоритма, т. е. ищем в графе схемы новую вершину x_i , аналогичную вершине y_{j-1} эталонного графа.

26. Подграфа, идентичного эталонному, в графе схемы нет.

27. Конец работы алгоритма.

Для построения дерева решений предназначены пп. 24 и 25. Для сокращения числа ветвей (числа переборов) в п. 2 может быть наложено ограничение на число вершин в множестве X'_j . Алгоритм может быть использован для покрытия схем, построенных на многополюсниках по входу и выходу с неравнозначными выводами. Для этого в пп. 8 и 15 необходимо добавить проверку совпадения весов соответствующих ребер.



**§ 10.1. ПОСТАНОВКА
ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ.
КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ**

В общем виде размещение заключается в определении оптимального в смысле некоторого критерия положения элементов и связей между ними в монтажном пространстве типовой конструкции. При этом должны быть удовлетворены заданные конструктивно-технологические ограничения. В такой постановке задача размещения может быть сформулирована как задача целочисленного программирования, однако из-за большой размерности ее практическая реализация нецелесообразна. В связи с этим задача условно разбивается на две: размещение конструктивных элементов и трассировка связей между ними.

При таком подходе размещение сводится к нахождению оптимального положения элементов и внешних контактов в монтажной области типовой конструкции. В ряде алгоритмов элементы размещают без учета их связей с внешними выводами, поэтому элементы, имеющие связи с внешними выводами, могут оказаться на значительном удалении от них. Это затруднит последующую трассировку соединений.

Исходными данными для задачи размещения являются схема соединения элементов, метрические параметры и топологические свойства монтажного пространства (см. § 8.3). Для типовых конструкций ЭВМ, начиная с субблока, характерно регулярно монтажное пространство. Тогда задача размещения может быть сформулирована следующим образом. Имеется множество конструктивных элементов $E = \{e_i / i = \overline{1, N}\}$ и множество соединяющих их цепей $Q = \{q_k / k = \overline{1, K}\}$. Монтажное пространство определено множеством фиксированных позиций для установки элементов $T = \{t_j / j = \overline{1, M}\}$, причем $M \geq N$. Найти такое отображение множества E в множество T , при котором достигается экстремум целевой функции F .

Главная цель размещения — создание наилучших условий для трассировки. Вследствие условности разделения задач размещения и трассировки трудно установить для задачи размещения такой критерий оптимизации, который в достаточной мере удовлетворял бы требованиям трассировки. В настоящее время используются следующие критерии: минимум суммарной длины всех соединений или длины самой длинной связи; минимум числа пересечений связей при произвольной их конфигурации; максимум числа цепей с возможно более простой конфигурацией; максимально близкое расположение модулей, имеющих наибольшее количество связей между собой.

Указанные критерии лишь качественно способствуют решению основной задачи: обеспечить оптимальную трассировку соединений. Од-

ним из наиболее распространенных является критерий минимума суммарной длины соединений в связи с тем, что при его оптимизации косвенно минимизируется длина связей и число их пересечений, снижается искажения сигналов.

Для N элементов, которые могут быть установлены в M позиций, существует множество $A = \{a_i/l = \overline{1, L}\}$ размещений. Количество их

$$L = \begin{cases} M!/(M-N)! & \text{при } M > N; \\ M! & \text{при } M = N. \end{cases} \quad (10.1)$$

В связи с этим поиск оптимального варианта размещения полным перебором нецелесообразен уже при $N = 15 \div 20$. В дальнейшем будем полагать, что $M = N$. Если число элементов меньше числа позиций, можно ввести $M - N$ фиктивных элементов.

Различные алгоритмы размещения могут быть сведены в следующие основные группы (см. [19]): алгоритмы решения задач математического программирования, являющихся моделями задачи размещения; последовательные алгоритмы; итерационные алгоритмы; алгоритмы, использующие непрерывно-дискретные методы оптимизации.

Рассмотрим постановку задачи размещения как задачи квадратичного назначения при использовании критерия минимума суммарной взвешенной длины соединений. Будем считать, что соединения исходят из геометрических центров конструктивных элементов, метрика — ортогональная, расстояния между соседними позициями по горизонтали и вертикали одинаковые. Тогда математической моделью монтажного пространства является граф решетки G_r , а расстояния между позициями установки элементов T будут определены матрицей расстояний этого графа D_r (см. § 8.3).

В качестве математической модели схемы используем взвешенный неориентированный мультиграф, в котором элементам схемы сопоставлены вершины, а каждая цепь представляется полным подграфом. Связность элементов схемы задается матрицей соединений R , элемент

$$r_{i,j} = \sum_{q=1}^{Q_{i,j}} p_q \quad (10.2)$$

которой отражает взвешенную связанность вершин $x_i \leftrightarrow e_i$ и $x_j \leftrightarrow e_j$. Здесь $Q_{i,j}$ — число цепей, в которые входят одновременно элементы e_i и e_j ; $p_q = 1/(\rho_q - 1)$ — вес q -й связи; ρ_q — количество элементов, соединяемых q -й цепью.

Внешним выводам сопоставим элемент e_0 . Соединения с ними элементов из множества E учтем вектором—столбцом взвешенных связей $H = \{h_i/i = \overline{1, N}\}$. Монтажная область внешних выводов обычно фиксирована на периферии типовой конструкции, т. е. расположение контактных площадок является заданным. Контактные площадки, кроме выводов питания и земли, — инвариантны, поэтому расстояние от элемента e_i до внешних выводов можно приближенно определять как расстояние от вертикального (горизонтального) ряда, где установлен этот элемент, до контактной группы.

Для некоторого размещения суммарная взвешенная длина соединений

$$F(a) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{i,j} d_{i,j} + \sum_{i=1}^N h_i m_i, \quad (10.3)$$

где $d_{i,j}$ — элемент матрицы D_r , определяет расстояние между позициями установки конструктивных элементов e_i и e_j ; m_i — номер вертикального ряда, в котором расположен элемент e_i (рис. 10.1).

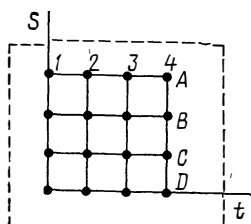


Рис. 10.1. Модель поля размещения платы субблока

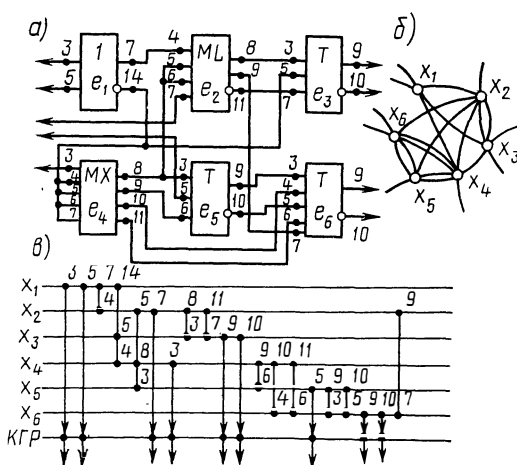


Рис. 10.2. Фрагмент схемы (а), кусок графа (б) и представление цепей схемы лесом T (в)

Отметим, что первый член выражения (10.3) соответствует полусумме элементов матрицы геометрии D_r (см. § 8.3).

Теперь задача заключается в минимизации $F(a)$ на множестве размещений A . Это один из вариантов задачи квадратичного назначения, точное решение которой возможно, например, методом ветвей и границ. Алгоритмы, реализующие этот метод, могут использоваться на практике при $N = 15 \div 20$.

На рис. 10.2 показан фрагмент (а) схемы и кусок графа (б) этой схемы. Для подсчета элементов матрицы R цепи схемы представлены лесом на контурной сетке (рис. 10.2, в). Матрица связности R подграфа, входящего в кусок, и вектор-столбец H имеют вид

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 2 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 1,5 & 2 \\ 0 & 0,5 & 0 & 1,5 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}; \quad H = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

§ 10.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ

Решающее правило большинства последовательных алгоритмов размещения по связности основано на предположении, что наиболее связанные элементы следует располагать максимально близко друг к другу. На каждом шаге алгоритма выбирается в соответствии с некоторой оценкой очередной элемент и позиция для его установки. Связность размещаемых элементов будем задавать матрицей R , а расстояние между позициями их установки — матрицей D_r .

Позиции некоторых элементов могут быть заранее указаны разработчиком, исходя из схемотехнических требований. Если таких фиксированных элементов нет, то должно быть задано правило выбора начального элемента и позиции его установки. Например, начальное размещение может быть получено установкой в центральную позицию элемента с максимальным числом связей или в ряду позиций, ближайших к контактной группе, элементов, имеющих максимальную связность с нею.

Для выбора размещаемого элемента используют различные оценки степени связности. Рассмотрим часть из них. Пусть на k -м шаге алгоритма размещено $E_k \subset E$ элементов, т. е. имеется некоторое частичное размещение. Множества элементов E и установочных позиций T распадаются на непересекающиеся подмножества E_k, T_k — размещенных элементов и занятых ими позиций и \bar{E}_k, \bar{T}_k — неразмещенных элементов и свободных позиций. Основными решающими правилами для выбора элемента на $(k + 1)$ -м шаге алгоритма являются максимумы: связности с предыдущим размещенным элементом; суммарной связности со всеми размещенными элементами; разности связей с размещенными и неразмещенными элементами.

Если для оценки связности элементов схемы используется матрица взвешенных связей R , то соответствующие решающие правила формулируются следующим образом:

$$\max_{i \in \bar{J}_k} \{r_{i, j_k}\}; \quad (10.4)$$

$$\max_{i \in \bar{J}_k} \left\{ \sum_{j \in J_k} r_{i, j} \right\}; \quad (10.5)$$

$$\max_{i \in \bar{J}_k} \left\{ \sum_{j \in J_k} r_{i, j} - \sum_{j \in \bar{J}_k} r_{i, j} \right\}, \quad (10.6)$$

где j_k — номер столбца матрицы R , соответствующий индексу последнего размещенного элемента; J_k и \bar{J}_k — множества индексов размещенных и неразмещенных элементов, сопоставленных их номерам из подмножеств E_k и \bar{E}_k .

Выбор позиции для установки очередного элемента должен вести к минимизации критерия размещения. При использовании критерия минимума суммарной взвешенной длины соединений оценкой качества позиции может служить часть «цены назначения» i -го элемента в j -ю позицию, отражающая суммарную длину его связей с уже размещен-

ными элементами, в том числе и с контактной группой. Этот показатель

$$F_i^f = \sum_{j \in J_k} r_{i,j} d_{f,t(j)} + m_f h_i, \quad (10.7)$$

где $t(j) \in T_k$ — индекс позиции j -го размещенного элемента.

Для размещения i -го элемента среди незанятых позиций выбирается та, которая обеспечивает

$$\min_{i \in \bar{T}_k} \left\{ \sum_{j \in J_k} r_{i,j} d_{f,t(j)} + m_f h_i \right\}. \quad (10.8)$$

Исходными данными для алгоритма, основанного на рассмотренных выше правилах выбора элемента и позиции его установки, являются матрицы \mathbf{R} и \mathbf{D}_r , вектор взвешенных связей элементов с внешними выводами \mathbf{H} , множества индексов размещенных и неразмещенных элементов J_k и \bar{J}_k , множества индексов занятых и свободных позиций T_k и \bar{T}_k .

Основные пункты алгоритма последовательного размещения по связности.

1. По одному из решающих правил (10.4, 10.5, 10.6) находим индекс очередного размещаемого элемента, например

$$i_{k+1} = \max_{i \in \bar{J}_k} \left\{ \sum_{j \in J_k} r_{i,j} \right\}.$$

2. Определяем позицию для установки этого элемента

$$f_{k+1} = \min_{i \in \bar{T}_k} \left\{ \sum_{j \in J_k} r_{i,j} d_{j,i(j)} + m_f h_i \right\}.$$

Здесь $l = i_{k+1}$.

3. Заносим индекс элемента в массив J_k , а позиции — в массив T_k , исключая их из массивов \bar{J}_k , \bar{T}_k :

$$J_k = J_k \cup i_{k+1}; \bar{J}_k = \bar{J}_k \setminus i_{k+1}; T_k = T_k \cup f_{k+1}; \bar{T}_k = \bar{T}_k \setminus f_{k+1}.$$

4. Проверяем, все ли элементы размещены: $|J_k| = N$. Если условие выполняется, то переходим к п. 5, иначе — к п. 1.

5. Конец работы алгоритма.

Для сокращения времени вычислений в п. 2 целесообразно исследовать те из свободных позиций, которые находятся в окрестности занятых.

В работе [3] отмечается, что аналогичные алгоритмы могут быть использованы для размещения разногабаритных элементов, размеры которых кратны или близки к кратным. Шаг установки элементов выбирается в соответствии с размерами наименьшего конструктивного элемента (рис. 10.3). При размещении элемента, у которого хотя бы один размер больше размера позиции, в алгоритме необходимо прове-

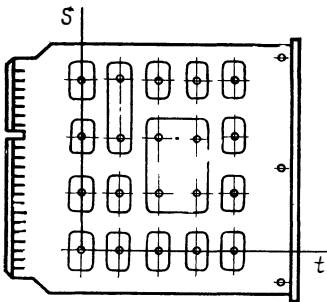


Рис. 10.3. Субблок с элементами кратных размеров

рять возможность установки элемента в рассматриваемую позицию. После размещения такого элемента в список занятых заносятся все покрываемые им позиции. Алгоритмы последовательного размещения по связности отличаются высоким быстродействием, но, как правило, приводят к результатам, далеким от оптимальных.

Качество решения можно повысить, используя более точный показатель «цены назначения» элемента в некоторую позицию и соответствующую стратегию выбора элемента и позиции. Таким показателем может служить нижняя граница функционала (10.3) при некотором частичном размещении. Упростим выражение для $F(a)$, отбросив в нем линейную часть. Составляющими этого функционала при частичном размещении являются суммы длин связей размещенных элементов между собой, размещаемого элемента с размещенными и неразмещенными, неразмещенных элементов с размещенными и друг с другом. Первая составляющая при каждом частичном размещении одинакова для всех установок элементов $i \in \bar{J}_k$ в позиции $f \in \bar{T}_k$. При определении «цены назначения» i -го элемента в f -ю позицию на $k + 1$ -м шаге процесса размещения будем подсчитывать длину связей размещаемого элемента с размещенными и нижние границы длин связей размещаемого элемента с неразмещенными и неразмещенных элементов между собой.

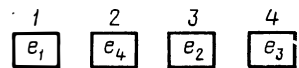


Рис. 10.4. Предполагаемое оптимальное расположение неразмещенных элементов e_2, e_3, e_4 относительно элемента e_1

Нижняя граница суммарной длины связей i -го элемента с неразмещенными предполагает, что последние будут расположены оптимально относительно i -го элемента, но не относительно друг друга.

Рассмотрим один из способов оценки нижних границ. Напомним, что элементы i -й строки матрицы \mathbf{R} отражают связность i -го элемента с остальными, а элементы f -й строки матрицы \mathbf{D}_f — расстояние от f -й позиции до других. Сумма поэлементного произведения i -й строки матрицы \mathbf{R} и f -й строки матрицы \mathbf{D}_f без элементов $r_{i,i}$ и $d_{f,f}$ равна суммарной длине связей этого элемента со всеми остальными при установке его в f -ю позицию. Скалярное произведение векторов будет минимальным, если элементы одного из них упорядочить по возрастанию, а другого — по убыванию. Пусть $N = M = 4$, т. е. необходимо разместить четыре элемента в четыре позиции. Предположим, что элементы первых строк матриц \mathbf{R} и \mathbf{D}_f в результате упорядочивания предполагаются следующим образом: $R_1 = r_{13}, r_{14}, r_{12}$ ($r_{13} < r_{14} < r_{12}$) и $D_1 = d_{14}, d_{12}, d_{13}$ ($d_{14} > d_{12} > d_{13}$). Тогда скалярное произведение $(R_1, D_1) = r_{13}d_{14} + r_{14}d_{12} + r_{12}d_{13}$ является нижней границей суммарной длины связей первого элемента при установке его в первую позицию (предполагаемое расположение неразмещенных элементов относительно первого показано на рис. 10.4).

Нижняя граница суммарной длины связей неразмещенных элементов e_2, e_3, e_4 может быть вычислена как минимум скалярного произведения наддиагональных элементов матриц \mathbf{R} и \mathbf{D}_f без элементов первых строк. Обозначим его как (\bar{R}, \bar{D}) . Очевидно, что при отсутствии

начального размещения сумма нижних границ $(R_1, D_1) + (\bar{R}, \bar{D})$ будет характеризовать «цену назначения» первого элемента в первую позицию.

Выбор элемента и позиций его установки может выполняться по специальной матрице $\mathbf{B} = \|b_{i,f}\|_{(N-K) \times (N-K)}$, элементы которой определяют «цену назначения» i -го конструктивного элемента в f -ю позицию при условии, что K элементов уже размещены. Матрица \mathbf{B} формируется заново после размещения каждого конструктивного элемента. Существуют различные стратегии выбора элемента и позиций по матрице \mathbf{B} . Рассмотрим алгоритм, использующий принцип максимина (см. [1]). Исходные данные для работы алгоритма — матрицы \mathbf{R} и \mathbf{D}_r , множества индексов размещенных и неразмещенных элементов J_h и \bar{J}_h , множества индексов занятых и свободных позиций T_h и \bar{T}_h .

Основные пункты последовательного алгоритма размещения, использующего принцип максимина.

1. Формируем матрицу оценок \mathbf{B} . Для каждого $i \in \bar{J}_h$ и $f \in \bar{T}_h$ вычисление элемента $b_{i,f}$ заключается в выполнении следующих подпунктов:

1.1. Исключаем из i -й строки матрицы \mathbf{R} элемент $r_{i,i}$ и из f -й строки матрицы \mathbf{D}_r элемент $d_{f,f}$.

1.2. Элементы i -й строки матрицы \mathbf{R} и f -й строки матрицы \mathbf{D}_r разбиваем на вектора R_i и \bar{R}_i , D_f и \bar{D}_f в соответствии с принадлежностью индексов элементов $j \in J_h$ или $j \in \bar{J}_h$, а индексов позиций $t \in T_h$ или $t \in \bar{T}_h$.

1.3. Выполняем сортировку элементов вектора R_i в соответствии с позициями их установки в векторе D_f (обозначим этот вектор R'_i) и находим скалярное произведение $b'_{i,f} = (R'_i, D_f)$, т. е. определяем суммарную длину соединений размещаемого элемента с размещенными по (10.7) без линейного члена.

1.4. Упорядочиваем элементы вектора \bar{R}_i по возрастанию, а вектора \bar{D}_f по убыванию, обозначим полученные векторы \bar{R}''_i и \bar{D}''_f .

1.5. Находим нижнюю границу суммарной длины связей i -го элемента при установке его в f -ю позицию с неразмещенными элементами как скалярное произведение векторов \bar{R}''_i и \bar{D}''_f , т. е. $b''_{i,f} = (\bar{R}''_i, \bar{D}''_f)$.

1.6. Считая i -й элемент размещенным, из наддиагональных элементов матрицы \mathbf{R} , определяющих связанность неразмещенных конструктивных элементов, формируем вектор $\bar{R} = \{r_{n,m} : n, m \in \bar{J}_h \setminus i \text{ и } m = n + 1\}$.

1.7. Считая f -ю позицию занятой, из наддиагональных элементов матрицы \mathbf{D}_r формируем вектор расстояний незанятых позиций $\bar{D} = \{d_{n,m} : n, m \in \bar{T}_h \setminus f \text{ и } m = n + 1\}$.

1.8. Упорядочиваем элементы вектора \bar{R} по возрастанию, а вектора \bar{D} по убыванию. Обозначим их \bar{R}''' и \bar{D}''' .

1.9. Находим нижнюю границу суммарной длины связей неразмещенных элементов между собой: $b'''_{i,f} = (\bar{R}''', \bar{D}''')$.

1.10. Вычисляем элемент $b_{i,f} = b'_{i,j} + b''_{i,f} + b'''_{i,f}$.

2. В матрице \mathbf{B} определяем минимальные элементы каждой строки и каждого столбца:

$$B_i = \left\{ \min_{f=1, N-K} b_{i,f} \right\}; B_f = \left\{ \min_{i=1, N-K} b_{i,f} \right\}.$$

3. Выбираем максимальный из минимальных элементов строк и столбцов $b_{q,p} = \max \{B_i, B_f\}$.

Здесь q и p — индексы размещаемого на данном шаге работы алгоритма элемента и позиции его установки.

4. Заносим индекс элемента в множество J_k , а позиции — в множество T_k , исключая их из \bar{J}_k и \bar{T}_k :

$$J_k = J_k \cup q; \bar{J}_k = \bar{J}_k \setminus q; T_k = T_k \cup p; \bar{T}_k = \bar{T}_k \setminus p.$$

5. Проверяем, все ли элементы размещены: $|J_k| = N$. Если условие выполняется, то переходим к п. 6, иначе — к п. 1.

6. Конец работы алгоритма.

§ 10.3. УЛУЧШЕНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЕРЕСТАНОВКОЙ МОДУЛЕЙ

Алгоритмы этой группы используют ту же идею, что и итерационные алгоритмы улучшения компоновки (см. § 9.3). Для улучшения некоторого начального размещения меняются местами те элементы, перестановка которых приводит к оптимизации критерия качества. Процесс заканчивается, если не существует перестановок, улучшающих критерий качества, или когда разность значения критерия для двух соседних итераций будет меньше некоторого заданного порога ε .

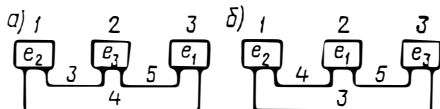


Рис. 10.5. Варианты размещения элементов

Реализация итерационных алгоритмов связана с большим объемом вычислений. Поэтому применяют в основном алгоритмы, использующие парные и упорядоченные перестановки. Положим для определенности, что критерием качества размещения является минимум суммарной длины соединений $F(a)$. Соединения элементов схемы определены матрицей \mathbf{R} , а расстояния между установочными позициями — матрицей \mathbf{D}_r . Имеется некоторое начальное размещение. Элементы матрицы \mathbf{R} должны располагаться в соответствии с порядковыми номерами (индексами) позиций их установки. Например, для начального размещения трех элементов (рис. 10.5, а) матрица

$$\mathbf{D}_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

а в матрице \mathbf{R} первая строка должна характеризовать связность элемента e_2 с элементами e_3 и e_1 , вторая строка — элемента e_3 с элементами e_2 и e_1 , третья строка — элемента e_1 с элементами e_2

и e_3 . Таким образом, для указанного размещения матрица $\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 5 \\ 4 & 5 & 0 \end{vmatrix}$.

Переставляя элементы e_i и e_j , необходимо в матрице \mathbf{R} менять местами соответствующие им строки и столбцы.

Тот же результат, в смысле возможности оценки $F(a)$ поэлементным перемножением матриц \mathbf{R} и \mathbf{D}_r , можно получить, сохраняя неизменной матрицу \mathbf{R} и располагая элементы матрицы \mathbf{D}_r в соответствии с индексами установленных в них элементов. В этом случае для рис. 10.5, *a* матрицы \mathbf{R} и \mathbf{D}_r соответственно будут иметь вид

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 0 & 4 & 5 \\ 4 & 0 & 3 \\ 5 & 3 & 0 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{D}_r = \begin{vmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

В дальнейшем после изменения позиций элементов e_i и e_j корректируем матрицу \mathbf{D}_r посредством перестановки в ней строк и столбцов, определяющих расстояния переставляемых элементов до остальных. Например, при перестановке элементов e_1 и e_3 , как показано на рис. 10.5, *б*, в матрице \mathbf{D}_r необходимо поменять местами первые и третьи строки и столбцы. Тогда матрица

$$\mathbf{D}_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \end{vmatrix}.$$

Получим выражение для подсчета приращения функционала $\Delta F = F_0 - F_1$. Запишем в общем виде матрицы \mathbf{R} и \mathbf{D}_r при установке элемента e_1 в первую позицию, e_2 — во вторую, e_3 — в третью и e_4 — в четвертую:

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} 0 & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & 0 & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & 0 & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & 0 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{D}_r = \begin{vmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 \end{vmatrix}.$$

Для данного размещения суммарная взвешенная длина соединений $F_0 = r_{12}d_{12} + r_{13}d_{13} + r_{14}d_{14} + r_{23}d_{23} + r_{24}d_{24} + r_{34}d_{34}$.

Поменяем местами элементы e_1 и e_3 . Тогда в матрице \mathbf{D}_r переставим первые и третьи строки и столбцы и получим

$$\mathbf{D}'_r = \begin{vmatrix} 0 & d_{32} & d_{31} & d_{34} \\ d_{23} & 0 & d_{21} & d_{24} \\ d_{13} & d_{12} & 0 & d_{14} \\ d_{43} & d_{42} & d_{41} & 0 \end{vmatrix}.$$

Для такого размещения значение функции качества $F_1 = r_{12}d_{32} + r_{13}d_{31} + r_{14}d_{34} + r_{23}d_{21} + r_{24}d_{24} + r_{34}d_{14}$. Найдем приращение

функции качества $\Delta F = r_{12} (d_{12} - d_{32}) + r_{14} (d_{14} - d_{34}) + r_{23} (d_{23} - d_{21}) + r_{34} (d_{34} - d_{14})$.

После несложных преобразований получим $\Delta F = (r_{12} - r_{32}) (d_{12} - d_{32}) + (r_{14} - r_{34}) (d_{14} - d_{34})$. В общем виде

$$\Delta F = \sum_s (r_{i,s} - r_{j,s}) (d_{i,s} - d_{j,s}); s \neq i, j. \quad (10.9)$$

Здесь s — индекс элемента, не участвующего в перестановке.

В итерационных алгоритмах парных перестановок используют различные способы упорядочивания переборных для уменьшения числа возможных перестановок. Один из таких способов заключается в следующем: для данного размещения определяется суммарная длина связей F_i каждого элемента с остальными как скалярное произведение соответствующих строк матриц \mathbf{R} и \mathbf{D}_r :

$$F_i = \sum_{j=1}^N r_{i,j} d_{i,j}. \quad (10.10)$$

Номера (индексы) элементов упорядочивают по убыванию F_i :

$$J = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}; F_1 \geq F_2 \geq \dots \geq F_N.$$

На очередном шаге алгоритма рассматривают возможные перестановки элемента i_k с элементами из подмножества $\{i_{k+1}, i_{k+2}, \dots, i_N\}$. После окончания цикла итераций подсчитывают новые значения F_i и процесс может быть повторен.

Основные пункты итерационного алгоритма парных перестановок. Исходными данными для работы алгоритма являются матрицы \mathbf{R} и \mathbf{D}_r .

1. Определяем порядок просмотра элементов. Для существующего размещения по (10.10) находим суммарную длину связей F_i каждого элемента. Упорядочиваем индексы элементов по убыванию F_i , т. е. формируем последовательность индексов элементов $J = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$.

2. Для текущего элемента последовательности $i_k \in J$ по (10.9) определяем приращение $\Delta F_{i_k, j}$; $j \in J_{k+1} = \{i_{k+1}, \dots, i_N\}$.

3. Находим $\Delta F_{i_k, i_q} = \max_{j \in J_{k+1}} \Delta F_{i_k, j}$.

4. Проверяем условие $\Delta F_{i_k, i_q} > 0$. Если условие выполняется, то в последовательности J меняем местами индексы i_k и i_q , в противном случае переходим к п. 6.

5. Корректируем матрицу \mathbf{D}_r , т. е. переставляем строки и столбцы с индексами i_k и i_q .

6. Проверяем условие окончания цикла итераций $|J_{k+1}| = 0$. Если условие выполняется, то переходим к п. 7, иначе выполняем $k = k + 1$ и переходим к п. 2.

7. Проверяем условие окончания итерационного процесса $\Delta F/F_{k-1} \leq \varepsilon$. Если условие выполняется, то переходим к п. 8, иначе — к п. 1.

8. Конец работы алгоритма.

Для сокращения объема вычислений в ряде алгоритмов парных перестановок исследуются только возможные перестановки данного элемента с соседними или находящимися в его окрестностях.

Оценка суммарной длины соединений по (10.3) не точна, так как используется приближенная модель схемы (взвешенный граф), а расстояния определяются между центрами элементов, а не их контактами. Напомним, что во взвешенном графе каждая цепь представляется полным подграфом, что приводит к неточной оценке числа связей между элементами или частями схемы (см. § 8.3).

Более точной моделью схемы является гиперграф, представляющий схему с точностью до выводов элементов. Реальная длина соединений при установке элемента в позицию монтажного пространства может быть определена точно, если рассчитывать трассы соответствующих соединений. Ясно, что такую оценку можно сделать только для соединений размещаемого элемента с размещенными. Если учесть, что расчет трасс необходимо выполнять для всех возможных вариантов установки каждого неразмещенного элемента или всех возможных перестановок, ясно, что это потребует слишком большого машинного времени.

Оценка минимальной длины монтажных соединений может быть выполнена с помощью алгоритма построения минимальных деревьев Прима. Однако затраты машинного времени на оценку вариантов установки также довольно велики. Для оценки длины соединений цепи при ортогональном монтаже можно использовать полупериметр прямоугольника, проходящего через выводы исследуемого и размещенных элементов, принадлежащих этой цепи. Полупериметры суммируются по всем цепям, связывающим размещаемый элемент с размещенными. Указанные способы не нашли пока широкого применения, так как оценка суммарной длины соединений по (10.3) необходима только для сравнения различных вариантов размещения.

Рассмотренные выше алгоритмы размещения могут при соответствующей модификации использовать и другие критерии оптимизации. Однако, как отмечалось выше, ни один из перечисленных в § 10.1 критериев качества размещения не учитывает в полной мере требования трассировки.

Нередко ручное размещение элементов конструктором создает лучшие условия для трассировки, чем машинное. При ручном размещении конструктор стремится обычно располагать в соседних позициях наиболее связанные элементы, входящие в функционально законченную группу, следя в то же время за достаточно равномерным распределением соединений по монтажному пространству. Эти принципы реализованы в ряде эвристических алгоритмов итерационного типа. Идея одного из таких алгоритмов заключается в последовательном разбиении схемы на две части (см. § 9.3), улучшении внутренней связности этих частей схемы и закреплении их за определенной областью монтажного пространства. Далее выполняется деление каждой части, т. е. процесс продолжается, пока не будет определена позиция каждого элемента. Для улучшения внутренней связности частей схемы может применяться итерационный алгоритм компоновки, использующий модель схемы в виде гиперграфа. При некоторой его модификации можно учесть фактор «равномерного» распределения соединений.

§ 10.4. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ

Трассировка заключается в определении конкретной геометрии печатного или проводного монтажа, реализующего соединения между элементами схемы. Исходными данными для трассировки являются список цепей, метрические параметры и топологические свойства типовой конструкции и ее элементов (см. § 8.3) и результаты решения задачи размещения, по которым находятся координаты выводов элементов. Формальная постановка задачи трассировки и методы ее решения в значительной степени зависят от вида монтажа (проводной или печатный) и конструктивно-технологических ограничений, определяющих метрические параметры и топологические свойства монтажного пространства.

В типовых конструкциях, начиная с блока и выше, довольно широко используется проводной монтаж, что объясняется высокой трудоемкостью проектирования и сложностью изготовления печатного монтажа. Изготовление печатного монтажа усложняется с увеличением размеров коммутационных плат, а надежность его падает. Проводной монтаж может осуществляться по прямым, соединяющим выводы элементов, или с помощью жгутов, которые прокладывают в специальных каналах. Основные ограничения — количество проводников, которые можно подсоединять к одному выводу (обычно не более трех), и число проводов в каждом жгуте — *пропускная способность канала*.

Трассировка проводного монтажа. Заключается в определении порядка соединения выводов в соответствии с принципиальной электрической схемой и с учетом заданных ограничений. Критерием качества, как правило, является минимум суммарной длины соединений. Нахождение порядка соединения выводов элементов внутри цепи сводится к задаче построения на фиксированных вершинах минимального покрывающего или связывающего дерева. Будем использовать модель схемы в виде графа, в котором выводам элементов сопоставлены вершины и на этих вершинах строится полный подграф (см. § 8.3, рис. 8.15, а). Таким образом, каждая цепь представляется отдельной компонентой связности. Необходимо построить минимальные покрывающие деревья на тех компонентах связности, число вершин в которых больше двух. Напомним, что в результате размещения элементов определены координаты их выводов в соответствующей метрике, т. е. вершины компонент связности отображены в граф решетки монтажного пространства.

Расстояние между каждой парой вершин полного подграфа для проводников, идущих по кратчайшему направлению:

$$d_{i,j} = \sqrt{(S_i - S_j)^2 + (t_i - t_j)^2}, \quad (10.11)$$

для ортогональной трассировки

$$d_{i,j} = |S_i - S_j| + |t_i - t_j|. \quad (10.12)$$

Здесь S_i , t_i и S_j , t_j — координаты i -й и j -й вершин графа.

В § 8.3 отмечалось, что на n вершинах можно построить $t_n = n^{n-2}$ различных деревьев. В связи с этим точное решение задачи построения минимального дерева методом полного перебора нецелесообразно. Существуют приближенные алгоритмы решения этой задачи, дающие результаты, достаточно близкие к оптимальным.

Рассмотрим основные пункты алгоритмов Краскала и Прима.

Алгоритм Краскала. 1. Для всех пар вершин полного подграфа $G_n = (X, U)$; $|X| = n$; $|U| = m$ по (10.11) или (10.12) рассчитываем длины соединяющих их ребер; $d(u_k) = d_{i,j}$, где $i = \overline{1, n}$; $j = i + 1$; $k = \overline{1, m}$; $m = n(n - 1)/2$.

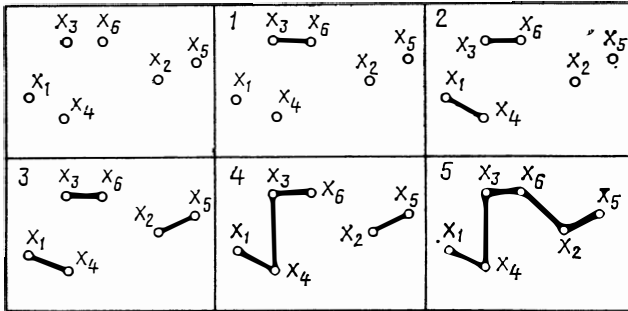


Рис. 10.6. Построение минимального дерева алгоритмом Краскала

2. Упорядочиваем ребра графа по возрастанию их длин: $U' = \{u_{i_1}, u_{i_2}, \dots, u_{i_m}\}$; $d_{i_1} \leq d_{i_2} \leq \dots \leq d_{i_m}$.

3. Последовательно просматривая множество U' , соединяем вершины теми ребрами, которые не образуют цикла с ребрами, уже вошедшими в дерево.

При работе алгоритма возможно появление на каких-то шагах нескольких несвязанных поддеревьев, которые затем соединяются, образуя одну компоненту связности. На рис. 10.6 показан процесс построения минимального покрывающего дерева алгоритмом Краскала.

Алгоритм Прима. Алгоритм Прима использует тот же принцип соединения ближайших вершин, что и алгоритм Краскала, но на каждом шаге к строящемуся дереву присоединяется ближайшая изолированная вершина. В алгоритме Прима учтем ограничение на количество линий связи, присоединяемых к каждому выводу. Исходными данными для работы алгоритма являются матрица расстояний $D_r = \|d_{i,j}\|_{n \times n}$, элементы которой определяются по (10.11) или (10.12), и допустимое количество проводников, подключаемых к выводу $m_{\text{доп}}$.

Основные пункты алгоритма. 1. Находим минимальный элемент матрицы $d_{q,p} = \min d_{i,j}$; $i, j = \overline{1, n}$; $i \neq j$. Номера строки и столбца q и p , на пересечении которых он находится, определяют номера вершин, соединяемых ребром.

2. Заносим номера вершин в множество $X' = \{q, p\}$, а построенное ребро в множество $U' = \{U_{q,p}\}$.

3. Подсчитываем число ветвей k_q и k_p , принадлежащих соединяемым на данном шаге вершинам.

4. Проверяем условие $k_q < m_{\text{доп}}$, $k_p < m_{\text{доп}}$. Индексы вершин, для которых это условие не выполняется, заносим в множество X'' .

5. Находим $d_{r,t} = \min d_{i,j}$; $i \in X' \& i \notin X''$; $j \notin X'$, т. е. среди еще не вошедших в дерево вершин находим вершину x_i , минимально удаленную от некоторой вершины дерева v_r .

6. Дополняем множества $X' : X' \cup i$; $U' = U' \cup u_{r,i}$.

7. Проверяем, все ли вершины графа соединены ветвями $|U'| = (n - 1)$.

Если условие выполняется, то переходим к п. 8, иначе — к п. 3.

8. Конец работы алгоритма.

Трассировка при печатном монтаже.

В монтажном пространстве, представляющем собой совокупность коммутационных плоскостей, определены координаты конструктивных элементов и их выводов; заданы метрические параметры и топологические свойства

монтажного пространства (ширина проводников и зазоров между ними, координаты и размеры контактных площадок, число слоев МПП и переходы со слоя на слой, координаты и размеры областей, запрещенных для трассировки). Множество цепей принципиальной схемы разбивает множество B выводов элементов на непересекающиеся подмножества B_i так, что $B = \{B_i / i = \overline{1, M}\}$, а $B_i = \{b_{i,k} / k = \overline{1, k_i}\}$, где M — число цепей; k_i — число контактов, соединяемых i -й цепью.

Необходимо реализовать множество B_i в виде множества A_i таких областей (рис. 10.7), которые удовлетворяли бы следующим требованиям:

1. $\bigcup_{i=1}^M A_i \in E$ — все соединения должны быть выполнены в монтажной области $E = \{E_r / r = \overline{1, R}\}$. Здесь R — число слоев.

2. $\forall A_i, A_j \in E_r (A_i \cap A_j = \emptyset)$ — в каждом слое проводники не должны иметь пересечений.

3. $\forall A_i, A_j \in E_r (\rho(A_i, A_j) \geq \rho_0)$ — расстояние между проводниками не должно быть меньше допустимого зазора ρ_0 .

4. $d(A_i) \geq d_0$ — ширина проводника не должна быть меньше допустимой.

5. $(\forall A_{i,k} \equiv b_{i,k}) \in A_i$ — все контакты i -й цепи должны лежать на i -м проводнике.

6. $(\forall A_i \in E_r) (\forall A_j \in E_t) (A_i \cap A_j = \emptyset \vee A_i \cap A_j > R_n)$; $E_r, E_t \in E$ — если необходимо выполнить переход со слоя r на слой t , пересечение областей должно иметь размер, достаточный для конструктивной реализации межслойного перехода.

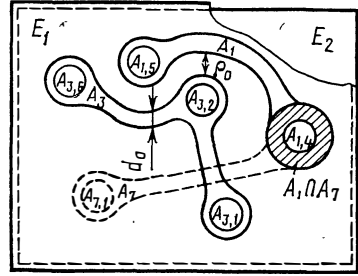


Рис. 10.7. Реализация соединений в монтажном пространстве

Задача одновременной оптимизации всех соединений пока не решена, поэтому трассировка сводится к последовательному построению бесперекрестного леса, каждое дерево которого реализует соответствующую электрическую цепь, и определению конфигурации соединения. Система покрывающих деревьев должна быть размещена в монтажном пространстве типовой конструкции, заданном своей математической моделью (см. § 8.3).

Трассировка печатных соединений предполагает выполнение следующих этапов (см. [21]): 1. Определение порядка соединения выводов внутри цепи. 2. Распределение соединений по слоям печатной платы. 3. Нахождение последовательности проведения соединений в каждом слое. 4. Получение конфигурации проводников.

При решении задачи трассировки используются следующие основные критерии: 1. Минимум суммарной длины всех проводников. 2. Минимум числа их пересечений. 3. Минимум изгибов проводников. 4. Минимум числа слоев МПП и переходов со слоя на слой. 5. Минимальная длина параллельных участков соседних проводников. 6. Равномерное распределение проводников по монтажной области.

Критерий 1 приводит к уменьшению задержки распространения сигналов по линиям связи, критерии 2, 3 и 4 повышают надежность и технологичность печатной платы, критерии 5 и 6 увеличивают помехоустойчивость конструктивной реализации схемы и вероятность проведения всех трасс. Указанные критерии не удается объединить в обобщенный показатель качества, поэтому на каждом этапе трассировки для конкретной технологии учитывается один наиболее важный критерий или указывается их приоритет.

Определение порядка соединения выводов в цепи. Задача сводится к построению минимального связывающего дерева. При печатном монтаже соединения можно выполнять не только по выводам, но и в любой точке проводника. Поэтому построение минимального связывающего дерева формулируется как задача Штейнера: к множеству $P = \{p_i \mid i = \overline{1, n}\}$ основных добавить множество $Q = \{q_j \mid j = \overline{1, m}\}$ дополнительных точек и построить покрывающее дерево минимальной длины. Здесь множество P основных точек сопоставлено выводам цепи, а дополнительные точки представляют собой места соединений типа проводник — проводник. При определении положения дополнительных точек можно рассматривать только узлы координатной решетки, построенной на n заданных точках. Тогда число таких точек $|Q| \leq n - 2$. Метод точного решения задачи Штейнера для реальных цепей требует больших затрат машинного времени.

Распределение соединений по слоям. В результате выполнения первого этапа трассировки электрическая цепь представляется минимальным покрывающим деревом, являющимся плоским графом. Однако совокупность минимальных деревьев (лес) может иметь пересечения между ребрами, принадлежащими разным деревьям, так как последние строятся на фиксированных вершинах и существуют ограничения на размер монтажного поля, ширину проводников

и зазор между ними. В то же время в каждом слое печатные проводники не должны пересекаться.

При ортогональной трассировке возможно распределение соединений по двум слоям. Каждая цепь представляется в виде ортогонального покрывающего дерева, вертикальные ветви которого проводятся в одном слое, а горизонтальные — в другом. На рис. 10.8 показаны минимальное (а) и ортогональное Штейнерово (б) деревья. В узлах дерева необходимо делать межслойные переходы. Количество переходов оказывается весьма большим, что ухудшает механические параметры печатной платы и снижает надежность схемы.

При трассировке по произвольным направлениям может быть поставлена задача разбиения графа схемы на минимальное количество плоских суграфов или подграфов, каждый из которых реализуется в своем слое. Эта задача была рассмотрена в § 8.2. Основная трудность при такой постановке заключается в построении модели схемы, точно отображающей связность элементов и их топологические свойства.

Распределение соединений по слоям может быть сформулировано как задача правильной раскраски вершин графа пересечений (см. [7]). Предполагаем, что соединение полностью выполняется на одном слое. При ортогональной трассировке на вершинах каждой цепи строится минимальный охватывающий прямоугольник (рис. 10.8, в). Считается, что два соединения пересекаются, если перекрываются соответствующие им прямоугольники.

При представлении цепи минимальным покрывающим деревом необходимо определять, пересекается ли каждая пара ветвей этих деревьев. Для пары ветвей при известных координатах вершин составляются уравнения прямых линий. Исследуя эти уравнения методами аналитической геометрии, определяют возможность пересечения соответствующих соединений.

Вершины графа пересечений сопоставляются соединениям, ребра устанавливают возможность их пересечения. Раскраска вершин графа будет правильной, если никакие смежные вершины не окрашены одним цветом. Минимальное количество цветов, которое необходимо для правильной раскраски, определяет число слоев МПП.

Перекрытие прямоугольников, построенных на вершинах цепей, или пересечение минимальных покрывающих деревьев еще не означает, что соответствующие цепи нельзя протрассировать на одном слое без пересечений. На рис. 10.8 показаны перекрывающиеся прямоугольники (в) и непересекающиеся цепи (г), соединяющие охватываемые ими вершины; пересекающиеся минимальные деревья (д) и непересекающиеся трассы (е), соединяющие те же вершины.

При учете возможности проведения «конфликтующих» проводников без пересечения за счет огибания, распределение соединений по

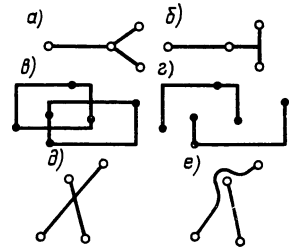


Рис. 10.8. Минимальное (а) и ортогональное Штейнерово (б) деревья, перекрывающиеся прямоугольники (в) и непересекающиеся цепи (г), пересекающиеся деревья (д) и непересекающиеся трассы (е)

слоям может быть сделано путем объединения проводников, идущих под некоторым углом друг к другу, в группы. Каждая такая группа затем трассируется в своем слое. Например, при ортогональной трассировке ребро $u_{i,j}$ минимального дерева относится к группе «горизонтальных», если $|t_i - t_j| \geq |S_i - S_j|$, и к группе «вертикальных» — в противном случае. Здесь S_i, t_i и S_j, t_j — координаты i -й и j -й вершин дерева (рис. 10.9). Для МПП проводники могут группироваться в соответствии с их принадлежностью некоторым секторам, заданным для каждого слоя. Например, для шестислойной печатной платы определяющими являются секторы, показанные на рис. 10.10. В данную груп-

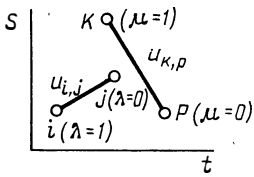


Рис. 10.9. Ребра $u_{i,j}$, $u_{k,p}$ в координатах S и t

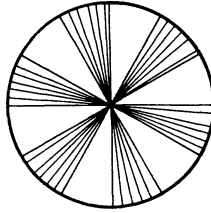


Рис. 10.10. Определяющие секторы для шестислойной печатной платы

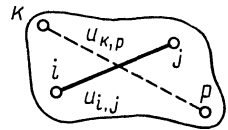


Рис. 10.11. Проведение ребра $u_{k,p}$ огибанием вершин i и j

пу включается проводник, который составляет с осью сектора угол не более $\pm 15^\circ$. Такое распределение проводников приводит к уменьшению паразитных связей цепей, расположенных в соседних слоях.

Трассировка цепей выполняется последовательно и каждая проложенная трасса является препятствием для всех непроведенных. В связи с этим большое значение приобретает задача нахождения последовательности проведения соединений в каждом слое. Сформулируем условия отсутствия пересечений двух ребер и методику определения последовательности их проведения. Рассмотрим два ребра $u_{i,j}$ и $u_{k,p}$ (см. рис. 10.9). Их уравнения в параметрической форме для ребер $u_{i,j}$ и $u_{k,p}$ соответственно имеют вид:

$$\begin{cases} t = \lambda t_i + (1 - \lambda) t_j; \\ S = \lambda S_i + (1 - \lambda) S_j; \end{cases} \quad \begin{cases} t = \mu t_k + (1 - \mu) t_p; \\ S = \mu S_k + (1 - \mu) S_p, \end{cases}$$

где

$$\lambda = \frac{(t_k - t_p)(S_j - S_i) - (S_k - S_p)(t_j - t_i)}{(t_k - t_p)(S_j - S_i) - (S_k - S_p)(t_j - t_i)};$$

$$\mu = \frac{(t_j - t_p)(S_j - S_i) - (S_j - S_p)(t_j - t_i)}{(t_k - t_p)(S_j - S_i) - (S_k - S_p)(t_j - t_i)}.$$

Ребра пересекаются, если

$$0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq \mu \leq 1. \quad (10.13)$$

На основании (10.13) определяется список пересекающихся ребер. Непересекающиеся ребра можно трассировать в произвольном порядке. Для определения последовательности проведения пересекающихся ребер составляют уравнения удлинения при огибании, считая, что огибающий проводник может проходить сколь угодно близко от вершины. Уравнения составляются для всех пар пересекающихся ребер. Для каждого ребра подсчитывается число огибаний и удлинение. Список ребер ранжируется в порядке возрастания числа огибаний. Если у некоторых групп ребер число огибаний одинаково, то первыми проводятся ребра с меньшим удлинением. На рис. 10.11 изображены вершины $i, j \in u_{i,j}$ и $k, p \in u_{k,p}$. Если первым провести ребро $u_{i,j}$, то удлинение ребра $u_{k,p}$ при огибании вершин i и j будет определяться соответственно:

$$\Delta l_{k,p}^i = l_{h,i} + l_{i,p} - l_{k,p}; \quad \Delta l_{k,p}^j = l_{k,j} + l_{j,p} - l_{k,p}.$$

Так как пересечение рассматривается только для пары ребер, необходимо дополнительно проверять отсутствие пересечений с другими близлежащими ребрами. В заключение отметим, что при выполнении соединения полностью в одном слое возрастает средняя длина проводников за счет огибаний.

§ 10.5. ВОЛНОВОЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ И ТРАССИРОВКА В КАНАЛАХ

После выполнения первых трех этапов трассировки множество точек каждой цепи разбито на подмножества пар точек и определен порядок их соединения. При использовании описанной в § 8.3 модели монтажного пространства построение отрезка печатного проводника, соединяющего очередную пару точек, сводится к нахождению кратчайшего пути между вершинами графа монтажного пространства, которые сопоставлены этим точкам цепи.

Большинство алгоритмов построения конфигурации печатных проводников используют идеи волнового алгоритма Ли, который представляет собой процедуру нахождения кратчайшего пути в графе. Рассмотрим основные положения метода, используя для наглядности иллюстрацию дискретное рабочее поле (ДРП).

В работе Ли плоскость монтажа разбивается на элементарные квадраты со стороны, равной расстоянию между осями соседних печатных проводников. При использовании ДРП для описания алгоритма Ли включение элементарной ячейки в путь означает проведение печатного проводника так, как это показано на рис. 10.12, т. е. считаем, что основная координатная сетка смещена на $h/2$, чтобы пути следовали из ячейки в ячейку, а не по координатным линиям ДРП. На каждом шаге алгоритма

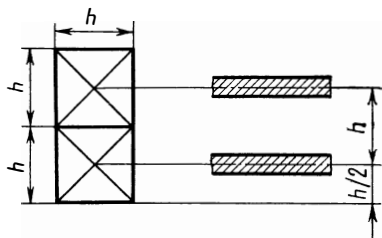


Рис. 10.12. Соответствие ячейки ДРП основной координатной сетке

некоторые ячейки являются занятыми, к ним относятся ячейки, попадающие в области, запрещенные для трассировки: краевые поля монтажной платы, зоны размещения элементов и их выводов, ранее проведенные проводники.

Основой алгоритма Ли является процедура нахождения оптимального в смысле некоторого критерия пути между заданными ячейками

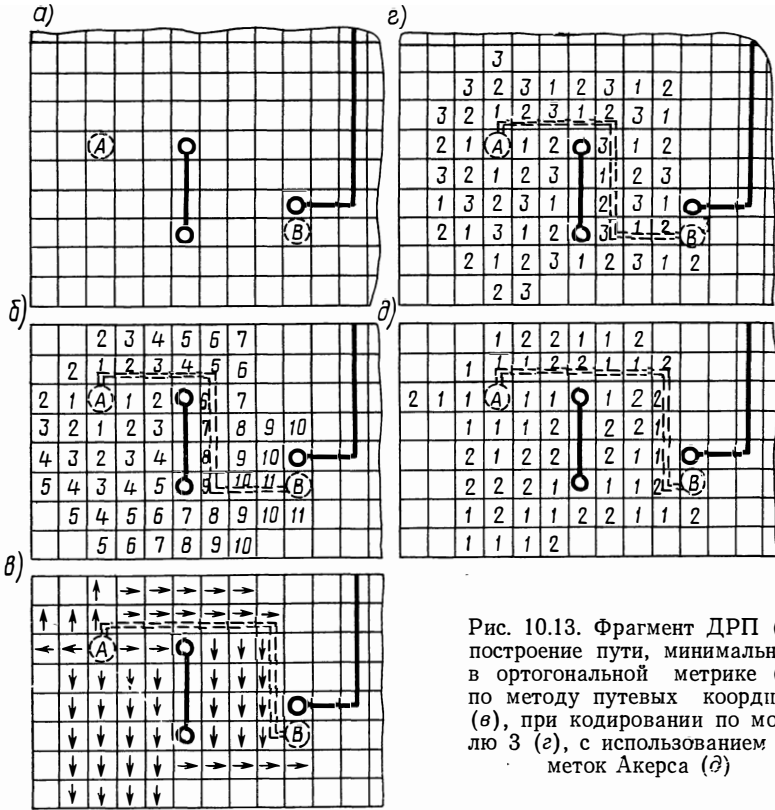


Рис. 10.13. Фрагмент ДРП (а), построение пути, минимального в ортогональной метрике (б), по методу путевых координат (в), при кодировании по модулю 3 (г), с использованием от- меток Акерса (д)

A и B ДРП (рис . 10.13, а) при соблюдении ряда условий. Первая часть алгоритма моделирует процесс распространения волны из ячейки A по свободным ячейкам ДРП. При распространении волны от элементарной площадки A алгоритм последовательно строит $\Phi_1(A)$ — первый, $\Phi_2(A)$ — второй, ..., $\Phi_k(A)$ — k-й ее фронты. Множество ячеек, входящих в i-е фронты, для всех $i \leq k$ называют k-й окрестностью ячейки A — $O_k(A)$. Если проведение пути возможно, то на каком-то $k + 1$ -м шаге окажется, что ячейка $B \in O_{k+1}(A)$. Если в следующий фронт не удастся включить ни одной свободной ячейки, т. е. $O_{k+1}(A) = O_k(A)$, то при данных условиях путь провести невозможно. Таким образом эта часть алгоритма определяет возможность проведения пути между ячейками A и B.

Во второй части алгоритма, начиная с ячейки B , по определенным правилам выполняется переход от ячейки k -го фронта к ячейке $(k - 1)$ -го фронта до ячейки A . Пройденные ячейки составляют искомый путь.

Условия, которые необходимо выполнить при проведении пути, и возможность оценки его оптимальности должны быть заложены в правила, по которым движется фронт волны. Для ячеек дискретного поля устанавливаются отношения соседства. Распространение волны заключается в присваивании ячейкам, соседним с ячейкой предыдущего фронта, значения весовой функции. Вес ячейки k -го фронта P_k является функцией веса ячейки $(k - 1)$ -го фронта. В общем случае к весам предъявляется требование $P_{k-1} \neq P_k \neq P_{k+1}$.

В большинстве модификаций алгоритма Ли на веса накладывается ограничение $P_k > P_{k-1}$. В этом случае проведение пути заключается в переходе от ячейки B к ячейке A таким образом, чтобы значение P_k монотонно убывало. При этом возможен вариант, при котором несколько ячеек, соседних данной, имеют одинаковый вес. Для однозначности выбора при учете критерия минимума изгибов проводника следует сохранять направление движения. Если приходится делать поворот, учитывается заранее заданный порядок предпочтительных направлений, например вверх, вправо, вниз, влево.

Рассмотрим случай, когда соседними к данной являются ячейки, имеющие с ней общее ребро, а вес ячейки k -го фронта

$$P_k = P_{k-1} + 1, \quad (10.14)$$

т. е. равен расстоянию k -й ячейки от исходной A в ортогональной метрике. На рис. 10.13, б проиллюстрирована работа алгоритма на примере соединения ячеек A и B . Волна распространяется из ячейки A , вес которой считаем равным нулю. Фронт волны доходит до ячейки B на 12-м шаге. В ходе построения пути из ячейки с весом 11 можно перейти в три соседние ячейки с весом 10. Здесь переход осуществляется, сохраняя направление движения. Аналогично происходит переход из ячейки с весом 10.

У ячейки с весом 9 есть две соседние ячейки с весом 8. Так как в данном случае приходится изменять направление движения, переход выполняется по предпочтительному направлению вверх. Поскольку вес k -й ячейки P_k в данном варианте алгоритма был равен ее расстоянию от ячейки A в ортогональной метрике, найденный путь оптимален в смысле его длины в этой метрике.

Так как алгоритм Ли представляет собой алгоритм нахождения кратчайшего пути в графе, он легко распространяется на многослойный печатный монтаж при использовании модели в виде графа монтажного пространства (см. § 8.3). При наличии ограничений на переходы со слоя на слой можно увеличить вес ребра, соединяющего две смежные вершины на соседних слоях, по сравнению с весом ребра, соединяющего смежные вершины одного слоя.

В общем случае весовая функция или критерий качества пути может зависеть от параметров, учитывающих длину пути, число перехо-

дов со слоя на слой, степень близости пути к другим и т. д., например в виде аддитивной функции

$$P_k = \sum_{i=1}^n a_i p_i(k), \quad (10.15)$$

где a_i — весовой коэффициент, учитывающий важность i -го параметра; $p_i(k)$ — значение учитываемого параметра.

Однако усложнение функции веса увеличивает объем информации на одну ячейку ДРП и время работы первой части алгоритма. Кроме того, не представляется возможным строго обосновать выбор значений весовых коэффициентов a_i .

При практической реализации волнового алгоритма важная проблема — сокращение объема памяти, необходимой для запоминания весов ячеек. При вычислении весов ячеек по (10.14) ячейка может быть в следующих состояниях: свободна, занята или имеет вес от единицы до L , где L — максимально возможная длина пути, определяемая как количество составляющих его ячеек ДРП. Необходимое для запоминания состояния одной ячейки ДРП число разрядов памяти:

$$N = \lceil \log_2(L + 2) \rceil, \quad (10.16)$$

где $\lceil \rceil$ — символы ближайшего большего целого.

Наиболее эффективными способами кодирования состояния ячеек ДРП являются метод путевых координат, кодирование по модулю 3 и использование базовой последовательности 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, предложенной Акерсом.

При выборе последовательности ячеек на этапе построения пути по методу путевых координат для каждой ячейки, начиная с B , в случае соседства по ребрам достаточно знать, от какой соседней ячейки в нее пришла волна: сверху, слева, снизу, справа (\downarrow , \rightarrow , \uparrow , \leftarrow). Таким образом, ячейка может иметь следующие признаки: свободна, занята или одну из путевых координат \downarrow , \rightarrow , \uparrow , \leftarrow . Следовательно, число разрядов на кодирование состояния ячеек $N = \lceil \log_2 6 \rceil = 3$. Если в данную ячейку волна приходит из нескольких соседних, то присвоение путевых координат выполняется по заранее заданному правилу приоритетов. При проведении пути достаточно переходить по путевым координатам из ячейки B в ячейку A . Пример проведения пути при использовании данного метода показан на рис. 10.13, *в*.

Кодирование по модулю 3 базируется на основном требовании к весам: $P_{k-1} \neq P_k \neq P_{k+1}$. Ячейкам, включаемым в последовательные фронты, можно присваивать не сами веса, а их значения по модулю 3, т. е. 1, 2, 3, 1, 2, 3, ... Количество разрядов на кодирование состояния ячеек $N = \lceil \log_2 5 \rceil = 3$. Проведение пути заключается в отслеживании отметок. Если ячейка имеет несколько соседних с одинаковыми отметками, то используется правило приоритетных направлений. При движении от ячейки B на рис. 10.13, *г* использовано следующее правило приоритетов: налево, вверх, направо, вниз.

Для определения последовательности ячеек, составляющих путь, достаточно, чтобы при распространении волны ячейкам присваивались значения отметок из заданной последовательности, в которой каждый

член имеет разных соседей слева и справа. В методе *Акерса* такой последовательностью является 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, ... При построении пути находят ячейки, входящие в заданную последовательность. В методе *Акерса* количество разрядов памяти на ячейку ДРП $N = \lceil \log_2 4 \rceil = 2$. Если построение последовательности возможно по нескольким направлениям, то выбор осуществляют по приоритетам. Пример нахождения пути с использованием отметок *Акерса* изображен на рис. 10.13, д.

Волновой алгоритм характеризуется высокой эффективностью нахождения пути за счет исследования всех свободных ячеек ДРП, но требует значительного времени на распространение волны. В связи с этим используются различные методы ускорения выполнения первого этапа алгоритма. Одним из них является выбор начальной точки (см. [21]). Из рис. 10.14, а видно, что при выборе в качестве источника распространения волны площадки, максимально удаленной от центра платы, просматривается меньшее число свободных ячеек ДРП. Это становится очевидным по мере роста числа протраассированных цепей.

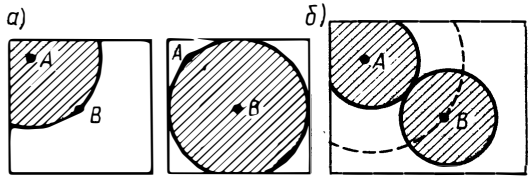


Рис. 10.14. Выбор источника распространения (а) и распространение волны из двух источников (б)

Более эффективен метод встречной волны (рис. 10.14, б). Выигрыш во времени пропорционален отношению числа исследуемых ячеек при одновременном распространении волны и при распространении волны из одного источника. При непрерывной модели окрестности волны на свободном поле ДРП отношение исследуемых площадей $M = \pi r^2 / [2\pi (r/2)^2] = 2$. Для реальных состояний ДРП выигрыш во времени может отличаться, однако в среднем оценка является объективной. Использование данной идеи приводит к усложнению алгоритма.

Поле распространения волны можно уменьшить, ограничивая его прямоугольником, внутри которого находятся соединяемые площадки. Начальная площадь прямоугольника обычно на 10—20% больше площади прямоугольника, проходящего через эти площадки. Если соединение найти не удалось, то границы прямоугольника расширяются. Данный метод обладает большей эффективностью ускорения работы алгоритма по сравнению с вышеописанными.

Другая идея ускорения поиска пути заключается в исследовании не всех свободных ячеек ДРП, а лишь по заранее заданным направлениям. Один из таких алгоритмов — лучевой алгоритм *Абрайтиса*. Для площадок A и B задается количество распространяемых лучей и разрешенные направления их движения. При прохождении луча через ячейку ей присваивается путевая координата. На рис. 10.15, а показан пример проведения пути двухлучевым алгоритмом, причем лучу A_1 разрешено движение вправо и вниз, лучу A_2 — вниз и вправо, лу-

чу B_1 — вверх и влево, лучу B_2 — влево и вверх. Вероятность нахождения пути этим алгоритмом меньше, чем волновым.

Близок к лучевому алгоритм трассировки по магистралям (рис. 10.15, б). Из площадок A и B по свободным ячейкам ДРП проводятся горизонтальные и вертикальные лучи до их встречи или до препятствий. Если магистрали M_{A1} и M_{B1} не пересекаются, из ячеек,

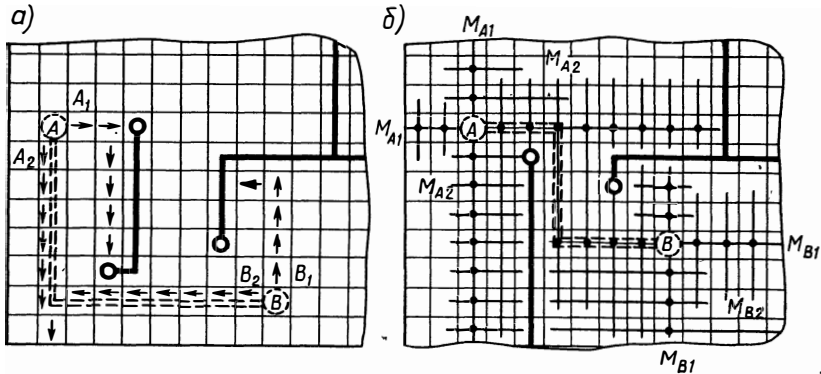


Рис. 10.15. Пример работы двухлучевого алгоритма (а) и трассировка по магистралям (б)

расположенных на этих магистралях, проводят магистрали второго уровня M_{A2} и M_{B2} , причем M_{A2} и M_{B2} ортогональны M_{A1} и M_{B1} соответственно. Путь существует, если магистрали M_A и M_B некоторого уровня пересекаются, и не существует в противном случае.

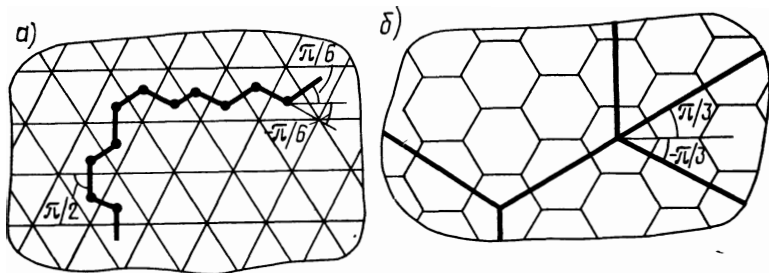


Рис. 10.16. Разбиение монтажного поля на равносторонние треугольники (а) и шестиугольники (б)

Пока мы рассматривали разбиение рабочего поля на элементарные квадраты, причем соседними считались квадраты с общим ребром. При этом проводники состояли из отрезков прямых, проходящих в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Получение составляющих путей с другими углами наклона возможно двумя способами: изменением формы элементарных ячеек и определением их соседства.

При разбиении поля на равносторонние треугольники (рис. 10.16, а) пути могут иметь составляющие с углом наклона $\pi/2$ и $\pi/6$, при раз-

биении на равносторонние шестиугольники — 0 и $\pm\pi/3$ (рис. 10.16, б). При использовании элементарных ячеек в форме равносторонних треугольников требуется операция «сглаживания» углов. Разбиение рабочего поля на треугольники, шестиугольники либо какие-то неправильные фигуры усложняет их адресацию. На практике применяют соединения с углами наклона 0 , $\pi/2$ и $\pm\pi/4$. Такие отрезки можно получить, если для квадратной ячейки соседними считать ячейки, имеющие с ней общее ребро или точку (рис. 10.17). На базе такой окрестности можно построить новые уже несимметричные. Например, если для одного слоя МПП в окрестность ячейки с координатами (x_0, y_0) включить ячейки с координатами $(x_0, y_0 + 1)$, $(x_0, y_0 - 1)$ и $(x_0 + 1, y_0 + 1)$, $(x_0 - 1, y_0 - 1)$, а для соседнего слоя — $(x_0 - 1, y_0)$, $(x_0 + 1, y_0)$ и $(x_0 - 1, y_0 + 1)$, $(x_0 + 1, y_0 - 1)$, то тогда соединения на соседних слоях будут пересекаться под углами $\pi/2$ и $\pi/4$.

Волновой алгоритм можно использовать при различных стратегиях построения цепей. Выполнение первых трех этапов задачи трассировки подразумевает переход к построению следующей цепи после получения конфигурации текущей или установления невозможности этого. Вследствие того, что в цепь могут входить как длинные соединения, так и короткие, при такой стратегии будет нарушен желательный порядок проведения соединений от коротких к длинным. После длинных отрезков одной цепи могут строиться более короткие первые отрезки следующей цепи. Чтобы избежать этого, проводят сначала соединения, стоящие первыми в списках всей цепи, затем вторые и т. д. Данный подход будет более корректным, если после распределения соединений по слоям определить порядок проведения отрезков по всем цепям каждого слоя.

Одна из модификаций алгоритма Ли позволяет исключить этап определения порядка соединения выводов внутри каждой цепи. В этом алгоритме используется метод встречной волны. Из n элементарных площадок, сопоставленных контактам цепи, одновременно распространяются волны до тех пор, пока не встретятся два фронта. Выполняется вторая часть алгоритма Ли, т. е. строится фрагмент цепи, соединяющий два контакта. Снова распространяются волны, но уже из $n - 1$ источников. Алгоритм соединяет две ближайшие ячейки или связанные системы ячеек с учетом преград в виде ранее проведенных соединений.

Алгоритмы трассировки, основанные на представлении о каналах. Их можно выделить в качестве самостоятельного класса. Алгоритмы ориентированы на построение трасс в таких монтажных платах, где между рядами и столбцами элементов можно провести совокупность

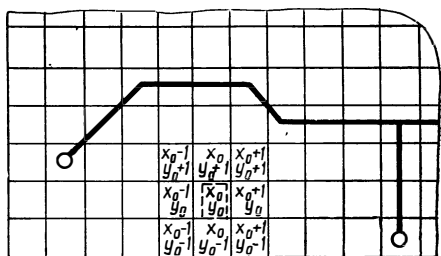


Рис. 10.17. К определению соседства ячейки (x_0, y_0)

Таблица 10.1

Система	Конструктивно-технологический базис	Решаемые задачи	Технические средства	Примечание
Единая система автоматизации проектирования (ЕСАП)	ДПП и МПП со сквозной металлизацией отверстий. Имеются средства настройки на различные базы	Проектирование сборочных единиц (ТЭЗ и панелей) и печатных плат (размещение и трассировка), проводного монтажа, тестов, контроль электромонтажа, документирование	Стандартные технические средства ЕС ЭВМ под управлением ОС ЕС. Минимальная конфигурация: любая модель ЕС ЭВМ с ООП не менее 512 Кбайт, четыре НМД, два НМЛ и соответствующие устройства ввода и отображения информации	Обеспечивает сокращение времени проектирования на 10—20% и времени технологической подготовки производства на 30—50%. Позволяет проектировать сложные вычислительные системы (до 10 мл ИС) с пятиуровневой конструктивной иерархией
Комплекс программ проектирования печатных плат (АСТП-1)	Микросхемы, двусторонние печатные платы	Размещение, трассировка, документирование, изготовление фотооригиналов	ЭВМ М-3000, координатограф	Поле печатной платы 140×150 мм, специальный язык внесения корректировок. Размещение и трассировка — 45 мин
Система автоматизации проектирования фотооригиналов и документации (САПФИД)	Микросхемы, четырехслойные печатные платы	То же	ЭВМ БЭСМ-6, координатограф, координатоскоп	Поле печатной платы 250×150 мм, трассировка— 2 ч, 8—12% неразведенных цепей
Система автоматизации проектирования (АСП-12)	Регулярные и нерегулярные гибридные БИС	»	ЭВМ БЭСМ-4, координатограф, фотонаборная установка	Координатное поле 4096×4096 усл. ед. Число элементов — до 400, время

				трассировки схемы на 1500 контактов — 2 ч
Система автоматизации проектирования многокристалльных БИС	Большие гибридные многокристалльные схемы наносекундного диапазона	»	ЭВМ БЭСМ-6, фотонаборная установка	—
Автоматизированная система проектирования топологии БИС (АСП ТИС)	МОП-БИС, биполярные схемы	Компоновка кристалла, расчет и изготовление фотошаблонов	ЭВМ М-6000, дисплей, графопостроитель, фотонаборная установка	Режим графического взаимодействия
Автоматизированная система синтеза топологии МОП-БИС с динамической логикой	МОП-БИС с четырехтактной логикой (до 1000 вентиляей)	Размещение, трассировка, документирование	ЭВМ БЭСМ-6	Цикл синтеза сокращается в 3—4 раза, ручная компоновка общего эскиза кристалла, время расчета топологии фрагментов — до 30 мин

горизонтальных и вертикальных магистралей (рис. 10.18). Совокупность магистралей называют *каналом*. К таким платам относятся некоторые типы ДПП, большие гибридные и монолитные интегральные схемы. В таком монтажном пространстве цепь представляет собой последовательность горизонтальных и вертикальных отрезков магистралей с переходными контактами со слоя на слой в местах сопряжения этих отрезков.

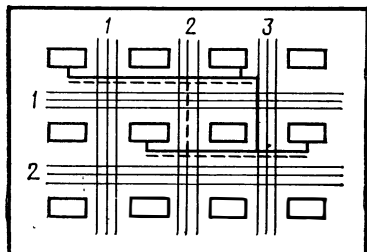


Рис. 10.18. Монтажная плоскость с сетью каналов

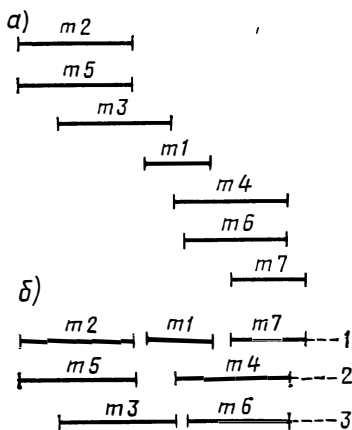


Рис. 10.19. Упорядочивание отрезков (а) и распределение их по магистралям (б)

В алгоритмах трассировки на основе представлений о каналах можно выделить две основные части: распределение отрезков трасс по каналам с учетом их равномерной загрузки и определение положения отрезков на магистралях. В первой части алгоритма для каждой цепи строят возможные на данной системе каналов деревья Штейнера, т. е. определяют сеть возможных каналов цепи. При наложении сетей отдельных цепей на основную сеть каналов выбирают те реализации связывающих деревьев, которые обеспечивают равномерную загрузку каналов. Например, при реализации связывающего дерева, показанного на рис. 10.18 сплошной линией, будет занята часть магистрали третьего вертикального канала, а пунктирной — второго. В связи с тем, что отрезок цепи может занимать не всю длину магистрали, число проводников, назначенных в канал, может превышать число его магистралей.

Во второй части алгоритма для определения положения отрезков на магистралях множество M отрезков, отнесенных к каналу, разбивают на $K \leq m$ непересекающихся подмножеств M_i , $i \in I = \overline{1, K}$, причем проводники, отнесенные к одной магистрали, т. е. включенные в подмножество M_i , не должны перекрываться.

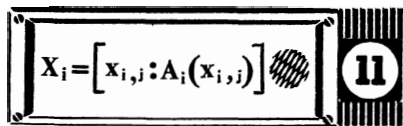
Эффективный алгоритм распределения отрезков по магистралям канала заключается в следующем: 1) упорядочиваем отрезки множества M по начальной координате; 2) формируем подмножества M_i , последовательно включая в них те отрезки, у которых начальная координата больше конечной координаты предыдущего отрезка.

Результаты работы первого и второго пунктов алгоритма проиллюстрированы на рис. 10.19. Здесь множество $M = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7\}$ упорядоченное множество $M^1 = \{m_2, m_5, m_3, m_1, m_4, m_6, m_7\}$, сформированные подмножества $M_1 = \{m_2, m_1, m_7\}$; $M_2 = \{m_5, m_4\}$; $M_3 = \{m_3, m_6\}$.

В практике конструирования используют различные алгоритмические методы трассировки, которые основаны на описанных выше идеях или их комбинациях и нередко содержат дополнительные эвристические приемы, имитирующие действия конструктора. Как правило, эффективность таких алгоритмов неодинакова при отличающихся конструктивно-технологических ограничениях на монтажное пространство.

В автоматизированных системах проектирования решение задач схемно-топологического конструирования (компоновка, размещение, трассировка) должно заканчиваться выпуском соответствующей конструкторской и технологической документации. Существующие системы автоматизированного проектирования позволяют получать следующую конструкторскую документацию: принципиальные электрические схемы, сборочные чертежи, таблицы соединений, спецификации, ведомости. Технологическая документация оформляется в виде машинных носителей информации (перфокарты, перфоленты, магнитные ленты). На них размещается информация, необходимая для управления технологическими автоматами изготовления фотошаблонов слоев интегральных схем и печатных плат, металлизированных и крепежных отверстий, сборки компонентов на подложках или печатных платах, контроля соответствия монтажных соединений электрической схеме и тестового контроля схем.

Некоторые действующие системы автоматизированного конструкторского проектирования и их основные характеристики указаны в табл. 10.1.



**§ 11.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Информационное обеспечение — это совокупность сведений, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и представленных в заданной форме (см. ГОСТ 22487—77). Информационное обеспечение системы автоматизированного конструкторского проектирования в значительной степени определяет эффективность функционирования отдельных проектных прикладных программ и всей системы в целом. Информационное обеспечение должно воспринимать сведения об объектах конструирования (конструкторские данные), формировать определенным образом организованные массивы и осуществлять их взаимодействие с прикладными проектными программами.

Основные принципы построения информационного обеспечения: разделение данных на два вида (справочная информация и проектная); наличие информационного интерфейса между схмотехническим и конструкторским этапами проектирования; независимость данных от прикладных программ; наличие единственного централизованного описания разрабатываемой конструкции; использование структур данных и памяти, обеспечивающих их эффективную обработку прикладными программами; модульность и гибкая организация программ создания и ведения информационной базы.

Разделение данных на два вида (проектные и справочные) обеспечивает гибкость информационной базы. К проектным относятся данные, описывающие конструкцию на каком-то этапе ее разработки. Проектными данными являются первичное описание схемы соединения элементов, результаты компоновки элементов и размещения микросхем на платах, таблицы соединений и т. п. Справочными — данные, постоянные по отношению к нескольким изделиям и содержащие конструкторские и схмотехнические характеристики элементной базы и параметры типовых конструкций. Например, размеры модулей и расстояния между ними, размеры полей контактов и коммутационных полей, описание выводов, максимальная выделяемая мощность, номинальная нагрузочная способность по каждому выходу, типы сигналов, допустимые длины линий связи и т. п.

По назначению данные делят на информацию, подлежащую обработке и отражающую результаты проектирования. Деление данных на справочные и проектные, а также на исходную информацию и результаты проектирования условно. Например, данные проекта — результаты проектирования, полученные при решении одной задачи конструирования, могут стать справочными данными для другой.

Независимость данных от программ достигается наличием в информационном обеспечении базовой модели, ориентированной на широкий круг задач этапа конструкторского проектирования, и упрощенных моделей. Упрощенные модели предназначены для работы прикладных программ решения частных задач конструирования. Расширение базовой модели, необходимое для совместимости новых алгоритмов с информационным обеспечением, не требует переработки прикладных программ.

Модульность программ создания и ведения информационной базы делает их независимыми друг от друга, что дает возможность использовать эти программы в различных режимах и позволяет расширять их количество.

Исходные данные — первичное описание объекта конструирования — оформляют на входном языке проектирования. Первичное описание объекта содержит информацию о схеме соединения элементов и параметры типовых конструкций. Управление информационным обеспечением осуществляют на базовом языке проектирования, который служит для представления дополнительных сведений к первичному описанию объекта конструирования. На этом языке дают директивы на прием сведений об объектах конструирования, построение базовой и упрощенной моделей, ведение справочных библиотек, выполнение процедур информационного обмена, в том числе и с прикладными проектными программами, и последовательность их работы. Проектные решения (результаты конструирования) представляют на выходном языке проектирования, операторы которого ориентированы на существующие стандарты документов и технические средства отображения информации.

На рис. 11.1 показана схема обработки данных в информационном обеспечении системы автоматизированного конструкторского проектирования. Директивы на базовом языке проектирования (блок 7) в общем случае содержат указания о вводе первичного описания, построении и ведении информационной базы, выдаче результатов конструирования на выходном языке, об организации обмена данными между информационной базой и прикладными проектными программами. Интерпретатор с базового языка (блок 8) переводит директивы во внутреннее представление. Указания о процессе построения информационной базы поступают в диспетчер прикладных программ информационного обеспечения (блок 9), который управляет работой блоков 2—6. Некоторые указания о виде действий с данными могут содержаться в самом первичном описании на языке конструкторских данных высокого уровня.

Программы блока 2 осуществляют ввод и контроль первичного описания на входном языке (блок 1), разделяя данные на справочные и проектные. Первые поступают в справочную часть информационной базы, а вторые — в соответствующий раздел рабочей части. Программы блока 3 преобразуют проектную информацию первичного описания во внутреннее или промежуточное представление данных. Построение базовой и упрощенных моделей с соответствующим образом организованными информационными массивами выполняется про-

граммами блоков 4 и 5. Перевод результатов конструкторского проектирования на выходной язык в соответствии с требуемой структурой, составом и формой выдачи технической документации производится программами блока 6.

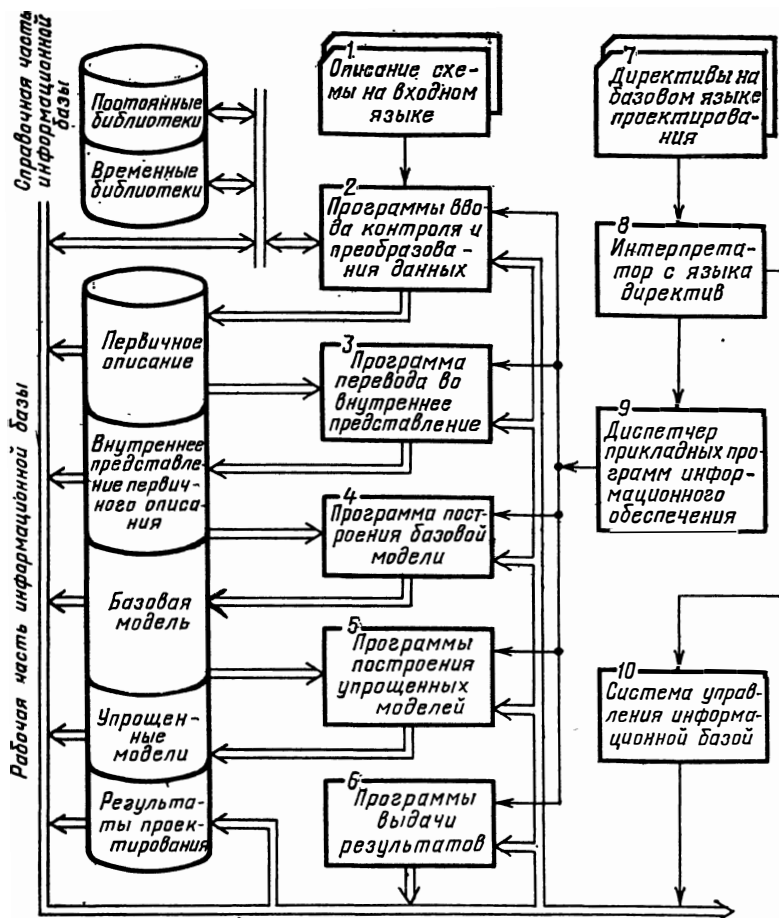


Рис. 11.1. Схема обработки данных в информационном обеспечении системы автоматизированного конструкторского проектирования

В систему управления информационной базой (блок 10) поступают указания об организации обмена информацией между информационной базой и прикладными проектными программами. Система управления организует выдачу проектной и справочной информации прикладным проектным программам и прием от них проектных решений, а также передачу соответствующих результатов проектирования из рабочей в справочную часть информационной базы (временные библиотеки).

Управление работой информационного обеспечения осуществляется

операционной системой технических средств автоматизированного конструирования. Связи с операционной системой на схеме обработки данных не указаны.

§ 11.2. СТРУКТУРЫ ДАННЫХ И СТРУКТУРЫ ПАМЯТИ

При построении информационного обеспечения автоматизированного проектирования важное значение имеет организация данных. Под структурой данных понимают совокупность содержательных связей, которые существуют между отдельными частями данных. Отображение данных в память приводит к необходимости реализации этих связей в виде структуры памяти. Реализация связей должна обеспечить эффективную обработку данных. Таким образом, структура памяти данных — это упорядоченное представление информации, необходимое для эффективной обработки ее при работе программ решения задач конструкторского проектирования.

Для задач автоматизированного проектирования характерно многообразие видов действий над данными. Например, для программ размещения и компоновки это в основном процессорная обработка, требующая непосредственного доступа к элементам данных. При обработке таблицы соединений структура памяти должна обеспечивать быстрый просмотр связанных по смыслу элементов данных, количество которых может меняться динамически, т. е. преимущественными являются операции включения и исключения элементов. Не существует универсального способа организации данных, который обеспечивал бы высокую эффективность различных видов обработки информации. В связи с этим рассмотрим некоторые структуры данных и способы их отображения в память ЭВМ.

Структуры памяти. Под памятью будем понимать основную оперативную память с произвольным доступом. Последовательность битов памяти делится с фиксированным шагом на адресуемые единицы (байты или слова). Простым элементом данных будем считать последовательность битов некоторой длины, неделимую с точки зрения структуры. Такая последовательность битов называется *квантом*.

Совокупность смежных квантов (полей памяти) образует звено, при этом каждое поле может отводиться для хранения данных определенного вида. В общем случае поля имеют различную длину. Кванты в звене могут просматриваться последовательно, более распространенной является операция выбора определенного поля. По сравнению с квантом звено — структурированный элемент памяти.

Последовательная организация элементов памяти. Такая организация реализуется векторной памятью. Вектор представляет собой множество элементов памяти, которые располагаются непрерывно. Вектор — это базовая структура памяти, для которой в машине существует адресная арифметика. Поэтому вектор обеспечивает возможность перебора элементов памяти и прямого доступа к определенному элементу. Вектор задается названием, длиной или верхней и нижней границей изменения индекса и размером

элемента. Адрес произвольного элемента вектора определяется выражением:

адрес элемента = базовый адрес + смещение относительно базы,

где базовый адрес — результат операции ссылки на название вектора, а смещение определяется по индексу элемента и границам.

Разбиение вектора памяти на части переменной длины. Для обеспечения эффективности обращения к областям векторной памяти ее можно разделить на части различной длины. Границы каждой области задаются указателями, которые обычно сводят в специальный справочный массив с последовательной

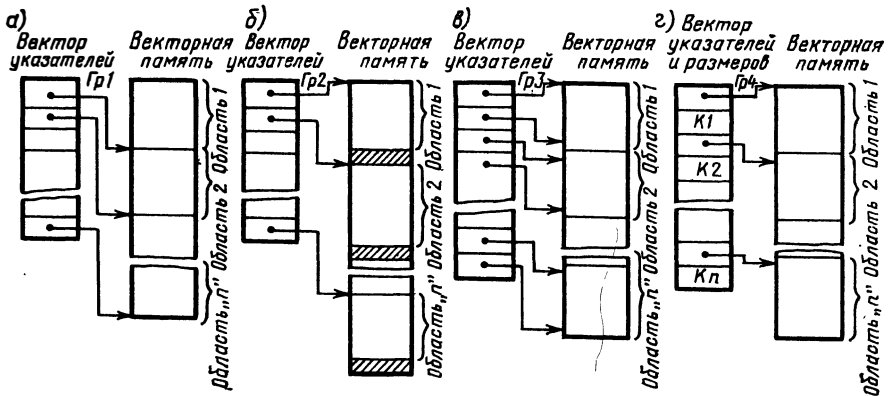


Рис. 11.2. Способы организации ссылок на области векторной памяти

структурой. На рис. 11.2, а—г показаны различные способы организации ссылок на области векторной памяти. Для способа, показанного на рис. 11.2, а, указателем является адрес конца соответствующей области вектора памяти. Начальный и конечный адреса i -й области векторной памяти определяются так:

начальный адрес = $Гр(i-1) + 1$, конечный адрес = $Гр(i)$.

При способе, представленном на рис. 11.2, б, указатель определяет адрес первого элемента области, конец области задается специальным признаком. Для другого способа (рис. 11.2, в) в векторе $Гр3$ для каждой области задается пара указателей (начало и конец области). Для варианта, изображенного на рис. 11.2, г, задается адрес начала области векторной памяти и ее размер (K_i). Очевидно, что на рис. 11.2, б, в и г области векторной памяти могут располагаться и не последовательно, что расширяет возможности данного способа.

Связанная организация элементов памяти. При связанной организации в каждом элементе памяти имеется один или несколько указателей на местоположение другого или других элементов памяти (здесь элементом памяти может быть звено или последовательность звеньев). Простейшей формой является однонаправленная связь, при которой каждый элемент памяти имеет ссылку на следующий. Здесь в составе элемента памяти существуют два

поля: A — поле значения или указателя на элемент памяти, хранящий это значение, и B — поле указателя на следующий элемент памяти. При такой организации возможен лишь последовательный поиск элемента, начиная с первого. В случае если необходимо обеспечить возможность поиска в обе стороны, организуется двунаправленная связь, т. е. от предыдущего к последующему, от последующего к предыдущему. Связи между элементами памяти могут иметь и более сложную структуру, например древовидную, в виде ориентированного графа и т. д. Достоинство связанной организации — возможность включения и исключения любого элемента памяти без перестановок других посредством замены указателей. Недостатки: невозможность прямого доступа к элементам; для указателей требуется дополнительный объем памяти, который может даже превышать объем памяти, хранящей данные.

Структуры данных и их организация в памяти ЭВМ. С и м в о л ы. Символ — это элемент некоторого конечного алфавита. Иногда символы (литеры) образуют отдельный тип данных. В общем случае символы используют для построения структурированных элементов данных. В памяти символ представляется квантом, длина которого $N = \log_2 n$, где n — количество символов алфавита.

П р о с т о й э л е м е н т д а н н ы х. Простой элемент данных соответствует единичному данному определенного вида и представляет собой последовательность символов, принадлежащих некоторому алфавиту. Операция доступа и изменение выполняется над всем элементом целиком. Примером могут служить числа, литерные строки, указатели. В памяти ЭВМ простой элемент отображается в квант или звено. Литерная строка может быть фиксированной и переменной длины. Для литерной строки используют последовательное и связанное представление в памяти.

З а п и с ь. Запись — это совокупность простых элементов данных, каждый из которых содержит информацию определенного вида. Примером записи служит словосочетание входного языка описания схем. В памяти ЭВМ запись представляется звеном. Так как простые элементы данных могут требовать не одинаковое количество битов для их кодирования, то размеры полей памяти могут быть различными. По отношению к записи возможны операции последовательного просмотра и непосредственного выбора элемента данных. В табл. 11.1 показана структура словосочетания входного языка описания схем

Т а б л и ц а 11.1

Атрибут цепи	Имя цепи	Имя элемента	Тип элемента	Номер контакта
Имя поля звена	X1	X2	X3	X4
Элемент данных	CS24	EK4FR2	TR20	025
Длина поля звена, байт	6	8	4	4

в виде списка цепей, определяемая синтаксисом этого языка. В этой таблице R — имя звена, XI — имя поля звена.

Выполняя операцию $R[XI]$, можно просматривать атрибуты цепи, описанные в звене. Записав $XI[R]$, выделяем определенный элемент данных в звене. Например, $X2[R]$ дает информацию об имени элемента схемы, принадлежащего цепи, имя которой хранится в поле $XI[R]$.

Однородные линейные массивы фиксированной длины. Это одномерная последовательность элементов данных одного типа и размера, к каждому из которых возможен индивидуальный доступ с помощью целого индекса, определяющего позицию элемента. Такие массивы целесообразно отображать в последовательную память. При последовательном хранении данных включение и исключение элементов требуют реформирования вектора памяти.

Неоднородные линейные массивы фиксированной длины. Нередко приходится оперировать с данными, элементы которых могут иметь разную длину. Например, элементами неоднородного массива в свою очередь являются однородные массивы различной длины. Если операции включения и исключения для таких данных не характерны, то можно использовать векторную память с указателями. Например, ориентированный граф аналитическим способом может быть задан множеством вершин $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ и множеством прямых отображений: $F_X = \{Fx_1, Fx_2, Fx_3, Fx_4\}$, где $Fx_1 = \{x_2, x_3\}$, $Fx_2 = \{x_3\}$, $Fx_3 = \{x_1, x_2, x_4\}$, $Fx_4 = \{x_2\}$.

Массив F_X , определяя связи, которые существуют между вершинами графа, является неоднородным линейным массивом и может быть отображен в память в виде векторов переменной длины с граничными указателями, например как на рис. 11.2, б. Отображение

Таблица 11.2

Массив	Массив граничных указателей	Массив F_X
x_1	1	x_2 x_3 \emptyset
x_2	4	x_3 \emptyset
x_3	6	x_1 x_2 x_4 \emptyset
x_4	10	x_2 \emptyset

в память аналитического задания ориентированного графа показано в табл. 11.2.

Неоднородные одномерные массивы, элементы которых имеют разную длину и тип. Такие массивы могут быть отображены в память, организованную, как показано на рис. 11.2, г. Каждую область (цепочку квантов) сопоставим элементу массива. Области могут располагаться в произвольных местах памяти. Указатель может представлять собой звено, поля которого определяют адрес элемента, его тип и длину. Для доступа к i -му элементу вычисляется позиция i -го указателя. Одно из его полей

(в простейшем случае он сам) определяет адрес элемента. Таким же образом представляются в памяти ЭВМ неоднородные линейные массивы, длина элементов которых может меняться динамически.

Более сложные структуры данных и памяти (иерархические и т. п.) получаются, если элементы являются структурами. Например, двухмерный массив (матрицу) можно рассматривать как одномерный, элементы которого в свою очередь являются одномерными массивами.

§ 11.3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ ДАННЫХ

Описание конструкторских данных выполняется на специальном языке, предназначенном для их накопления, изменения и обеспечения оперативного доступа к ним. Этот язык представляет собой средство описания схемы как совокупности электрически связанных элементов, а также типовых конструкций. Из анализа содержания основных задач конструкторского проектирования ясно, что конструкторские данные должны содержать следующую информацию: имена (номера) элементов схемы и типовых конструкций; тип (логическую функцию) каждого элемента; имена (номера) контактов элементов; признак (логическую функцию) каждого контакта; принадлежность контактов элементов цепям, которые идентифицируются своими именами (номерами) или именами сигналов; геометрические размеры типовых конструкций, элементов и полей их контактов; координаты схемных и конструктивных элементов, их схемные и конструктивные адреса; координаты и номера отрезков монтажных соединений.

К языку конструкторских данных предъявляются следующие основные требования:

Язык должен: 1) позволять отобразить всю информацию о схеме и типовых конструкциях, необходимую для работы автоматизированной системы конструкторского проектирования; 2) относиться к классу формализованных и быть непроцедурным, т. е. порядок обработки записей языком не определяется; 3) содержать указания о виде действий с данными. Форма предложений и словосочетаний языка должна обеспечивать легкость организации данных в виде различных структур памяти.

Основную информацию для первичного описания объекта при конструкторском проектировании несет электрическая функциональная (неполная принципиальная) схема. В рамках автоматизированного проектирования всей ЭВМ эта информация должна получаться автоматически как результат решения задач функционально-логического проектирования. В то же время следует предусмотреть возможность ручной подготовки данных. Так как ручная подготовка данных выполняется неквалифицированными работниками, то к языку предъявляются дополнительные требования: 1) алфавит должен содержать минимально необходимое количество символов; 2) синтаксические правила построения слов, словосочетаний и предложений, используемых для описания конструкторских данных, должны быть достаточно простыми; 3) предложения языка конструкторских данных должны иметь вид,

привычный пользователю. Это облегчает подготовку данных и обеспечивает легкость их понимания.

Языки описания данных о схеме.

Входной язык для описания схемы в виде списка цепей. Цепь — это совокупность выводов элементов, являющихся электрически общей точкой. Возможный вариант предложения для описания цепи на этом языке имеет вид:

ПЦ: = <имя цепи> [<имя элемента> <тип элемента> <номер, или имя контакта>] [<имя элемента> <тип элемента> <номер или имя контакта>] ...

Входной язык для описания схемы в виде списка элементов. При этом способе описания схемы для каждого задействованного контакта элемента указывается номер подключенной к нему цепи или имя сигнала, передаваемого по данной цепи. Вариант структуры предложения для описания элемента:

ПЭ: = <имя элемента> <тип элемента> [<номер или имя контакта> <имя цепи>] [<номер или имя контакта> <имя цепи>] ...

В обоих языках элементом предложения является слово-литерная строка или число, под которое отводятся определенные поля фиксированной длины.

Заметим, что при использовании этих предложений нельзя заранее предсказать их размер. Признаком окончания описания цепи (элемента)

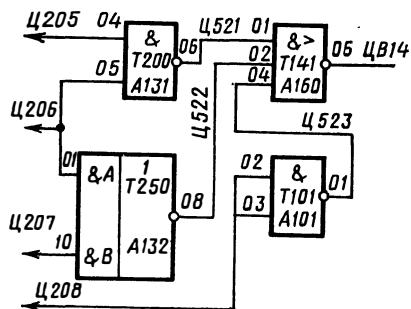


Рис. 11.3. Фрагмент принципиальной электрической схемы

может служить либо изменение имени цепи (элемента), либо ограничитель предложения. Пример описания схемы (рис. 11.3) в виде списка цепей и списка элементов в терминах указанных предложений проиллюстрирован соответственно табл. 11.3 и 11.4.

В смысле полноты отображения информации о схеме рассмотренные способы эквивалентны. Однако при ручной подготовке данных предпочтение следует отдать описанию схемы в виде списка элементов, так как предложения на этом языке легче построить (нет необходимости проследивать по схеме каждую цепь). Для упрощения правил преобразования предложений при отображении описания схемы в структуру памяти словосочетание можно отнести к одному контакту элемента, например:

СЦ: = <имя цепи> <имя элемента> <тип элемента> <номер или имя контакта>

СЭ: = <имя элемента> <тип элемента> <номер или имя контакта> <имя цепи>

Таблица 11.3

Имя цепи	Имя элемента	Тип элемента	Номер контакта	Имя элемента	Тип элемента	Номер контакта
Ц205	A131	T200	04			
Ц206	A131	T200	05	A132	T250	01
Ц207	A132	T250	10			
Ц208	A101	T101	02	A101	T101	03
Ц521	A131	T200	06	A160	T141	01
Ц522	A132	T250	08	A160	T141	02
Ц523	A101	T101	01	A160	T141	04
ЦВ14	A160	T141	06			

Таблица 11.4

Имя элемента	Тип элемента	Номер контакта	Имя цепи	Номер контакта	Имя цепи	Номер контакта	Имя цепи
A131	T200	04	Ц205	05	Ц206	06	Ц521
A132	T250	01	Ц206	10	Ц207	08	Ц522
A101	T101	02	Ц208	03	Ц208	01	Ц523
A160	T141	01	Ц521	02	Ц522	04	Ц523
		06	ЦВ14				

В этом случае структура словосочетаний обоих языков одинакова (приходим к одному входному языку описания схем). Задавая последовательность словосочетаний с одинаковым именем элемента, получаем описание схемы в виде списка элементов, которое можно преобразовать в список цепей, и наоборот. Недостатком этого способа является избыточность информации. Действительно, при поэлементном описании в каждом словосочетании повторяется имя элемента и его тип, а при описании цепи — имя цепи. Если описание схемы выполняется на уровне хотя бы интегральных схем, то избыточность информации может оказаться значительной. Описание схемы на этих языках является последовательностью достаточно простых однотипных предложений или словосочетаний. Эти языки широко применялись в практике автоматизированного конструирования и могут быть использованы как подмножества языка конструкторских данных более высокого уровня.

Язык высокого уровня. Рассмотрим язык, позволяющий отображать всю необходимую информацию и удовлетворяющий основным рассмотренным выше требованиям. Основным понятием языка конструкторских данных является предложение, которое состоит из слов и словосочетаний. Слово — это литерная строка или число фиксированной длины. Предложения и словосочетания могут заключаться в специальные символы — ограничители, слова в словосочетаниях могут отделяться разделителями.

Структура предложения. Предложение состоит из заголовка и текста. Заголовок начинается ключевым словом (например, «элемент схемы», «типовая конструкция», «цепь», «компонент конструкции», «монтажное соединение», «контакт элемента» и т. п.), которое определяет объект описания и одновременно является ограничителем (открывает предложение). Далее следует указание на вид действия с данными («записать», «получить», «удалить», «заменить» данные и т. п.).

Текст предложения — это последовательность слов или словосочетаний, несущих информацию об объекте описания, определенном в заголовке. В тексте предложения предусмотрено поле для информации о номере изменения.

Описание конструкторских данных на этом языке состоит из предложения общего описания конструкции, например:

ПК: = {<|ключевое слово|><вид действия> [<код конструкции><классификация><описание системы координат><размеры><номер изменения>]}.

За ним следуют предложения описания атрибутов конструкции, элементов конструкции, элементов схемы и цепей (порядок записи этих предложений не регламентируется). Предложение описания элемента схемы может содержать предложения описания его контактов и монтажных соединений, например:

ПЭ: = {<|элемент|><вид действия> [<код элемента><позиционное обозначение><адреса><координаты><номер изменения>]} {предложение описания контакта} ... {предложение описания монтажного соединения} ..

Предложение описания цепи может содержать предложения описания ее точек:

ПЦ: = {<|цепь|><вид действия> [<код цепи><тип сигнала><номер изменения>]} {предложение описания точки цепи} ...

Аналогично организовано предложение общего описания конструкторского извещения об изменениях и предложение описания номера изменения. С точки зрения структуры данных словосочетания и предложения рассмотренных языков являются записью (звеном), поля которой содержат информацию о цепи, элементе, контакте и т. д.

§ 11.4. БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ СХЕМЫ

Основные требования, предъявляемые к математическим моделям схем ЭВМ, были сформулированы в § 8.3. Базовая модель схемы должна обеспечивать возможность совместного решения основных задач автоматизированного конструкторского проектирования (компоновка, размещение, трассировка) и достаточно простой формальный переход к частным моделям.

В базовой модели контактам (выводам) элементов схемы соответствуют вершины графа. Переход от схемы соединения элементов к базовой модели выполняется последовательным применением следующих правил.

Правило 1. Множество вершин X разбивается на N непересекающихся подмножеств в соответствии с принадлежностью выводов элементам схемы:

$$X = \{X_i\}; X_i = \{x_{i,j}: A_i(x_{i,j})\}; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n_i},$$

где $A_i(x_{i,j})$ — одноместный предикат, определяющий принадлежность j -го контакта i -му элементу схемы; N — количество элементов схемы; n_i — количество контактов i -го элемента.

Для отображения топологических характеристик элемента вершины внутри каждого подмножества X_i упорядочиваются в соответствии с расположением выводов i -го элемента схемы. При геометрическом представлении графа такие вершины будем изображать кружками, лежащими на пунктирной окружности, если проводники можно прокладывать между выводами и под элементами, и на сплошной окружности в противном случае, задав при этом на всем подмножестве X_i отношение псевдосвязанности.

Правило 2. На каждом множестве X_i задаются n — местные отношения связанности, которые обладают свойством симметричности, в соответствии с перепайкой входных или выходных контактов данного элемента. Получаем разбиение X_i на классы эквивалентности. Рассматриваем классы эквивалентности первого рода как элементы нового множества Y_i . Для каждого класса эквивалентности первого рода должно выполняться условие

$$(\forall x_{i,j}, x_{i,l} \in Y_{i,k}) [(x_{i,j}, x_{i,l}) \in R_i \& (x_{i,l}, x_{i,j}) \in R_i \& (j \neq l)],$$

где R_i — отношение связанности, заданное на входных или выходных контактах i -го элемента.

Классы эквивалентности первого рода назовем входными и выходными словами.

Правило 3. На элементах нового множества Y задаем n -местные отношения связанности, обладающие указанным выше свойством симметричности, в соответствии с принадлежностью входных или выходных слов элементов схемы электрическим цепям. Получаем разбиение множества Y на классы эквивалентности второго рода, которые будем рассматривать как элементы некоторого нового множества Z . Для каждого класса эквивалентности второго рода должно выполняться условие

$$(\forall y_{i,k}, y_{j,l} \in Z_r) [(y_{i,k}, y_{j,l}) \in R_1 \& (y_{j,l}, y_{i,k}) \in R_1 \& (k \neq l)],$$

где R_1 — отношение связанности, заданное на классах эквивалентности первого рода; $i, j = \overline{1, N}$.

Правило 4. На элементах множества Z задаем бинарные отношения R_2 в соответствии с направлением передачи информации. Вершины множества Z , находящиеся в бинарном отношении, должны удовлетворять условию

$$(\forall z_r, z_t \in Z) [(z_r, z_t) \in R_2 \rightarrow (z_t, z_r) \notin R_2 \& (t \neq r)].$$

$$Y_4 = \{y_{41}, y_{42}, y_{43}, y_{44}\}, \text{ причем } y_{41} = \{x_{41}, x_{42}\}, \\ y_{42} = \{x_{43}\}, y_{43} = \{x_{44}, x_{46}\}, y_{44} = \{x_{48}\}.$$

В соответствии с правилом 3 множество Y разбивается на классы эквивалентности второго рода:

$$Y = \{\{y_{11}\}, \{y_{12}\}, \{y_{13}, y_{22}\}, \{y_{14}, y_{26}\}, \{y_{15}\}, \{y_{21}, y_{32}\}, \\ \{y_{28}\}, \{y_{31}, y_{41}\}, \{y_{33}\}, \{y_{42}\}, \{y_{43}\}, \{y_{44}\}\}.$$

Считая каждый класс эквивалентности элементом нового множества Z , запишем

$$Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9, z_{10}, z_{11}, z_{12}\},$$

$$\text{где } z_1 = \{y_{11}\}, z_2 = \{y_{12}\}, z_3 = \{y_{13}, y_{22}\}, z_4 = \{y_{14}, y_{26}\}, \\ z_5 = \{y_{15}\}, z_6 = \{y_{21}, y_{32}\}, z_7 = \{y_{28}\}, z_8 = \{y_{31}, y_{41}\}, \\ z_9 = \{y_{33}\}, z_{10} = \{y_{42}\}, z_{11} = \{y_{43}\}, z_{12} = \{y_{44}\}.$$

В результате применения правила 4, определяющего направление передачи сигналов, получим множество упорядоченных пар элементов множества Z :

$$\begin{aligned} \langle z_4, z_8 \rangle &= \langle \{y_{14}, y_{26}\}, \{y_{31}, y_{41}\} \rangle = \langle \{\{x_{16}, x_{18}\}, \{x_{26}\}\}, \\ &\quad \{\{x_{31}, x_{32}, x_{33}\}, \{x_{41}, x_{42}\}\} \rangle, \\ \langle z_9, z_1 \rangle &= \langle \{y_{33}\}, \{y_{11}\} \rangle = \langle \{x_{37}\}, \{x_{11}, x_{12}, x_{13}\} \rangle, \\ \langle z_5, z_6 \rangle &= \langle \{y_{15}\}, \{y_{21}, y_{32}\} \rangle = \langle \{x_{19}\}, \{x_{21}, x_{34}\} \rangle, \\ \langle z_7, z_{10} \rangle &= \langle \{y_{28}\}, \{y_{42}\} \rangle = \langle \{x_{28}\}, \{x_{43}\} \rangle, \\ \langle z_{12}, z_3 \rangle &= \langle \{y_{44}\}, \{y_{13}, y_{22}\} \rangle = \langle \{x_{48}\}, \{x_{15}, x_{22}\} \rangle, \\ \langle z_{11}, z_2 \rangle &= \langle \{y_{43}\}, \{y_{12}\} \rangle = \langle \{x_{44}, x_{46}\}, \{x_{14}\} \rangle. \end{aligned}$$

Отметим важный факт: объединение вершин $x_{i,j} \in X$, входящих в элементы упорядоченной пары, составляет соответствующую цепь. Например, цепь 2 составят

$$z_9 \cup z_1 = y_{33} \cup y_{31} = \{x_{37}, x_{11}, x_{12}, x_{13}\}.$$

Каждое подмножество X_i , а следовательно, и Y_i разбивалось на два непересекающихся подмножества в соответствии с входными и выходными выводами элементов. В упорядоченных парах бинарных отношений первый элемент соответствует источнику сигнала, второй — приемнику. Таким образом, множество вершин, входящих во второй элемент упорядоченной пары, является прямым отображением вершин (выходных слов), составляющих первый элемент этой пары (аналогичное замечание можно сделать и относительно обратного отображения). На основании этого замечания структуру, например, второй упорядоченной пары можно представить в виде $\langle z_9, z_1 \rangle = \langle \{y_{33}\}, \{y_{11}\} \rangle = \langle y_{33}, Fy_{33} \rangle$, где $Fy_{33} = \{y_{11}\} = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}\}$, так как $y_{33} = \{x_{37}\}$ и $Fx_{37} = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}\}$ или в виде $\langle z_9, z_1 \rangle = \langle \{y_{33}\}, \{y_{11}\} \rangle = \langle F^{-1}y_{11}, y_{11} \rangle$, где $F^{-1}y_{11} = \{y_{33}\} = \{x_{37}\}$, так как $y_{11} = \{x_{11}, x_{12}, x_{13}\}$ и $F^{-1}\{x_{11}, x_{12}, x_{13}\} = \{x_{37}\}$.

Прямые отображения слов — выходов $\{F\}$ описывают связи элементов по выходу. Например, $F \{x_{k,l}, x_{i,j}\} = \{x_{m,p}, x_{f,r}\}$ означает, что с l -го и j -го контактов k -го и i -го элементов схемы идет сигнал на p -й и r -й контакты m -го и f -го элементов. Обратное отображение аналогичным образом описывает связи элементов по входу.

Каждому подмножеству X_i ставятся в соответствие весовые характеристики i_i и γ_i , которые определяют тип элемента и его геометрические характеристики, а каждой цепи — весовая характеристика, определяющая тип сигнала, передаваемого по ней.

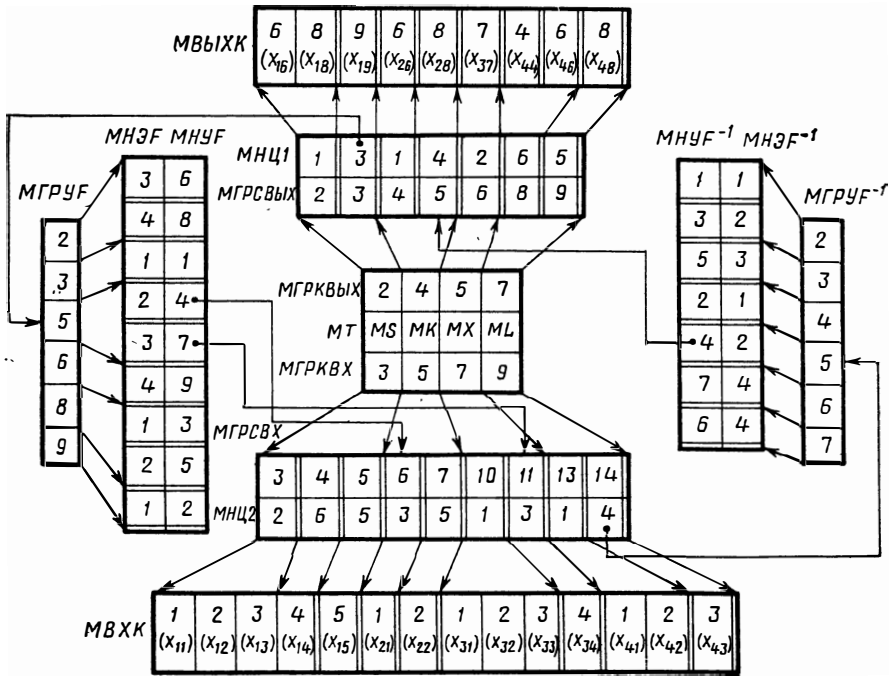


Рис. 11.5. Структура памяти аналитического задания базовой модели схемы

Структура памяти базовой модели должна обеспечить простоту и высокую эффективность как операций выбора данных из общих информационных массивов модели при совместном решении задач конструкторского проектирования, так и сервисных программ получения информационных массивов упрощенных моделей при их раздельном решении. Так как информация предназначена в основном для процессорной обработки, то будем представлять ее в памяти в виде векторов переменной длины с граничными указателями.

Организация памяти данных базовой модели показана на рис. 11.5. В массиве MT записаны типы или имена элементов. Будем считать, что номер элемента или указатель на него соответствует индексу в массиве типов. Множество контактов X представлено в виде двух непересекающихся подмножеств, одно из которых соответствует выходным

контактам *МВЫХК*, а другое — входным *МВХК*. Массивы указателей границ контактов — выходов *МГРКВЫХ* и контактов — входов *МГРКВХ* элементов совместно с массивами границ слов — выходов *МГРСВЫХ* и слов — входов *МГРСВХ* определяют принадлежность выходных и входных контактов каждому элементу и задают их разбиение на выходные и входные слова. Каждому указателю в массивах *МГРСВЫХ* и *МГРСВХ* поставлен в соответствие номер цепи, которой принадлежит данное слово (массивы *МНЦ1* и *МНЦ2*).

Номер цепи в массиве *МНЦ1* или *МНЦ2* одновременно является номером граничного указателя в массиве границ указателей для прямого — *МГРУФ* и обратного — *МГРУФ⁻¹* отображений. Номера элементов, контакты которых находятся в прямом или обратном отображении рассматриваемого слова, указаны в массиве *МНЭФ* или *МНЭФ⁻¹*. В массивах *МНУФ* и *МНУФ⁻¹* записаны номера граничных указателей массивов *МГРСВХ* и *МГРСВЫХ*, которые определяют слова, находящиеся в прямом или обратном отображении.

§ 11.5. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕЙС

Для получения математической модели схемы необходимо преобразовать исходное описание схемы в структуру памяти модели. Требование автоматизированного получения модели ставит проблему создания информационного интерфейса между схемотехническим и конструкторским этапами проектирования. Эта проблема связана с лингвистическим обеспечением системы автоматизированного конструкторского проектирования.

В САПР используется несколько способов (см. § 11.3) описания схемы соединения элементов. Исходное описание схемы может быть сделано и на одном из языков конструкторских данных. Создание унифицированного входного языка описания схем или конструкторских данных является достаточно сложной задачей и мало оправдано в связи с изменчивостью требований к нему. Одним из направлений решения проблемы является разработка информационного обеспечения, открытого для включения как существующих, так и новых входных языков. Это будет оправдано при наличии в системе единого внутреннего представления данных о схеме, преобразование в которое с любого входного языка осуществляется достаточно простыми трансляторами. Тогда сложная программа построения математической модели схемы будет общей для любых способов описания схем.

Для построения математической модели схемы необходима информация о номерах (именах) элементов схемы и их контактов, типах элементов и принадлежности контактов цепям, которые идентифицируются своими номерами. Различные способы описания схемы соединения элементов несут эту информацию (в ряде случаев еще и некоторую дополнительную), отличаясь размерами, количеством и порядком следования полей в записи (звене). При получении математической модели схемы выполняется процессорная обработка массивов большой размерности, которые в дальнейшем нет необходимости хранить в базе

или архиве данных. Для обеспечения высокой эффективности работы совокупности программных средств построения модели схемы внутреннее представление данных должно иметь векторную структуру памяти массивов номеров элементов ($NЭ$), типов элементов ($TЭ$), номеров контактов ($NК$) и номеров цепей ($NЦ$), которым эти контакты принадлежат.

Построение базовой модели из первичного описания выполняется в два этапа: преобразование исходного описания во внутреннее представление данных и получение структуры памяти информационных массивов модели из него.

Получение внутреннего представления данных о схеме заключается в преобразовании совокупности звеньев (записей) предложений входного языка в векторную структуру простых элементов данных массивов $NЭ$, $TЭ$, $NК$, $NЦ$:

$$X [R] \rightarrow Y [k],$$

где X — имя (указатель) поля звена; R — переменное имя звена; Y — имя вектора ($NЭ$, $TЭ$, $NК$, $NЦ$); k — индекс.

Алгоритм построения структуры памяти информационных массивов базовой модели из внутреннего представления данных о схеме.

Массивы $NЭ$, $TЭ$, $NК$ и $NЦ$ рассматриваем как множество A упорядоченных четверок вида $\langle NЭ, TЭ, NК, NЦ \rangle$. Если цепи и элементы идентифицированы именами, то им присваиваются условные номера.

Основные пункты алгоритма.

1. Элементы массива A упорядочиваем по номерам элементов схемы, т. е. в множестве A образуем множество подмножеств A_i упорядоченных четверок с одинаковыми первыми элементами:

$$A = \{A_i / i = \overline{1, N}\}, \quad A_i = \{\langle NЭ, TЭ, NК, NЦ \rangle_{k/k = \overline{1, n_i}}\},$$

где N — количество элементов схемы; n_i — количество задействованных контактов i -го элемента.

2. По третьему и четвертому элементам упорядоченных четверок в каждом подмножестве A_i формируем упорядоченные двойки вида $\langle NК, NЦ \rangle$ и приписываем им номер и тип элемента. Получаем подмножество вида

$$A'_i = \{\langle NЭ, TЭ \rangle, \langle \langle NК, NЦ \rangle_{k/k = \overline{1, n_i}} \rangle\}.$$

3. Из каждого подмножества A'_i номер и тип элемента заносим в массивы номеров и типов элементов базовой модели. Получаем множество

$$A''_i = \{\langle NК, NЦ \rangle_{k/k = \overline{1, n_i}}\}.$$

4. Элементы массивов A''_i упорядочиваем в соответствии с расположением контактов элементов схемы и разбиваем на два непересекающихся подмножества в зависимости от того, является второй элемент упорядоченной пары выходным или входным контактом:

$$\overrightarrow{A}_i = \{ \langle NK, NЦ \rangle / l = \overline{1, n'_i} \},$$

$$\overleftarrow{A}_i = \{ \langle NK, NЦ \rangle / l = \overline{1, n''_i} \},$$

где $n'_i + n''_i = n_i$, n'_i и n''_i — количество задействованных выходных и входных контактов i -го элемента схемы.

5. Объединяем первые элементы упорядоченных двоек, имеющих одинаковый второй элемент, в упорядоченные n -ки (слова-выходы и слова-входы i -го элемента схемы) и приписываем им номер цепи, т. е. формируем новые упорядоченные двойки вида $\langle \langle NK_1, NK_2, \dots, NK_t \rangle, NЦ \rangle$. Получаем подмножества:

$$\overrightarrow{A}_i^m = \{ \langle \langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T'_j}, NЦ \rangle / j = \overline{1, S'_i} \},$$

$$\overleftarrow{A}_i^m = \{ \langle \langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T''_j}, NЦ \rangle / j = \overline{1, S''_i} \},$$

где T'_j — количество контактов, входящих в j -е слово-выход; T''_j — количество контактов, входящих в j -е слово-вход; S'_i и S''_i — количество слов-выходов и слов-входов i -го элемента схемы соответственно.

6. Номера цепей, т. е. вторые элементы упорядоченных двоек вида $\langle \langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T'_j (T''_j)}, NЦ \rangle$, подмножеств \overrightarrow{A}_i^m и \overleftarrow{A}_i^m заносим в массивы $MНЦ1$ и $MНЦ2$ соответственно (см. рис. 11.5). Формируем подмножества $\overrightarrow{A}_i^{IV}$ и \overleftarrow{A}_i^{IV} упорядоченных n -ок вида $\langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T'_j (T''_j)} \rangle$, т. е. слова-выходы и слова-входы i -го элемента схемы:

$$\overrightarrow{A}_i^{IV} = \{ \langle \langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T'_j} \rangle / j = \overline{1, S'_i} \},$$

$$\overleftarrow{A}_i^{IV} = \{ \langle \langle NK_t \rangle / t = \overline{1, T''_j} \rangle / j = \overline{1, S''_i} \}.$$

Множество этих подмножеств ($i = \overline{1, N}$) образуют массивы слов-выходов ($MВЫХК$) и слов-входов ($MВХК$) соответственно.

7. Вычисляем элементы массивов $MГРКВЫХ$ и $MГРКВХ$ по правилу:

$$MГРКВЫХ_i = MГРКВЫХ_{i-1} + |\overrightarrow{A}_i^{IV}|,$$

$$MГРКВХ_i = MГРКВХ_{i-1} + |\overleftarrow{A}_i^{IV}|,$$

причем $MГРКВЫХ_0 = MГРКВХ_0 = 0$.

8. Формируем подмножества P_i и Q_i , элементы которых равны числу контактов, входящих в j -е слово-выход (вход):

$$P_i = \{ T'_j / j = \overline{1, S'_i} \}, \quad Q_i = \{ T''_j / j = \overline{1, S''_i} \}.$$

9. Формируем множества P и Q :

$$P = \{ P_i / i = \overline{1, N} \}, \quad Q = \{ Q_i / i = \overline{1, N} \}$$

$$\text{или } P = \{ p_k / k = \overline{1, S'} \}, \quad Q = \{ q_l / l = \overline{1, S''} \},$$

где $S' = \sum_{i=1}^N S'_i$, $S'' = \sum_{i=1}^N S''_i$ и вычисляем элементы массивов границ

слов-выходов и слов-входов по правилу:

$$\begin{aligned} МГРСВYX_k &= МГРСВYX_{k-1} + p_k, \\ МГРСВX_l &= МГРСВX_{l-1} + q_l, \end{aligned}$$

причем $МГРСВYX_0 = МГРСВX_0 = 0$.

10. Элементам массивов $МНЦ1$ и $МНЦ2$ сопоставляем числа натурального ряда $k = 1, 2, \dots, S'$; $l = 1, 2, \dots, S''$. Упорядочивая числа натурального ряда $k = 1, 2, \dots, S'$ в соответствии с номерами цепей массива $МНЦ1$, а числа ряда $l = 1, 2, \dots, S''$ в соответствии с номерами цепей массива $МНЦ2$, получаем массивы номеров указателей слов-выходов ($МНУF^{-1}$) и слов-входов ($МНУF$) для обратного и прямого отображений.

11. Массивы $НЦ, NЭ, НК$ рассматриваем как множество B упорядоченных троек вида $\langle НЦ, NЭ, НК \rangle$. Выполняем упорядочивание элементов массива B по номерам цепей, т. е. в множестве B образуем множество подмножеств B_m упорядоченных троек с одинаковым первым элементом:

$$B = \{B_m/m = \overline{1, M}\}, \quad B_m = \{\langle НЦ, NЭ, НК \rangle_k/k = \overline{1, n_m}\},$$

где M — число цепей схемы; n_m — количество контактов, принадлежащих m -й цепи.

12. Из упорядоченных троек исключаем номер цепи, получаем множество подмножеств упорядоченных двоек:

$$B'_m = \{\langle NЭ, НК \rangle_k/k = \overline{1, n_m}\}.$$

13. Каждое множество B'_m разбиваем на два непересекающихся подмножества $\overrightarrow{B'_m}$ и $\overleftarrow{B'_m}$ в соответствии с выходными и входными контактами элементов:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{B'_m} &= \{\langle NЭ, НК \rangle_{i/l} = \overline{1, n'_m}\}, \\ \overleftarrow{B'_m} &= \{\langle NЭ, НК \rangle_{i/l} = \overline{1, n''_m}\}, \end{aligned}$$

где $n'_m + n''_m = n_m$, n'_m и n''_m — количество выходных и входных контактов, принадлежащих m -й цепи соответственно.

14. Объединяем вторые элементы упорядоченных двоек подмножеств $\overrightarrow{B'_m}$ и $\overleftarrow{B'_m}$, имеющие одинаковый первый элемент, и приписываем им номер элемента, т. е. формируем новые упорядоченные двойки вида $\langle NЭ, \langle НК_1, НК_2, \dots, НК_t \rangle \gg$. Получаем подмножества:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{B''_m} &= \{\langle NЭ, \langle НК_t \rangle_{i/t} = \overline{1, P'_j} \rangle_{j/j} = \overline{1, R'_m}\}, \\ \overleftarrow{B''_m} &= \{\langle NЭ, \langle НК_t \rangle_{i/t} = \overline{1, P''_j} \rangle_{j/j} = \overline{1, R''_m}\}, \end{aligned}$$

где R'_m — количество элементов, выходные контакты которых принадлежат m -й цепи; R''_m — количество элементов, входные контакты которых принадлежат m -й цепи; P'_j и P''_j — количество контактов, входящих в j -е слово-выход или слово-вход соответственно.

15. В массивах \overrightarrow{B}_m и \overleftarrow{B}_m исключаем вторые элементы упорядоченных двоек:

$$\overrightarrow{B}_m = \{N\mathcal{E}_j/j = \overline{1, R'_m}\}, \quad \overleftarrow{B}_m = \{N\mathcal{E}_j/j = \overline{1, R''_m}\}.$$

16. Вычисляем элементы массивов границ указателей прямого и обратного отображений ($MГРУF$ и $MГРУF^{-1}$) по правилам:

$$\begin{aligned} MГРУF_m &= MГРУF_{m-1} + |\overrightarrow{B}_m|, \\ MГРУF_m^{-1} &= MГРУF_{m-1}^{-1} + |\overleftarrow{B}_m|, \end{aligned}$$

причем $MГРУF_0 = MГРУF_0^{-1} = 0$.

17. Множество подмножеств \overrightarrow{B}_m и \overleftarrow{B}_m ($m = \overline{1, M}$) образуют массивы номеров элементов прямого ($MНЭF$) и обратного ($MНЭF^{-1}$) отображений соответственно. Построение базовой модели схемы закончено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрайтис Л. Б., Шейнаукас Р. И., Жилевичюс В. А.* Автоматизация проектирования ЭВМ. — М.: Советское радио, 1978. — 269 с.
2. *Даффин Р., Питерсон Э., Зенер К.* Геометрическое программирование. — М.: Мир, 1972. — 311 с.
3. *Деньдобренко Б. Н., Малика А. С.* Автоматизация конструирования РЭА. — М.: Высшая школа, 1980. — 384 с.
4. *Долкарт В. М., Новик Г. Х.* Конструктивные и электрические характеристики многослойных печатных плат. — М.: Советское радио, 1974. — 87 с.
5. *Дружинин Г. В.* Надежность автоматизированных систем. — М.: Энергия, 1977. — 536 с.
6. *Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н.* Тепловые режимы электронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971. — 248 с.
7. *Зыков А. А.* Теория конечных графов, т. I. — Новосибирск: Наука, 1969. — 544 с.
8. Конструирование функциональных узлов ЭВМ на интегральных схемах/*Ермолаев Б. И., Вартамян В. И., Дудоров И. В. и др.*; Под ред. Б. И. Ермолаева. — М.: Советское радио, 1978. — 200 с.
9. *Майоров С. А., Крутовских С. А., Смирнов А. А.* ЭВМ: Справочник по конструированию/ Под ред. С. А. Майорова. — М.: Советское радио, 1975. — 504 с.
10. *Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М.* Применение графов для проектирования дискретных устройств. — М.: Наука, 1974. — 303 с.
11. Методы разбиения схем РЭА на конструктивно законченные части/*Морозов К. К., Мелихов А. Н., Берштейн Л. С. и др.*; Под ред. К. К. Морозова. — М.: Советское радио, 1978. — 134 с.
12. *Наумов Ю. Е., Аваев Н. А., Бедревский М. А.* Помехоустойчивость устройств на интегральных логических схемах. — М.: Советское радио, 1975. — 215 с.
13. *Ненашев А. П., Коледов Л. А.* Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 1981. — 303 с.
14. *Овчинников В. В., Дихуня В. Л., Чичерин Ю. Е.* Проектирование быстродействующих микроэлектронных устройств. — М.: Советское радио, 1975. — 288 с.
15. *Оре О.* Теория графов. — М.: Наука, 1980. — 336 с.
16. ОСТ4 ГО.010.009. Редакция 2—73. Узлы и блоки радиоэлектронной аппаратуры на микросхемах. Конструирование. 1974. — 191 с.
17. *Петренко А. И., Тетельбаум А. Я.* Формальное конструирование электронно-вычислительной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1979. — 256 с.
18. *Преснухин Л. Н., Шахнов В. А., Кустов В. А.* Основы конструирования микроэлектронных вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976. — 408 с.
19. *Селютин В. А.* Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Советское радио, 1977. — 383 с.
20. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/ Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Советское радио, 1980. — 480 с.
21. Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем/ Под ред. М. Брейера. — М.: Мир 1977. — 283 с.
22. Цифровые устройства на микросхемах/ Под ред. В. М. Волчека, Е. Г. Ойхмана. — М.: Энергия, 1975. — 192 с.
23. *Чурин Ю. А.* Переходные процессы в линиях связи быстродействующих схем ЭВМ. — М.: Советское радио, 1975. — 207 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
<i>Глава 1.</i> Общая характеристика процесса конструкторского проектирования ЭВМ и систем	7
§ 1.1. Этапы процесса проектирования	7
§ 1.2. Общие принципы, цели и задачи конструкторского проектирования ЭВМ и систем	10
§ 1.3. Математическая модель конструкции ЭВМ и систем	13
<i>Глава 2.</i> Геометрическая компоновка типовых конструкций ЭВМ и систем	17
§ 2.1. Общие технические требования, предъявляемые к типовым конструкциям ЭВМ и систем	17
§ 2.2. Типовые схемы геометрической компоновки конструкций ЭВМ и систем	18
§ 2.3. Выбор компоновочных схем и расчет геометрических размеров типовых конструкций ЭВМ и систем	22
<i>Глава 3.</i> Типовые конструкции ЭВМ и систем	27
§ 3.1. Субблоки	27
§ 3.2. Конструирование печатных плат	34
§ 3.3. Панели и блоки	41
§ 3.4. Рамы и стойки	46
§ 3.5. Элементы электрических соединений	53
<i>Глава 4.</i> Конструирование с учетом надежности	63
§ 4.1. Основные показатели надежности	63
§ 4.2. Оценка показателей надежности ЭВМ как сложного объекта	67
§ 4.3. Оценка надежности типовых конструкций	68
§ 4.4. Повышение надежности резервированием	71
<i>Глава 5.</i> Конструирование типовых элементов с учетом паразитных влияний	76
§ 5.1. Виды линий связи и их электрические параметры	76
§ 5.2. Выбор типа линии связи и определение ее допустимой длины с учетом эффекта отражений	81
§ 5.3. Помехи во взаимодействующих линиях связи	85
§ 5.4. Методы уменьшения перекрестных помех	90
§ 5.5. Помехи по цепям управления и питания	92
§ 5.6. Анализ конструктивной топологии элементов принципиальной электрической схемы и их связей	96
§ 5.7. Рекомендации по конструированию линий связи	99
<i>Глава 6.</i> Тепловые расчеты конструкций ЭВМ	101
§ 6.1. Теплообмен в ЭВМ	101
§ 6.2. Способы переноса тепловой энергии	102
§ 6.3. Принципы суперпозиции температурных полей и местного влияния	112
§ 6.4. Определение теплового сопротивления типовой конструкции	113
§ 6.5. Методика получения тепловых моделей конструкций ЭВМ	117

§ 6.6. Анализ теплового режима одноблочной конструкции при естественном охлаждении	120
§ 6.7. Тепловой режим многоблочной стойки с принудительной вентиляцией	125
§ 6.8. Поверочный расчет температуры корпуса интегральной схемы при жидкостном охлаждении многоблочной стойки	129
Глава 7. Особенности конструирования нестационарных ЭВМ	132
§ 7.1. Условия работы нестационарных ЭВМ	132
§ 7.2. Анализ конструкции ЭВМ	135
§ 7.3. Расчет платы типового элемента ЭВМ	142
§ 7.4. Пример расчета типовой платы	147
§ 7.5. Конструирование несущих элементов модулей ЭВМ	150
Глава 8. Математические основы автоматизации конструирования	154
§ 8.1. Элементы теории графов	154
§ 8.2. Изоморфизм и планарность графов	163
§ 8.3. Математические модели схем и монтажного пространства	166
Глава 9. Компоновка типовых элементов конструкций	176
§ 9.1. Постановка задачи компоновки. Критерии оптимизации и ограничения	176
§ 9.2. Последовательные алгоритмы разбиения схем	181
§ 9.3. Итерационные алгоритмы компоновки	185
§ 9.4. Алгоритм определения идентичности частей схем	189
§ 9.5. Алгоритм решения задачи покрытия	192
Глава 10. Размещение и трассировка	198
§ 10.1. Постановка задачи размещения. Критерии оптимизации	198
§ 10.2. Последовательные алгоритмы размещения	201
§ 10.3. Улучшение размещения перестановкой модулей	205
§ 10.4. Общая постановка задачи трассировки	209
§ 10.5. Волновой алгоритм решения задачи трассировки и трассировка в каналах	215
Глава 11. Информационное обеспечение конструкторского проектирования	226
§ 11.1. Принципы построения информационного обеспечения	226
§ 11.2. Структуры данных и структуры памяти	229
§ 11.3. Описание конструкторских данных	233
§ 11.4. Базовая модель схемы	236
§ 11.5. Информационный интерфейс	241
Список литературы	246

Александр Яковлевич Савельев
Владимир Анатольевич Овчинников

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭВМ И СИСТЕМ

Заведующая редакцией Н. И. Хрусталева. Редактор В. И. Петухова. Младший редактор
Е. И. Попова. Художник В. В. Гарбузов. Художественный редактор
В. И. Мешалкин. Технический редактор З. А. Муслимова. Корректор Р. К. Косинова

ИБ № 4376

Изд. № СТД-408	Сдано в набор 26.09.83.	Подп. в печать 06.03.84.	T-06668
Формат 60×90 ^{1/16} .	Бум. тип. № 2.	Гарнитура литературная.	Печать офсетная
Объем 15,5 усл. печ. л.	15,75 усл. кр.-отт.	15,84 уч.-изд. л.	Тираж 16 000 экз
	Зак. № 1810	Цена 1 руб.	

Издательство «Высшая школа», 101430 Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46

