

А. Г. ЦВЕТКОВ

**ПРИНЦИПЫ  
КОЛИЧЕСТВЕННОЙ  
ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

**А. Г. Цветков**

**ПРИНЦИПЫ  
КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

Под редакцией Матвеевского С. Ф.



Издательство «Советское радио» Москва — 1971

ЦВЕТКОВ А. Г. Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. М., Изд-во «Советское радио», 1971, 200 стр., т. 8000 экз., ц. 63 коп.

В книге излагаются принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств.

Рассмотрены основные показатели, используемые в качестве критериев при оценке эффективности радиоэлектронных средств. Приведены зависимости для определения этих показателей применительно к некоторым видам радиоэлектронных средств. Значительное внимание уделено вопросам оценки эффективности радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности и возможного противодействия.

Книга предназначена для специалистов, работающих в областях проектирования и использования радиоэлектронных средств.

Табл. 3, рис. 20, библиогр. назв. 19.

Александр Григорьевич Цветков  
**ПРИНЦИПЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

Редактор В. Г. Машарова  
Художественный редактор В. Т. Сидоренко  
Обложка художника В. В. Волкова  
Технический редактор З. Н. Ратникова  
Корректоры Е. П. Озерецкая, Н. М. Кухтыева

---

Сдано в набор 25/IX 1970 г.	Подписано в печать 29/I 1971 г.	T-01840
Формат 84×108 <sup>1/32</sup>	Бумага типографская № 2	Объем 10,5 усл. п. л.
Уч.-изд. л. 10,453	Тираж 8 000 экз.	Цена 63 коп. Зак. 1398

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, п/я. 693.

---

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Москва, Шлюзовая наб., д. 10.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Обеспечение высокой эффективности современных технических средств является весьма актуальной проблемой. Решение этой проблемы осуществляется в сфере производства созданием средств, способных наилучшим образом выполнять стоящие перед ними задачи, а в сфере эксплуатации — путем разработки и реализации оптимальных методов их использования.

Одним из условий успешного решения задач, относящихся к этой проблеме, является умение количественно оценивать эффективность технических средств и методов их использования с той степенью полноты, которая определяется целями проводимых исследований.

Эта оценка сводится к выбору специальных показателей или критериев, могущих служить мерой эффективности соответствующих технических средств, а также к определению путей нахождения их значений.

Основные принципы количественной оценки эффективности являются общими для всех видов технических средств независимо от их назначения и сложности. Они базируются на самых общих законах, которые имеют место при производстве и организации применения любых технических средств, а также на использовании их наиболее общих свойств.

Каждый вид или группа технических средств имеют специфические свойства, обусловленные их назначением, принципом действия и условиями применения. Эти свойства обуславливают особенности количественной оценки эффективности, присущей любым конкретным видам технических средств.

Предлагаемая вниманию читателей книга посвящена изложению принципов количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств.

В ее первой главе изложены принципы выбора критериев для оценки эффективности технических средств и рассмотрены особенности оценки эффективности некоторых радиоэлектронных средств, а также средств, являющихся элементами комплексов и больших систем.

Вторая глава посвящена изложению наиболее общих особенностей количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. На основе анализа места и роли радиоэлектронных средств в современной технике

обоснованы показатели, которые могут быть использованы в качестве критериев их эффективности, а на основе анализа наиболее общих свойств этих средств и условий их применения — содержание и особенности определения значений указанных показателей.

В третьей главе изложены принципы определения критериев эффективности радиоэлектронных средств, выполняющих свои функции без противодействия и обладающих абсолютной надежностью. Рассмотрены пути определения указанных критериев для радиоэлектронных средств, выполняющих в комплексах и системах военной техники функции обнаружения, целеуказания и управления стрельбой.

В четвертой главе изложены принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности.

В пятой главе рассмотрены особенности оценки эффективности радиоэлектронных средств, выполняющих свои функции в условиях радиопротиводействия.

Излагаемый в книге материал иллюстрируется примерами. При выборе этих примеров использовались опубликованные материалы. Численные значения исходных данных в примерах являются гипотетическими и выбраны, исходя из методических соображений.

В конце книги приведен перечень некоторых работ в области исследования операций, основ радиолокации и теории надежности, положения которых являются основой принципов количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. Там же помещен и перечень основных условных обозначений.

Книга предназначена для специалистов, работающих в областях проектирования и использования радиоэлектронных средств. Излагаемый в ней материал требует от читателя знания основ радиоэлектроники и теории вероятностей.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность С. Ф. Матвеевскому за ценные советы при подготовке рукописи и большую работу по редактированию книги, а также В. А. Кузнецову, давшему ряд полезных рекомендаций.

Автор будет признателен всем читателям, которые сочтут возможным высказать свои замечания и пожелания по содержанию книги.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

### 1.1. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Создание и использование любых технических средств относится к области целенаправленной деятельности человека. Это значит, во-первых, что каждое средство создается для решения вполне определенных задач в соответствующих условиях. Иначе можно сказать, что каждое средство имеет вполне определенное назначение. Во-вторых, это значит, что человек стремится так проектировать и использовать любые средства, чтобы стоящие перед ними задачи выполнялись наилучшим образом, иначе, чтобы каждое средство в наибольшей степени соответствовало своему назначению, т. е. имело наибольшую эффективность. Эффективность является важнейшей и наиболее общей характеристикой любых технических средств.

Высокая стоимость создания и эксплуатации современных технических средств, а также значительное время, необходимое для их разработки и внедрения, заставляют обращать особое внимание на обеспечение их высокой эффективности.

Необходимым условием успешного решения многочисленных задач, относящихся к данной проблеме, является умение количественно оценивать эффективность исследуемых средств в заданных условиях их использования по назначению.

Оценка эффективности осуществляется с помощью специальных критериев. В этой связи одним из первых шагов при решении любой задачи, связанной с количественной оценкой эффективности, является определение вида показателя, который бы мог служить мерой эффек-

тивности исследуемого средства в соответствующих условиях, а также определение путей нахождения его значения. Выбор критериев является одним из основных моментов при решении любых задач, основанных на количественной оценке эффективности технических средств и методов их использования. Правильный выбор критериев во многом предопределяет успех исследований и позволяет выполнять их с наименьшей затратой сил и средств.

Вопрос о выборе показателей, пригодных для использования в качестве критериев эффективности, рассмотрен в работах ряда авторов. В них приведены как некоторые общие соображения по данному вопросу, так и рекомендации по использованию конкретных показателей в качестве критериев эффективности при решении определенных задач.

Так, в книге Е. С. Вентцель [2] при решении вопроса о выборе показателей для использования в качестве критериев эффективности рекомендуется руководствоваться следующими основными положениями:

— выбранный показатель должен отражать основное назначение средства, а также соответствовать цели проводимого исследования;

— используемый в качестве критерия показатель должен быть критичен по отношению к параметрам, определяющим его значение;

— используемый в качестве критерия показатель должен быть наглядным и по возможности просто определяемым.

В этой же книге приведен перечень показателей, которые рекомендуются для использования в качестве критериев при решении ряда задач, основанных на количественной оценке эффективности некоторых видов технических средств.

В работе И. А. Ушакова [15] в качестве критерия при оценке эффективности достаточно большой группы технических средств, так называемых сложных систем, рекомендуется использовать вероятность выполнения стоящих перед ними задач.

Учитывая большую роль критериев при проведении исследований, связанных с оценкой эффективности, представляется целесообразным более подробно рассмотреть вопрос о принципах их выбора.

Каждое техническое средство имеет определенное назначение, связанное с решением соответствующих (по виду и объему) задач в определенных условиях. Критерий эффективности должен объективно отражать степень соответствия средства своему назначению. Поэтому сразу же возникает вопрос о том, какие характеристики, свойства или параметры средств наиболее полно отражают степень соответствия их своему назначению.

Для его решения необходимо условиться, какие технические средства следует считать эффективными. Внимательный анализ всех аспектов данного вопроса позволяет сделать вывод о том, что эффективными следует считать такие средства, которые удовлетворяют следующим основным требованиям:

— полностью и в установленные сроки выполняют в соответствующих условиях стоящие перед ними задачи. Степень соответствия средств данному требованию в дальнейшем будем называть их технической эффективностью;

— результаты использования которых по назначению не меньше затрат на их создание и обслуживание в процессе эксплуатации. Степень соответствия средств данному требованию в дальнейшем будем называть их экономической эффективностью.

Итак, эффективность любых средств определяется назначением, а также результатами использования по назначению и затратами на их создание и эксплуатацию. В этой связи показатели, предназначенные для использования в качестве критериев эффективности технических средств, должны в общем случае содержать в своем составе параметры или характеристики, описывающие назначение, результаты применения, а также затраты на их создание и эксплуатацию. Совершенно очевидно, что эффективность средства, имеющего определенное назначение, будет тем выше, чем больше результат применения и меньше затраты на его создание и эксплуатацию.

Критерий, отвечающий указанным требованиям, предложен Х. Г. Волховером и другими авторами [4]. Он имеет следующий вид:

$$E = \frac{W - C}{W_{\pi}}, \quad (1.1.1)$$

где  $W$  — результат использования средства по назначению;  $C$  — затраты на его создание и эксплуатацию;

$W_n$  — назначение средства, которое можно определить как результат применения средства в случае, когда стоящие перед ним задачи выполняются в полном объеме.

Критерий (1.1.1) может быть использован для оценки эффективности любых как существующих, так и проектируемых технических средств. Он характеризует, в какой степени эффективность соответствующего средства отличается от предельно возможной (идеальной), которая имеет место при  $W = W_n$  и  $C = 0$ . Недостаток показателя (1.1.1) состоит в том, что он не в полной мере отвечает одному из основных требований к критериям эффективности — их наглядности. Это объясняется тем, что он отображает эффективность средств не в том виде, как это обычно требуется для решения практических задач. Кроме того, применение этого критерия во многих случаях встречает значительные трудности, связанные со сложностью определения его составных частей и необходимостью выражения показателей  $W$  и  $W_n$  в стоимостном виде.

Анализ характера практических задач, основанных на количественной оценке эффективности средств, показывает возможность применения в качестве критериев показателей, более наглядных и простых по сравнению с (1.1.1). Эта возможность вытекает из того обстоятельства, что многие практические задачи могут быть решены на основе раздельной оценки технической и экономической эффективности исследуемых средств. Критерии технической эффективности представляют собой итоги сравнения назначения средств и результатов их использования, т. е.

$$E_T = E_T(W, W_n),$$

а критерии экономической эффективности — итоги сравнения результатов применения средств и затрат на их создание и эксплуатацию, т. е.

$$E_3 = E_3(W, C).$$

В зависимости от цели проводимого исследования и способа сравнения показателей  $W$  и  $W_n$  для оценки технической эффективности средств могут быть использованы следующие критерии:

$$E_T = W - W_n; \quad E_T = \frac{W}{W_n}.$$

Нетрудно видеть, что указанные критерии являются достаточно наглядными, поскольку каждый из них имеет такое содержание, которое может быть непосредственно использовано при решении соответствующих практических задач. С точки зрения сложности определения численных значений второй из приведенных критериев технической эффективности является более предпочтительным, поскольку при его определении можно использовать не только сложные показатели  $W$  и  $W_n$ , но и их составные части. Аналогичными соображениями можно руководствоваться и при выборе критериев для оценки экономической эффективности средств.

Возможность применения в качестве критериев показателей, более простых по сравнению с (1.1.1), вытекает также из того обстоятельства, что при решении практических задач обычно требуется не оценивать абсолютную эффективность средств, а сравнивать эффективность ряда средств одного назначения при их использовании в определенных условиях или одного и того же средства при использовании его в различных условиях. Большинство указанных задач может быть решено на основе сравнения значений критериев технической и экономической эффективности средств. Сравнительная оценка экономической эффективности средств одного назначения осуществляется с помощью критериев, содержащих в своем составе показатели  $W$  и  $C$ .

Возможны два основных вида таких критериев. Первый из них представляет собой разность указанных показателей и имеет следующий вид:

$$E = W - C.$$

Второй критерий представляет собой отношение показателей  $W$  и  $C$  и имеет следующий вид:

$$E = \frac{W}{C}. \quad (1.1.2)$$

Оба критерия могут быть использованы при решении задач, основанных на сравнительной оценке эффективности как существующих, так и проектируемых средств. Однако применение показателя (1.1.2) при решении этих задач является более удобным, поскольку вычисление разности показателей  $W$  и  $C$  во многих случаях значи-

тельно труднее вычисления их отношения. Это связано с тем, что при вычислении разности ( $W-C$ ) значение показателя  $W$ , как и показателя  $C$ , должно выражаться в стоимостном виде, что во многих случаях затруднено. В то же время при определении показателя (1.1.2) можно пользоваться как стоимостным, так и натуральным выражением показателя  $W$ .

Показателем (1.1.2) особенно удобно пользоваться при сравнительной оценке эффективности средств многократного действия и средств, являющихся элементами комплексов и систем техники. Для этих средств и условий их использования во многих случаях могут изменяться только отдельные составные части показателя (1.1.2). Это дает возможность в качестве критерия эффективности при сравнительной оценке средств использовать не только показатель (1.1.2), но и те, более просто определяемые его составные части, значения которых могут изменяться в заданных условиях применения исследуемых средств. Используемые в качестве критериев при решении задач составные части показателя (1.1.2) будем называть частными критериями. Поскольку в различных условиях составные части показателя (1.1.2) могут вести себя по-разному, то при решении различных задач применительно к одному и тому же средству могут использоваться отличные друг от друга частные критерии эффективности. В отличие от частных критериев показатель (1.1.2) в дальнейшем будем называть основным критерием при оценке сравнительной эффективности средств.

Рассмотрим возможные виды показателей, которые могут быть использованы в качестве частных критериев эффективности технических средств. Сравнение эффективности средств одного назначения можно производить с помощью следующего соотношения:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1/C_1}{W_2/C_2}, \quad (1.1.3)$$

где показатели с индексом «1» относятся к одному, а с индексом «2» — ко второму средству или соответственно к различным условиям использования одного и того же средства.

Нетрудно видеть, что в тех случаях, когда стоимость средства, используемого в различных условиях, остается неизменной или изменяется незначительно ( $C_1 \approx C_2$ ),

в качестве частного критерия эффективности может быть использован показатель  $W$ , а также те его составные части, значения которых будут изменяться в заданных условиях использования средства. При определении вида таких частей показателя  $W$  необходимо учитывать характер функционирования средств, которые по этому признаку могут быть разделены на две группы.

К первой группе будем относить такие средства, процесс функционирования которых представляет собой выполнение последовательных по времени однотипных законченных действий или операций.

Необходимо заметить, что данное определение операции как действия, дающего определенный законченный результат, является достаточно гибким и позволяет вкладывать в него для одного и того же средства различное содержание в зависимости от цели проводимого исследования. Так, для радиолокационной станции обнаружения, работающей по графику, операцией в одном случае целесообразно считать процесс обнаружения и обслуживания одиночной цели, а в другом (например, при исследовании влияния надежности на эффективность) — процесс выполнения станцией своих функций в течение определенного времени. Средства данной группы могут быть однократного или многократного действия. Примером средства однократного действия может служить зенитная ракета, а средств многократного действия — радиолокационная станция обнаружения.

Пусть средство многократного действия в ходе эксплуатации выполняет  $K_K$  операций. Если результат  $i$ -й операции, выполненной средством многократного действия, оценивается величиной  $X_i$ , то полный результат использования этого средства может быть определен как

$$W = \sum_{i=1}^{K_K} X_i. \quad (1.1.4)$$

Основной критерий эффективности такого средства может быть определен с помощью следующего выражения:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{K_K} X_i}{C}. \quad (1.1.5)$$

Если операции, выполняемые средством многократного действия, однотипны и дают одинаковый результат ( $X_0$ ), то показатель  $W$  и основной критерий эффективности такого средства могут быть определены с помощью следующих выражений:

$$W = K_K X_0, \quad (1.1.6)$$

$$E = \frac{K_K X_0}{C}, \quad (1.1.7)$$

Выражения (1.1.6) и (1.1.7) могут быть использованы для определения полного результата применения и основного критерия эффективности и тех средств многократного действия, у которых операции могут иметь различные результаты. В этом случае под величиной  $X_0$  следует понимать среднее значение (математическое ожидание) результата использования средства в операции.

Ко второй группе будем относить средства, результат использования которых пропорционален времени их применения по назначению. Совершенно очевидно, что полный результат использования по назначению средств данной группы

$$W = A_p T_c, \quad (1.1.8)$$

где  $A_p$  — производительность средства, т. е. средний результат его использования по назначению за единицу времени;  $T_c$  — суммарная продолжительность использования средства по назначению.

Основной критерий эффективности средств данной группы может быть выражен как

$$E = \frac{A_p T_c}{C}. \quad (1.1.9)$$

Выражения (1.1.8) и (1.1.9) для определения показателей  $W$  и  $E$  средств данной группы аналогичны выражениям (1.1.6) и (1.1.7), используемым для определения тех же показателей средств, результат применения которых по назначению пропорционален количеству выполненных операций. Отмеченное обстоятельство дает возможность при определении показателей  $W$  и  $E$  пользоваться общими выражениями, пригодными для любых средств, в том числе и средств однократного действия ( $K_K=1$ ). Действительно, если через  $M(W_i)$  обозначить среднее значение (математическое ожидание) результата

применения средства в операции или в единицу времени, то полный результат его использования по назначению можно определить как

$$W = K_k M(W_i), \quad (1.1.10)$$

где  $K_k$  — количество выполненных операций или продолжительность использования средства по назначению (в зависимости от вида анализируемого средства).

С учетом (1.1.10) основной критерий эффективности средств может быть определен как

$$E = \frac{K_k M(W_i)}{C}. \quad (1.1.11)$$

Из выражения (1.1.11) следует, что для условий использования, при которых количество операций (продолжительность функционирования) и стоимость средства практически остаются постоянными, значение его основного критерия эффективности может изменяться только за счет изменения среднего результата отдельной операции. В этих случаях в качестве критериев при сравнительной оценке эффективности технических решений, средств и методов их использования правомерно и целесообразно использовать показатели, характеризующие результаты применения соответствующих средств в операции или в единицу времени, т. е. показатели  $X_i$  и  $A_p$ .

Необходимо отметить, что результаты использования многих средств в заданных условиях в операции или в единицу времени могут быть пропорциональными значению некоторых характеристик этих средств. Так, результат применения зенитно-ракетного комплекса по одиночному самолету противника в определенных условиях пропорционален вероятности вывода зенитной ракеты в поражаемое пространство цели. Указанные характеристики также могут быть использованы в качестве частных критериев при сравнительной оценке эффективности соответствующих средств.

В тех случаях, когда в заданных условиях использования результат применения средства в операции практически остается постоянным, значение показателя  $W$  может изменяться только за счет изменения количества выполняемых средством операций (продолжительности использования по назначению). Такое положение может

быть, например, при применении средств военной техники в условиях активного противодействия. В данном случае в качестве частных критериев эффективности могут быть использованы показатели  $K_{\kappa}(T_c)$ .

Аналогичными соображениями можно руководствоваться и при выборе критериев для сравнительной оценки технической эффективности средств.

Определение значений используемых критериев для каждого вида технических средств имеет свои особенности. Вместе с тем можно указать и ряд общих положений, которые могут быть использованы при определении значения любого критерия эффективности технического средства. Рассмотрим общие принципы определения показателя  $W$  и его составных частей.

Значение показателя  $W$  любого технического средства определяется схемными и конструктивными особенностями, планом или методом использования его по назначению; комплексом условий, в которых оно применяется.

Для количественной оценки схемных и конструктивных особенностей средств применяются специальные характеристики, которые в дальнейшем будем называть техническими. Вид и значения технических характеристик средства определяются при его проектировании. Необходимо, однако, иметь в виду, что значения многих технических характеристик средства могут изменяться в процессе его эксплуатации.

Совокупность технических характеристик средства в дальнейшем будем обозначать через  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \dots, \alpha_n)$ .

В качестве примера укажем, что техническими характеристиками радиолокационной станции являются вид излучения, рабочая частота, способ обзора, мощность излучения, чувствительность приемника, способ индикации и т. д.

Любое средство выполняет свои функции во взаимодействии с другими средствами и окружающей средой, иначе — используется по определенному плану и в определенных условиях.

Комплекс характеристик, описывающих условия использования средства, в дальнейшем будем обозначать через  $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ .

Комплекс характеристик, описывающих план или метод использования средства, в дальнейшем будем

обозначать через  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n)$ . Выбор плана или метода производится человеком, использующим средство.

Для описания результатов использования средства в соответствующих условиях применяются специальные характеристики, которые будем называть тактическими и обозначать через  $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_n)$ .

Необходимо заметить, что значения технических характеристик средства не зависят от условий его применения. Однако каждое средство используется по назначению в соответствующих условиях. Иначе можно сказать, что объективные возможности средства, описываемые совокупностью технических характеристик, реализуются в определенных условиях, в которых оно используется. В этой связи одно и то же средство, применяемое в различных условиях, может иметь различные значения одних и тех же тактических характеристик и давать различные результаты. Любая  $j$ -я тактическая характеристика описывает уровень свойства средства в тех или иных условиях; ее значение можно определить как

$$A_j = A_j(\alpha_{j_1}, \alpha_{j_2}, \dots, \beta_{j_1}, \beta_{j_2}, \dots, x_{j_1}, x_{j_2}, \dots), \quad (1.1.12)$$

Примером тактической характеристики может служить дальность действия радиолокационной станции, значение которой определяется как рядом технических характеристик станции (излучаемая мощность, чувствительность приемника и т. д.), так и условиями ее использования (значение эффективной отражающей поверхности цели, условия распространения радиоволн и т. д.).

Совокупность тактических характеристик полностью описывает результат использования средства в заданных условиях. Таким образом, показатель  $W$  любого средства в общем виде может быть определен как

$$W = W(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2) \quad (1.1.13)$$

или 
$$W = W(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_n). \quad (1.1.14)$$

Аналогичные общие зависимости могут быть использованы и для определения составных частей показателя  $W$ . В качестве примера рассмотрим некоторые особенности определения показателя  $K_{\text{к}}$ . Для средств однократного действия показатель  $K_{\text{к}} = 1$ . Значение этого показателя

теля для средств многократного действия может быть определено с помощью следующего выражения:

$$K_K = \frac{K_{\text{и}} T_{\text{р}}}{T_{\text{оп}}}, \quad (1.1.15)$$

где  $K_{\text{и}}$  — коэффициент использования средства по назначению;  $T_{\text{р}}$  — технический ресурс средства;  $T_{\text{оп}}$  — продолжительность использования средства в операции.

Коэффициент использования средства по назначению определяется выражением

$$K_{\text{и}} = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{и}} + T_{\text{п}}}, \quad (1.1.16)$$

где  $T_{\text{и}}$  — продолжительность использования средства по назначению;  $T_{\text{п}}$  — продолжительность работы средства при осуществлении профилактических мероприятий.

Точное значение показателя  $K_K$  может быть определено для тех средств, интенсивность использования и организация эксплуатации которых известны или могут планироваться.

Для многих средств показатель  $K_K$  может быть определен лишь для предполагаемых условий их использования. Примером таких средств может служить зенитно-ракетный комплекс, который используется по назначению только при проникновении в зону его действия самолетов противника. Пример расчета показателя  $K_K$  приведен ниже. Пусть технический ресурс станции наведения зенитно-ракетного комплекса равен 1000 час. Средняя продолжительность ее работы при обеспечении операции — 1 час. Профилактика станции осуществляется путем проведения ежедневных и еженедельных проверок, при этом станция работает в среднем соответственно 0,1 и 2 час.

Продолжительность работы станции в течение года при осуществлении профилактики равна

$$T_{\text{п}} = 0,1 \text{ час} \times 365 + 2 \text{ час} \times 52 = 140 \text{ час.}$$

Зададимся двумя средними значениями интенсивности использования станции по назначению: а) одна операция в сутки; б) одна операция за четверо суток.

С помощью выражений (1.1.16) и (1.1.15) можно определить, что для случая а)  $K_{\text{и}} = 0,72$  и  $K_K = 720$ ; для случая б)  $K_{\text{и}} = 0,4$  и  $K_K = 400$ .

## 1.2. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ, ЯВЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

Изложенные в § 1.1 общие принципы выбора и определения критериев эффективности могут быть использованы при исследовании любых средств, независимо от их назначения. Однако применение этих принципов в ряде случаев имеет определенные особенности, связанные с тем, что для выполнения стоящих задач могут использоваться средства различной сложности.

Прежде чем перейти к рассмотрению особенностей определения и применения критериев эффективности для различных видов средств, представляется целесообразным дать классификацию последних.

В дальнейшем все виды и группы технических средств будем разделять на три категории: просто средства, комплексы и системы. Сразу же заметим, что данная классификация и приведенные ниже определения средства, комплекса и системы являются достаточно условными. Они приводятся лишь для удобства рассмотрения особенностей определения и использования критериев эффективности применительно к различным видам и группам средств.

Средствами будем называть приборы или устройства, предназначенные для выполнения простых задач. Простой будем считать такую задачу, решение которой для заданных условий исследования требует осуществления однородного действия. Примером средства может служить радиолокационная станция обнаружения, осуществляющая однородные действия — обнаружение целей.

В соответствии с характером решаемых задач все средства могут быть разделены на две группы:

— автономные, предназначенные для решения самостоятельных простых задач;

— неавтономные, предназначенные для решения простых задач, являющихся составными частями сложных задач, выполняемых комплексами и системами, элементами которых являются эти средства.

Комплексом будем называть совокупность связанных между собой средств, предназначенных для выполнения сложных задач. Сложной будем считать такую задачу,

решение которой для заданных условий исследования требует выполнения ряда различных по характеру действий. Примером сложной задачи может служить задача по уничтожению самолета противника, для успешного решения которой необходимо выполнить следующие различные по своему характеру действия: обнаружить самолет противника; определить его координаты и параметры движения; вычислить с необходимой точностью исходные данные для использования соответствующего оружия; использовать оружие, способное поразить цель.

Совокупность средств, предназначенных для решения указанных задач, а также средств связи и управления, и будет представлять собой комплекс противовоздушной обороны.

Любую составную часть комплекса будем называть его элементом. Нетрудно видеть, что данное определение элемента не накладывает никаких ограничений на его объем. В зависимости от цели исследования элементами можно считать как самостоятельные средства, входящие в состав комплекса, так и их составные части. Так, элементами зенитно-ракетного комплекса с командным методом наведения можно считать как систему управления в целом, так и входящую в ее состав аппаратуру выработки команд.

Системой будем называть совокупность связанных между собой комплексов и средств, предназначенных для выполнения больших по объему задач. Системы используются в том случае, когда отдельные комплексы или автономные средства из-за недостаточной производительности не в состоянии решить в полном объеме или в необходимые сроки стоящие задачи. Система может состоять как из однотипных, так и из разнотипных комплексов и автономных средств, способных решать такие же по характеру задачи, как и система в целом. Кроме них в состав системы могут входить средства связи и управления. Примером системы может служить совокупность зенитно-ракетных и зенитно-артиллерийских комплексов, радиолокационных станций обнаружения, средств целеуказания и управления, предназначенных для обеспечения противовоздушной обороны большого корабля.

Комплексы и средства, входящие в состав системы, можно рассматривать как ее элементы. Необходимый

состав системы определяется объемом задачи, подлежащей решению, и производительностью соответствующих комплексов и автономных средств.

Способы определения и использования критериев эффективности автономных средств, комплексов и систем имеют между собой много общего. Эта общность базируется на том, что результаты использования по назначению (значение показателя  $W$ ) автономных средств, комплексов и систем могут быть определены с помощью только их собственных технических или тактических характеристик. Иначе, все виды критериев эффективности автономных средств, комплексов и систем могут быть определены с помощью характеристик, которые описывают назначение, результаты использования их по назначению и стоимость. Поэтому при определении значений критериев эффективности систем, комплексов и автономных средств можно в полном объеме пользоваться положениями, приведенными в § 1.1.

Принципы определения и использования критериев эффективности неавтономных средств, являющихся элементами комплексов и систем, имеют некоторые особенности. Эти особенности являются следствием того, что технические и тактические характеристики неавтономных средств являются недостаточными для определения значений их показателей  $W_i$ ,  $W$  и  $E$ , а следовательно, и для решения тех задач, в которых указанные показатели используются в качестве критериев эффективности.

Следующий пример наглядно иллюстрирует это положение. Комплекс противовоздушной обороны корабля состоит из РЛС обнаружения воздушных целей, зенитных артиллерийских установок и РЛС управления стрельбой. Задачей РЛС управления стрельбой как элемента комплекса является выработка точных углов наведения артиллерийских установок. Основными показателями, характеризующими непосредственные результаты использования РЛС управления стрельбой в составе комплекса, являются: дальность действия; показатель успешности решения задачи по выработке углов наведения артиллерийских установок с необходимой точностью; продолжительность использования станции по назначению.

Предположим, что имеются два типа РЛС управления стрельбой, которые могут быть использованы в составе комплекса. Допустим, что показатель успешности

решения задачи по выработке с необходимой точностью углов наведения артиллерийских установок для первого типа станции равен 0,6, а для второго типа — 0,8; стоимость станций равна соответственно 2 и 4 единицам, а их дальность действия и технический ресурс одинаковы. Нетрудно видеть, что указанные показатели не дают возможности непосредственно ответить на вопрос, какая из станций более эффективна и должна использоваться в составе комплекса.

Основная причина того, что технические и тактические характеристики неавтономных средств — элементов комплексов и систем являются недостаточными для определения всех видов их критериев эффективности, состоит в следующем. Показатель  $W$  неавтономных средств зависит не только от параметров, характеризующих непосредственные результаты их использования по назначению, но и от результата использования по назначению комплекса в целом, в состав которого они входят. Это значит, что эффективность одного и того же средства, используемого в составе различных комплексов, может быть различной.

Поэтому при определении критериев  $W_i$ ,  $W$  и  $E$  неавтономных средств, являющихся элементами комплексов и систем, необходимо учитывать: непосредственные результаты выполнения стоящих задач и стоимость средств; результаты использования по назначению комплексов (систем), в состав которых они входят.

С учетом изложенного рассмотрим способы определения показателей  $W_i$ ,  $W$  и  $E$  неавтономных средств, являющихся элементами комплексов и систем. При этом будем считать, что комплекс (система) состоит из взаимосвязанных элементов, каждый из которых в операции выполняет функции, являющиеся составной частью задачи, решаемой комплексом (системой) в целом.

Общий результат использования комплекса является итогом совместного выполнения функций всеми его элементами. Иначе можно сказать, что каждый элемент вносит определенный вклад в общий результат использования комплекса. Естественно считать, что вклад любого элемента в общий результат использования комплекса пропорционален «удельному весу» этого элемента, а также качеству выполнения им своих функций в составе комплекса.

В качестве меры «удельного веса»  $j$ -го элемента может быть принята его относительная стоимость  $(C_j/C)$ , где  $C_j$  и  $C$  — стоимости соответственно  $j$ -го элемента и комплекса в целом.

Нетрудно видеть, что показатель, характеризующий качество выполнения  $j$ -м средством своих функций в составе комплекса, пропорционален параметру  $(P_{ji})$ , описывающему успешность выполнения средством своих функций в операции, и количеству  $(K_j)$  обеспечиваемых им операций комплекса.

Примем, что число взаимосвязанных элементов комплекса равно  $n$  и каждый из них характеризуется значением показателей  $P_{ji}$ ,  $C_j$  и  $K_j$ , а комплекс в целом — значением показателей  $W$  (или  $W_i$ ),  $C$  и  $K_K$ .

Значение показателя  $K_j$   $j$ -го элемента в общем случае может быть не равно значению показателя  $K_K$  комплекса. Когда  $K_j < K_K$ , то для обеспечения  $K_K$  операций комплекса необходимо последовательно применить в его составе  $n_j$  элементов.

Значение показателя  $n_j$  можно найти из следующего выражения:

$$n_j = \frac{K_K}{K_j}.$$

Очевидно, что стоимость  $n_j$  элементов, используемых для обеспечения  $K_K$  операций комплекса, будет равна

$$C_{n_j} = n_j C_j.$$

Показатели, характеризующие «удельный вес» элемента и качество выполнения им своих функций в операции комплекса, в общем случае независимы друг от друга. В этой связи часть общего результата использования комплекса, приходящуюся на долю  $n_j$  элементов, можно записать в следующем виде:

$$W_{n_j} = \frac{K P_{ji} n_j C_j}{C} W, \quad (1.2.1)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Совершенно очевидно, что для любого комплекса имеет место следующее соотношение:

$$W = \sum_{j=1}^n W_{n_j}.$$

Сложив показатели  $W_{n_j}$  всех  $n_j$  элементов комплекса, получим

$$C = K \sum_{j=1}^n P_{ji} n_j C_j,$$

откуда коэффициент пропорциональности

$$K = \frac{C}{\sum_{j=1}^n P_{ji} n_j C_j}.$$

Подставив найденное значение коэффициента  $K$  в (1.2.1), получим выражение для определения части полного результата использования комплекса, приходящейся на долю  $n_j$  элементов:

$$W_{n_j} = \frac{P_{ji} n_j C_j}{\sum_{j=1}^n P_{ji} n_j C_j} W. \quad (1.2.2)$$

Из выражения (1.2.2) нетрудно получить зависимость для определения части полного результата использования комплекса, приходящейся на долю одного  $j$ -го элемента. Поскольку

$$W_j = \frac{W_{n_j}}{n_j},$$

то часть полного результата использования комплекса, приходящаяся на долю одного  $j$ -го элемента, будет определяться следующим выражением:

$$W_j = \frac{P_{ji} C_j}{\sum_{j=1}^n P_{ji} n_j C_j} W, \quad (1.2.3)$$

или

$$W_j = \frac{P_{ji} C_j}{K_n \sum_{j=1}^n \frac{P_{ji} C_j}{K_j}} W. \quad (1.2.4)$$

Учитывая, что  $W = K_{\kappa} W_i$ , выражение (1.2.4) можно записать в следующем виде:

$$W_j = \frac{P_{ji} C_j}{n} W_i. \quad (1.2.5)$$

$$\sum_{j=1} \frac{P_{ji} C_j}{K_j}$$

Часть результата использования комплекса в операции, приходящаяся на долю его  $j$ -го элемента, может быть определена с помощью следующего выражения:

$$W_{ji} = \frac{P_{ji} C_j}{n} W_i. \quad (1.2.6)$$

$$K_j \sum_{j=1} \frac{P_{ji} C_j}{K_j}$$

Часть общего результата использования комплекса, приходящаяся на долю  $j$ -го элемента, может быть использована для определения основного критерия эффективности последнего, который в данном случае может быть представлен как

$$E_j = \frac{W_j}{C_j},$$

или с учетом (1.2.5)

$$E_j = \frac{P_{ji}}{n} W_i. \quad (1.2.7)$$

$$\sum_{j=1} \frac{P_{ji} C_j}{K_j}$$

Из выражений (1.2.5) и (1.2.7) следует, что основными характеристиками неавтономных средств, определяющими значения их показателей  $W_j$  и  $E_j$ , являются:

$P_{ji}$  — параметр, характеризующий качество выполнения средством своих функций в операции комплекса (системы);

$K_j(T_{c_j})$  — количество выполняемых операций (продолжительность использования средства в составе комплекса или системы);

$C_j$  — стоимость средства.

Ниже будет рассмотрено содержание, а также некоторые общие особенности определения и использования показателя  $P_{ji}$ .

Задача, выполняемая в операции комплексом в целом, является сложной, состоящей из ряда этапов или частных задач, каждая из которых выполняется средством или группой неавтономных средств. Совершенно очевидно, что успешность выполнения каждой частной задачи будет определенным образом влиять и на успешность выполнения задачи, решаемой комплексом в целом, а следовательно, и на результат использования его в операции.

Для оценки качества выполнения средством своих функций в операции комплекса могут быть использованы различные показатели. Анализ этих показателей позволяет сделать вывод о том, что наиболее общим и удобным из них, пригодным для исследования эффективности любых средств — элементов комплексов (систем), является вероятность успешного выполнения ими своих функций в соответствующей операции.

Результат использования комплекса в операции можно представить в следующем виде:

$$W_i = W_{0i} P_{ki}, \quad (1.2.8)$$

где  $W_{0i}$  — результат использования комплекса в операции при условии, что решаемая им задача выполнена успешно;  $P_{ki}$  — вероятность успешного выполнения комплексом решаемой задачи в операции.

Как уже указывалось, успешность выполнения комплексом решаемой задачи в операции зависит от качества выполнения функций всеми его элементами. Если символом  $P_{ji}$  обозначить вероятность успешного выполнения средством —  $j$ -м элементом комплекса решаемой частной задачи в операции, то показатель

$$P_{ki} = P_{ki} (P_{1i} P_{2i}, \dots, P_{ji}, \dots, P_{ni}). \quad (1.2.9)$$

Во многих случаях зависимость (1.2.9) может быть представлена следующим простым выражением:

$$P_{ki} = \prod_{j=1}^n P_{ji}. \quad (1.2.10)$$

Соотношение (1.2.10) будет иметь место, если:

— задача комплекса сформулирована таким образом, что результат его использования в операции выражается соотношением (1.2.8);

— задача, решаемая  $j$ -м элементом в операции комплекса, сформулирована таким образом, что вероятность ее успешного выполнения статистически не зависима от успешности решения задач, выполняемых в операции другими элементами комплекса или когда показатели  $P_{ji}$  представляют собой условные вероятности выполнения задач элементами комплекса.

В качестве примера, иллюстрирующего соотношения (1.2.8) и (1.2.10), может служить зенитно-артиллерийский комплекс. Одним из видов возможных операций такого комплекса является отражение налета одиночных самолетов противника. В этом случае показатель  $W_{0i}$  представляет собой сумму предотвращенных потерь и нанесенного ущерба при условии, что самолет противника будет уничтожен, а показатель  $P_{ki}$  — вероятность уничтожения этого самолета.

Операции по отражению налетов самолетов противника состоят из ряда этапов, каждый из которых осуществляется самостоятельными средствами, входящими в качестве элементов в состав комплекса. Этими этапами являются:

— обнаружение цели, определение ее координат и выдача целеуказания РЛС управления стрельбой. Этот этап может выполняться радиолокационной станцией обнаружения и целеуказания;

— выработка текущих значений углов наведения артустановок. Эта задача выполняется, обычно, радиолокационной станцией управления стрельбой;

— обстрел цели артустановками.

Успешность выполнения названных этапов может быть оценена вероятностью решения частных задач соответствующими средствами — элементами комплекса, т. е. значениями их показателей  $P_{ji}$ . Содержание показателей  $P_{ji}$  для радиолокационной станции обнаружения и целеуказания, а также для радиолокационной станции управления стрельбой подробно рассмотрено в гл. 3. Показатель  $P_{ji}$  для зенитных артустановок представляет собой вероятность уничтожения самолета противника при условии, что обстрел цели начинается на предельной дальности, а углы наведения вырабатываются безошибочно.

Нетрудно видеть, что для указанного комплекса вероятность уничтожения одиночного самолета противни-

ка как вероятность сложного события может быть определена как

$$P_{ki} = P_{oi} P_{yi} P_{ai},$$

где  $P_{oi}$ ,  $P_{yi}$  и  $P_{ai}$  — вероятности успешного выполнения задач в операции комплекса РЛС обнаружения и целеуказания, РЛС управления стрельбой и артустановками соответственно; вероятности  $P_{yi}$  и  $P_{ai}$  определяются в предположении, что предыдущие частные задачи выполнены успешно.

Необходимо отметить, что в рассмотренном примере, как и в каждой операции, выполняемой любым комплексом, количество этапов может быть увеличено или уменьшено. Естественно, что при этом их содержание и объем будут изменяться. Количество и объем этапов, на которые разбивается общая задача комплекса, обычно определяются целью исследования.

При исследовании отдельных средств, входящих в состав комплекса, общую задачу последнего целесообразно расчленить таким образом, чтобы каждое средство выполняло самостоятельный этап общей задачи. Если исследуется только одно средство, то задачу, выполняемую комплексом в операции, целесообразно разбивать на два этапа, из которых один выполняется этим средством, а второй — всеми остальными элементами комплекса. При этом задача исследуемого средства должна быть сформулирована таким образом, чтобы выполнение ее было необходимым условием решения задачи, осуществляемой в операции комплексом в целом.

Ниже в качестве примера определен вид показателей для оценки эффективности средств, являющихся составными частями широко применяемых комплексов смешанного типа, состоящих из элементов однократного и многократного действия. Функционирование комплексов смешанного типа представляет собой последовательную по времени совокупность отдельных операций, каждая из которых связана с использованием одного (группы) элемента однократного действия.

Если за время существования комплекса будет использовано  $K_k$  элементов однократного действия (выполнено  $K_k$  операций), то полный результат его применения

$$W = \sum_{i=1}^{K_K} W_i.$$

Основной критерий эффективности такого комплекса

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{K_K} W_i}{K_K C_{\text{одн}} + C_M},$$

где  $C_{\text{одн}}$  — стоимость элемента (группы элементов) однократного действия;  $C_M$  — стоимость элементов многократного действия.

Предположим, что комплекс состоит из одного элемента  $M_1$  многократного действия, обеспечивающего выполнение  $K_K$  операций и  $K_K$  элементов  $M_2$  однократного действия. Примем, что при однократном использовании элемента  $M_1$  и одного элемента  $M_2$  (одна операция) задача  $A$  выполняется с вероятностью  $P(A)$ . При этом комплекс имеет такую структуру, что  $P(A) = P_1 P_2$ , где  $P_1$  и  $P_2$  — вероятности выполнения частных задач в операции элементами  $M_1$  и  $M_2$  соответственно.

Показатели, характеризующие эффективность указанного комплекса, а также его элементов, определенные с помощью (1.2.5) и (1.2.7), приведены в табл. 1.2.1.

Ниже на примере рассмотрены особенности использования критериев средств — элементов комплексов при решении задач, основанном на сравнительной оценке их эффективности. Требуется определить, какую из двух типов РЛС управления стрельбой целесообразно использовать в составе корабельного комплекса ПВО применительно к одной из возможных боевых ситуаций, когда корабль атакуется одиночными самолетами противника. Для простоты будем считать, что самолет может атаковать корабль только после применения последним своих средств противовоздушной обороны. При решении этой задачи будем пользоваться следующими исходными данными (стоимость выражается в условных единицах):

— стоимость корабля  $C_K = 50$  (без стоимости средств комплекса ПВО);

— стоимость атакующего самолета  $C_c = 5$ ;

Наименование показателя	Элемент $M_1$	Элемент $M_2$	Комплекс
Количество в комплексе	1	$K_{\kappa}$	1
Стоимость одного элемента	$C_1$	$C_2$	$C_1 + K_{\kappa}C_2$
Затраты на одну операцию	$\frac{C_1}{K_{\kappa}}$	$C_2$	$\frac{C_1}{K_{\kappa}} + C_2$
Показатель $P_{j_i}$ в операции	$P_1$	$P_2$	$P(A) = P_1P_2$
Затраты на $K_{\kappa}$ операций	$C_1$	$K_{\kappa}C_2$	$C_1 + K_{\kappa}C_2$
Показатель $W_j$	$\frac{P_1C_1P(A)AK_{\kappa}}{P_1C_1 + K_{\kappa}P_2C_2}$	$\frac{P_2C_2P(A)AK_{\kappa}}{P_1C_1 + K_{\kappa}P_2C_2}$	$K_{\kappa}P(A)A$
Основной критерий эффективности	$\frac{P_1P(A)AK_{\kappa}}{P_1C_1 + K_{\kappa}P_2C_2}$	$\frac{P_2P(A)AK_{\kappa}}{P_1C_1 + K_{\kappa}P_2C_2}$	$\frac{K_{\kappa}P(A)A}{C_1 + K_{\kappa}C_2}$

— вероятность потопления корабля одиночным самолетом при условии, что атакующий самолет имеет возможность применить свое оружие  $P_{ci}=0,2$ .

Состав и параметры элементов комплекса ПВО, включая и характеристики первого типа РЛС управления стрельбой, приведены в табл. 1.2.2.

Таблица 1.2.2

Наименование элемента комплекса	Вероятность выполнения элементом частной задачи в операции	Стоимость элемента
РЛС обнаружения и целеуказания	1,0	1
РЛС управления стрельбой	0,7	2
Артиллерийские установки с комплектом боезапаса	0,7	2

Второй тип РЛС управления стрельбой имеет следующие показатели:

$$P_{yi}=0,95 \text{ и } C_y=4.$$

При этом сроки службы РЛС обоих типов одинаковы, а условия боевых действий таковы, что эти сроки могут быть полностью реализованы.

Выше указывалось, что вероятность уничтожения атакующего самолета данным комплексом может быть представлена следующим выражением:

$$P_{ki}=P_{oi}P_{yi}P_{ai}.$$

В условиях, когда сроки службы элементов комплекса одинаковы (в данном случае они будут определяться моментом выхода из строя корабля), основной критерией эффективности РЛС управления стрельбой

$$E_y = \frac{P_{yi}K_k}{P_{yi}C_y + P_{oi}C_o + P_{ai}C_a} W_i, \quad (1.2.11)$$

где  $C_o$ ,  $C_y$ ,  $C_a$  — стоимости РЛС обнаружения, РЛС управления стрельбой и зенитных артиллерийских установок соответственно.

Показатель  $W_i$  в данном случае равен величине нанесенного и предотвращенного ущерба при отражении

комплексом ПВО атаки одиночного самолета противника. Его значение определяется следующим выражением:

$$W_i = C_c P_{ki} + C_k P_{ci} - P_{ci} (C_k + C_{\text{компл}}) (1 - P_{ki}), \quad (1.2.12)$$

где  $C_{\text{компл}}$  — стоимость комплекса средств ПВО.

Для первого варианта комплекса ПВО среднее значение нанесенного и предотвращенного ущерба при отражении атаки одиночного самолета

$$W_i = 6,84 \text{ единицы,}$$

а для второго варианта комплекса ПВО для тех же условий

$$W_i = 9,506 \text{ единицы.}$$

В соответствии с (1.2.11) основной критерий эффективности первого и второго образцов РЛС управления стрельбой

$$E_{y_1} = 1,25 K_{k_1}$$

$$E_{y_2} = 1,46 K_{k_2}.$$

Можно показать, что второй вариант комплекса ПВО позволит отразить последовательные атаки в среднем в 1,5 раза большего числа самолетов, чем первый ( $K_{k_2} \approx 1,5 K_{k_1}$ ).

Следовательно, эффективность второго образца РЛС управления стрельбой в 1,74 раза выше чем первого.

### 1.3. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В военной технике используются разнообразные по назначению, принципу действия и составу автономные средства, комплексы и системы. Среди них важное место занимают комплексы различных видов оружия, назначением которых является уничтожение (вывод из строя) сил и средств противника.

Другим видом средств военной техники являются автономные средства и комплексы, предназначенные для снижения эффективности средств противника без их уничтожения. Примером таких средств могут служить комплексы радиопротиводействия.

Третьим видом средств военной техники являются автономные средства и комплексы, предназначенные для повышения эффективности средств первой и второй групп, особенно при их массовом использовании. Примером таких средств могут служить автоматизированные системы управления.

Основные особенности средств военной техники, которые необходимо учитывать при оценке эффективности, связаны с их назначением и условиями использования.

В зависимости от вида боевых действий, участвовать в которых они предназначены, все средства военной техники условно могут быть разделены на две группы:

— средства для нанесения потерь и ущерба противной стороне;

— средства для предотвращения или снижения потерь от действий средств противной стороны.

В этой связи показатель  $W$  средств военной техники представляет собой величину нанесенных противнику или предотвращенных собственных потерь от его действий, которые будут иметь место за счет использования указанных средств по назначению. Результат применения средств военной техники, используемых в условиях противодействия, определяется разностью потерь, нанесенных противнику, и собственных потерь от его действий.

Другая важная особенность средств военной техники определяется условиями их использования по назначению.

Большинство указанных средств используется, как правило, в условиях противодействия противника. Все возможные виды противодействия средствам военной техники могут быть сведены в две группы:

— активное, целью которого является вывод из строя средств противной стороны путем их уничтожения или нанесения таких повреждений, при которых дальнейшее функционирование будет невозможным. В результате активного противодействия средства военной техники могут быть выведенными из строя раньше, чем они полностью израсходуют свой технический ресурс. В частном случае средство может быть уничтожено или выведено из строя и до начала своего использования по назначению;

— пассивное, целью которого является снижение эффективности средств противника без сокращения общей продолжительности использования их по назначению. Видами пассивного противодействия являются маскировка, дезинформация, радиопротиводействие и т. д.

Противодействие любого вида предназначено для снижения эффективности соответствующих средств военной техники. В этой связи возможность противодействия должна учитываться при количественной оценке эффективности указанных средств. Возможность противодействия оказывает влияние на вид частных критериев, которые могут быть использованы для сравнительной оценки эффективности средств военной техники, а также на порядок определения результатов их использования по назначению. Рассмотрим это положение более подробно.

Полный результат использования по назначению средства военной техники, в зависимости от характера выполняемых функций, может быть определен с помощью следующих выражений:

$$W = A_p T_c \quad (1.3.1)$$

или

$$W = K_k W_i. \quad (1.3.2)$$

Из выражений (1.3.1) и (1.3.2) следует, что показатель  $W$  может быть снижен как за счет уменьшения среднего результата операции (снижения производительности средства), так и путем уменьшения суммарной продолжительности использования средства по назначению.

Особенность всех видов пассивного противодействия, в том числе и радиопротиводействия, состоит в том, что применение их не приводит к сокращению общей продолжительности использования по назначению средств военной техники. Таким образом, в условиях пассивного противодействия могут изменять свое значение только показатели  $A_p$  и  $W_i$ , а показатели  $T_c$  и  $K_k$  имеют такие же значения, как и в простых условиях.

Полный результат применения средств военной техники, используемых в условиях пассивного противодей-

ствия, может быть определен с помощью следующих выражений:

$$W_{\Pi} = A_{\text{рп}} T_c \quad (1.3.3)$$

или

$$W_{\Pi} = K_K W_{i\Pi}, \quad (1.3.4)$$

где  $A_{\text{рп}}$  и  $W_{i\Pi}$  — результат использования средства в заданных условиях пассивного противодействия соответственно в единицу времени и в операции.

Активное противодействие средствам военной техники может быть двух основных видов:

1) воздействие на снаряд, находящийся на траектории. Примером данного вида активного противодействия может служить борьба с ракетами противника;

2) воздействие на средство или комплекс и его элементы (кроме находящегося на траектории снаряда). Примером данного вида активного противодействия может служить борьба с подводными лодками.

Нетрудно видеть, что в условиях активного противодействия первого вида из всех показателей, определяющих полный результат применения средств военной техники, могут изменяться только значения показателей  $A_p$  и  $W_i$ . Значения показателей  $T_c$  и  $K_K$  в этом случае будут оставаться такими же, как и в простых условиях. Полный результат применения средств военной техники, используемых в условиях активного противодействия первого вида, может быть определен как

$$W_a = A_{pa} T_c \quad (1.3.5)$$

или

$$W_a = K_K W_{ia}, \quad (1.3.6)$$

где  $W_{ia}$  и  $A_{pa}$  — результат использования средства в заданных условиях активного противодействия соответственно в операции и за единицу времени.

Из выражений (1.3.3) — (1.3.6) следует, что при решении задач, основанном на сравнительной оценке эффективности средств военной техники, используемых в условиях пассивного противодействия и активного противодействия первого вида, в качестве частных критериев эффективности можно использовать показатели

$W_i(A_p)$ , или те их составные части, значения которых будут изменяться в заданных условиях противодействия.

Применение активного противодействия второго вида против средств военной техники может привести как к снижению результатов операции (производительности), так и выводу из строя средств до израсходования их технического ресурса. Полный результат использования средств военной техники, в зависимости от характера их функционирования, в условиях активного противодействия второго вида в общем случае может быть определен как

$$W_a = A_{pa} T_{ca} \quad (1.3.7)$$

или

$$W_a = K_{ka} W_{ia}, \quad (1.3.8)$$

где  $T_{ca}$  и  $K_{ka}$  — соответственно время использования по назначению и количество операций, которые могут быть выполнены средством в заданных условиях активного противодействия второго вида.

В тех случаях, когда в условиях активного противодействия второго вида  $A_{pa} = A_p$  и  $W_{ia} = W_i$ , полный результат использования средства

$$W_a = A_p T_{ca} \quad (1.3.9)$$

или

$$W_a = K_{ka} W_i. \quad (1.3.10)$$

Таким образом, при решении задач, основанном на сравнительной оценке эффективности средств военной техники, используемых в условиях активного противодействия второго вида, в качестве частных критериев могут применяться:

— показатель  $W_a$ , если имеет место условие (1.3.7) или (1.3.8);

— показатели  $K_{ka}$  и  $T_{ca}$ , если имеет место условие (1.3.9) или (1.3.10);

— составные части показателей  $W_a$ ,  $K_{ka}$  и  $T_{ca}$ , значения которых изменяются в заданных условиях противодействия.

При решении указанных задач необходимо также иметь в виду, что возможность противодействия влияет и на порядок определения показателей, используемых

в качестве критериев эффективности. В соответствии с (1.1.2) основной критерий эффективности средств военной техники, используемых в условиях противодействия, будет определяться следующим выражением:

$$E_{a,п} = \frac{W_{a,п}}{C_{a,п}}, \quad (1.3.11)$$

где  $W_{a,п}$  — результат использования средства в соответствующих условиях противодействия;  $C_{a,п}$  — показатель стоимости средства, используемого в заданных условиях противодействия.

Из приведенных в данном параграфе зависимостей следует, что при решении задач, связанных с оценкой эффективности средств военной техники, может потребоваться определить значение показателей  $W_{a,п}$ ,  $K_{ка}$ ,  $W_{i,a,п}$ , а также их составных частей для заданных условий противодействия.

Комплекс условий противодействия, в которых используется средство, будем обозначать через  $(y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n)$ .

Этот комплекс характеризуется: видом и способом противодействия; количеством и свойствами применяемых средств противодействия, организацией использования средств противодействия.

В соответствии с (1.1.13) и (1.1.14) результат использования средств военной техники в условиях противодействия может быть определен из выражения

$$W_{a,п} = W_{a,п}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots) \quad (1.3.12)$$

или

$$W_{a,п} = W_{a,п}(A_{1п}, A_{2п}, \dots, A_{jп}, \dots, A_{nп}), \quad (1.3.13)$$

где  $A_{jп}$  — значение  $j$ -й тактической характеристики средства, используемого в заданных условиях противодействия.

Выражения (1.3.12) и (1.3.13) имеют общий характер. Они могут быть применены как для определения полного результата использования средств в условиях противодействия, так и его составных частей.

Порядок определения показателей  $W_{iп}(A_{pп})$  и их составных частей в условиях радиопротиводействия для радиоэлектронных средств рассмотрен в гл. 5.

Нахождение значений показателей  $K_{ка}(T_{са})$  связано со значительными трудностями, которые в реальных условиях обусловлены следующими обстоятельствами:

— неопределенностью распределения по времени моментов использования средств военной техники и используемых против них средств активного противодействия;

— возможностью накопления повреждений у средств, подвергающихся последовательному по времени активному противодействию;

— возможностью устранения полученных повреждений средств в интервалах между операциями противодействия.

Значения показателей  $K_{ка}$  и  $T_{са}$  могут быть определены при анализе конкретных боевых ситуаций с помощью методов оценки результатов стрельбы, которые подробно описаны в специальной литературе [2, 10, 16 и т. д.]. При этом анализируемое средство должно рассматриваться как цель, подлежащая уничтожению.

Ниже в качестве примера рассмотрен один из возможных случаев определения показателя  $K_{ка}$  для средств, используемых в условиях активного противодействия второго вида, когда операции средств военной техники и противодействия разнесены по времени и при этом противодействие каждый раз предшествует проводимой операции. Такая ситуация может иметь место, например, при атаке корабля противника самолетами, когда каждый из них до применения своего оружия подвергается воздействию средств противовоздушной обороны. Обозначим через  $P_a$  вероятность того, что операция противодействия будет успешной, т. е. вероятность того, что в ходе ее выполнения средство будет выведено из строя. В тех случаях, когда  $K_k$  достаточно велико, а вероятность  $P_a$  не очень мала, среднее число операций, которые могут быть выполнены средством в условиях данного вида противодействия, может быть приближенно определено с помощью следующего выражения [2]:

$$\bar{K}_{ка} \approx \frac{1}{P_a}. \quad (1.3.14)$$

При решении многих задач необходимо сравнивать эффективность одних и тех же средств военной техники при их использовании в простых и заданных условиях

противодействия. Такое сравнение позволяет наглядно судить, насколько может изменяться эффективность соответствующих средств в определенных условиях противодействия по сравнению с простыми условиями их применения.

Степень этого изменения является одной из важнейших характеристик средств военной техники, которая может быть определена с помощью следующего выражения:

$$P_{a, \Pi} = \frac{E_{a, \Pi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)}{E(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots)}, \quad (1.3.15)$$

где  $E_{a, \Pi}$  — значение основного критерия эффективности средства, используемого в определенных условиях активного или пассивного противодействия;  $y_1, y_2, \dots$  — комплекс соответствующих условий противодействия, в которых используется средство.

Из выражения (1.3.15) следует, что значение основного критерия эффективности средства, используемого в определенных условиях активного или пассивного противодействия, может быть определено из выражения

$$E_{a, \Pi} = P_{a, \Pi} E. \quad (1.3.16)$$

Вместо достаточно сложного выражения (1.3.15) для определения показателей  $P_a$  и  $P_{\Pi}$  в ряде случаев можно пользоваться более простыми зависимостями. Такая возможность имеется, когда применение противодействия не приводит к снижению продолжительности использования средств по назначению или результату операции.

В случае, когда  $K_{ka} = K_k$  и  $C = \text{const}$ , показатели  $P_a$  и  $P_{\Pi}$  могут быть определены с помощью следующего выражения:

$$P_{a, \Pi} = \frac{W_{i a, \Pi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)}{W_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots)}. \quad (1.3.17)$$

Выражение (1.3.17) может быть использовано для определения показателя  $P_a$  средств, применяемых в условиях активного противодействия первого вида, а также для определения показателя  $P_{\Pi}$  радиоэлектронных средств, используемых в условиях радиопротиводействия.

Из выражения (1.3.17) следует, что в случаях, когда результаты использования средств в операции могут быть представлены в виде

$$W_i = W_{0i} P_i, \quad (1.3.18)$$

их показатели  $P_a$  (в условиях активного противодействия первого вида) и  $P_{\Pi}$  могут быть определены как

$$P_{a,\Pi} = \frac{P_{i_{a,\Pi}}}{P_i}, \quad (1.3.19)$$

где  $P_i$ ,  $P_{i_a}$ ,  $P_{i_{\Pi}}$  — вероятности получения средством результата  $W_{0i}$  в операциях, выполняемых в простых условиях, в условиях активного противодействия первого вида и пассивного противодействия соответственно.

Если в условиях активного противодействия снижается продолжительность использования средства по назначению, а результат операции остается таким же, как и в простых условиях, то его показатель  $P_a$  может быть определен из выражения

$$P_a = \frac{K_{\text{к а}}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots)}{K_{\text{к}}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots)}. \quad (1.3.20)$$

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Одним из первых этапов оценки эффективности является выявление специфических свойств и особенностей исследуемых средств. Ниже этот вопрос рассмотрен применительно к радиоэлектронным средствам.

Важнейшей особенностью радиоэлектронных средств является разнообразие выполняемых ими функций.

В качестве примера рассмотрим вопрос о функциях радиоэлектронных средств, применяемых в комплексах оружия. Задачи, выполняемые этими комплексами, являются сложными, поскольку для их осуществления необходимо выполнить ряд отличающихся друг от друга действий, основными из которых являются:

— выявление объектов, по которым должно быть использовано оружие, иначе, обнаружение целей и определение их места в пространстве;

— определение (выработка) исходных данных для использования снарядов, с помощью которых осуществляется непосредственное воздействие на противника;

— доставка снарядов в район цели с необходимой точностью, которая определяется как их мощностью, так и живучестью цели.

Для осуществления указанных действий в составе комплекса должны быть соответствующие средства, которые будем называть его основными элементами.

В некоторых комплексах ряд перечисленных выше действий полностью или частично могут выполняться обслуживающим персоналом.

Большинство современных комплексов оружия состоит из следующих основных элементов:

1. Средства разведки, обнаружения и целеуказания, назначение которых — поиск и обнаружение целей, определение с необходимой точностью их координат и выдача необходимых данных о целях другим элементам комплекса. В ряде случаев одни и те же средства обнаружения могут обеспечивать не один, а несколько комплексов. Такие средства являются элементом группы комплексов.

2. Снаряд (снаряды), назначением которого является непосредственное воздействие на противника.

3. Система управления стрельбой, назначением которой является выработка исходных данных для использования снарядов и обеспечение доставки их в район цели с необходимой точностью.

4. Пусковые и двигательные установки.

5. Линии связи и управления, предназначенные для передачи информации и команд между элементами комплекса.

Кроме указанных основных элементов в состав комплексов оружия могут входить вспомогательные средства, назначение которых состоит в создании благоприятных условий для подготовки и использования по назначению основных элементов комплексов.

Радиоэлектронные средства могут в полном объеме выполнять функции таких основных элементов современных комплексов оружия, как средства разведки, обнаружения и целеуказания, средства связи и управления, системы управления стрельбой, а также функции многих вспомогательных средств.

Необходимо отметить, что задачи, выполняемые основными элементами современных комплексов оружия, во многих случаях сами являются сложными. В этой связи многие из основных элементов современных комплексов оружия представляют собой или сложные многофункциональные средства или совокупности связанных между собой простых средств, каждое из которых предназначается для решения частной задачи, являющейся частью задачи основного элемента.

Радиоэлектронные средства в качестве составных частей могут входить в состав всех основных элементов современных комплексов оружия, в том числе и в состав их снарядов.

В качестве примера рассмотрим корабельный зенитно-артиллерийский комплекс. Функции средств разведки, обнаружения и целеуказания этих комплексов обычно выполняются корабельными радиолокационными станциями обнаружения воздушных целей и аппаратурой целеуказания, а функции системы управления стрельбой — радиолокационными станциями сопровождения и счетно-решающими приборами. Таким образом, в указанном комплексе радиоэлектронные средства могут в полном объеме выполнять функции таких его основных элементов, как средства разведки, обнаружения и целеуказания и система управления стрельбой. Кроме того, радиоэлектронные средства могут входить в состав и других основных элементов данного комплекса.

Радиоэлектронные средства в военном деле могут выполнять также функции автономных средств и комплексов (например, радиопротиводействия), а также составных частей систем военной техники (например, средства сбора и обработки информации, целераспределения и управления системы противовоздушной обороны большого корабля).

Итак, радиоэлектронные средства в общем случае могут выполнять функции автономных средств, комплексов, элементов комплексов и систем.

Поскольку определение критериев эффективности для различных видов средств имеет некоторые особенности, то при исследованиях, связанных с оценкой эффективности конкретных радиоэлектронных средств, необходимо устанавливать, какие именно функции (автономного средства, комплекса, элемента комплекса или системы) они выполняют. При решении этой задачи необходимо учитывать, что радиоэлектронные средства могут иметь различную связь с другими средствами, а также другими элементами комплексов и систем.

Некоторые виды радиоэлектронных средств территориально независимы и конструктивно не связаны с другими средствами и элементами комплексов и систем. В последнем случае их связь с другими средствами и элементами комплексов обычно осуществляется с помощью линий управления и передачи информации. Примером такого вида средств может служить наземная радиолокационная станция обнаружения воздушных целей,

входящая в состав системы противовоздушной обороны и выдающая информацию о целях по линии связи на командный пункт системы.

В других случаях радиоэлектронные средства конструктивно не связаны с другими средствами — элементами комплексов, но территориально размещаются на общих носителях. Примером такого вида средств может служить корабельная радиолокационная станция обнаружения воздушных целей, входящая вместе с другими средствами в состав комплекса противовоздушной обороны корабля.

И, наконец, радиоэлектронные средства могут быть конструктивно связаны с другими элементами комплексов, образуя вместе с ними единый организм. Примером такого вида средств может служить бортовая аппаратура системы управления, входящая в состав зенитной ракеты.

Эффективность радиоэлектронных средств, как и любых других видов технических средств, также зависит и от условий, в которых они используются по назначению. Радиоэлектронные средства, применяемые в военном деле, могут использоваться по назначению как в простых условиях, так и в условиях противодействия. Против них может быть организовано как активное, так и пассивное противодействие. Когда радиоэлектронные средства территориально не зависимы и конструктивно не связаны с другими средствами военной техники, то активное противодействие против них может быть организовано специально. Если же они расположены на каком-либо носителе (корабле, самолете, ракете и т. д.), то активное противодействие специально против них, как правило, не организуется. Эти радиоэлектронные средства могут уничтожаться или выводиться из строя в результате противодействия, организуемого против носителей. При организации активного противодействия радиоэлектронным средствам могут использоваться их некоторые специфические особенности. Например, против радиолокационных станций и их носителей могут быть использованы специальные снаряды (типа американского снаряда «Шрайк»), система самонаведения которых работает по излучаемым станциями радиосигналам.

Одна из важнейших особенностей радиоэлектронных средств состоит в принципиальной возможности исполь-

зования против них специального вида пассивного противодействия. Назначение этого вида пассивного противодействия состоит в нарушении нормального функционирования радиоэлектронных средств с помощью воздействия на их приемные устройства специально создаваемыми для этих целей мешающими сигналами (маскирующими, ложными и т. д.). Применительно к радиоэлектронным средствам, работающим с использованием радиосигналов, этот вид пассивного противодействия называется радиопротиводействием. В связи с изложенной оценкой эффективности радиоэлектронных средств должна осуществляться с учетом возможности создания им соответствующих видов противодействия или помех.

Современные радиоэлектронные средства являются сложными устройствами, состоящими из большого числа элементов, узлов и блоков. Достаточно напомнить, что в состав радиолокационных станций входят многие тысячи и десятки тысяч таких элементов, как полупроводниковые приборы, радиолампы, резисторы, конденсаторы и т. д. Между тем многие радиоэлектронные средства имеют такую структуру, при которой отказ даже одного элемента может привести к отказу (полному или частичному) средства в целом. В этой связи оценка эффективности радиоэлектронных средств должна производиться с учетом фактического уровня их надежности.

Итак, при оценке эффективности радиоэлектронных средств необходимо учитывать:

- место и роль исследуемого средства в общей системе технического оборудования;
- возможность создания многим видам указанных средств специальных видов пассивного противодействия (радиопротиводействия и т. д.);
- фактический уровень их надежности.

## 2.2. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Основными и наиболее общими характеристиками, определяющими эффективность любых радиоэлектронных средств, являются:

- количество операций ( $K_p$ ), в осуществлении которых участвует радиоэлектронное средство, или продолжительность ( $T_c$ ) использования его по назначению;

— вероятность ( $P_{pi}$ ) успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящей задачи в операции или его производительность;

— стоимость ( $C_p$ ) радиоэлектронного средства.

Эти характеристики в условиях, указанных в § 1.1, могут быть непосредственно использованы в качестве частных критериев при решении некоторых задач, основанном на сравнительной оценке эффективности радиоэлектронных средств.

Кроме того, показатели  $K_p$ ,  $P_{pi}$  и  $C_p$  используются в качестве основных составных частей при определении показателей  $W_{pi}$ ,  $W_p$  и  $E_p$ , которые также применяются в качестве критериев эффективности радиоэлектронных средств.

Содержание и принципы определения показателя  $K_p(T_c)$  и аналогичных показателей других видов технических средств являются одинаковыми. Краткое изложение их дано в конце § 1.1.

Общая стоимость радиоэлектронного, как и любого другого технического средства, складывается из трех компонентов — стоимостей проектирования, производства и эксплуатации. Особенности определения показателя  $C$  технических средств описаны в работах [10, 16 и др.]. Одним из способов определения показателей  $K_p$  и  $C_p$  является обобщение данных из сфер производства и эксплуатации средств.

Содержание и основные особенности определения показателя  $P_{pi}$  рассмотрены в § 2.3.

Способы определения основного критерия эффективности, а также используемых в качестве частных критериев показателей  $W_p$  и  $W_{pi}$  в значительной степени зависят от специфических особенностей соответствующих радиоэлектронных средств.

С учетом назначения и характера выполняемых функций радиоэлектронные средства могут быть разбиты на несколько групп. Важнейшими из них являются:

А. Средства одноразового действия, являющиеся элементами комплексов. Примером средств данной группы может служить радиовзрыватель зенитной ракеты.

Б. Одноканальные средства многократного действия, являющиеся элементами комплексов. Применительно к комплексам оружия процесс функционирования средств данной группы состоит в обеспечении ряда по-

следовательных по времени операций, каждая из которых связана с использованием одного снаряда (группы снарядов) по одной цели. Примером средств данной группы может служить радиолокационная станция сопровождения цели зенитно-артиллерийского комплекса.

В. Многоканальные средства многократного действия, являющиеся элементами комплексов и систем. Применительно к комплексам оружия процесс функционирования средств данной группы состоит в обеспечении ряда последовательных по времени операций, каждая из которых связана с одновременным использованием нескольких снарядов (групп снарядов) по нескольким целям. Примером средств данной группы может служить радиолокационная станция обнаружения воздушных целей.

Г. Средства, используемые в качестве элементов в системах техники и предназначенные для обеспечения оптимальных результатов использования входящих в их состав комплексов одного назначения. Примером средств данной группы могут служить средства сбора и обработки информации, целераспределения и управления системы противовоздушной обороны большого корабля.

Д. Автономные радиоэлектронные средства, используемые самостоятельно и в составе систем техники, а также комплексы радиоэлектронных средств. В качестве примера средств данной группы могут служить средства и комплексы радиопротиводействия.

Применительно к этим группам радиоэлектронных средств ниже рассмотрены содержание, особенности определения и использования показателей  $W_{p i}$ ,  $W_p$  и  $E_p$ . При этом считалось, что комплексы и входящие в их состав радиоэлектронные средства удовлетворяют условию (1.2.10).

## Радиоэлектронные средства группы А

Средства этой группы могут быть составными частями комплексов однократного действия или смешанного типа. К этой группе относятся и радиоэлектронные средства, входящие в состав практически всех видов снарядов. Основная особенность средств данной группы состоит в том, что один их экземпляр может обеспечить

только одну операцию соответствующего комплекса. Если средство данной группы используется в составе комплекса смешанного типа, то для обеспечения  $K_K$  операции последнего необходимо иметь  $K_K$  экземпляров данного средства. Совершенно очевидно, что для средств данной группы показатель  $K_p = 1$ , а показатель  $W_p = W_{pi}$ .

В соответствии с выражением (1.2.6) результат применения радиоэлектронного средства группы А, входящего в состав комплекса однократного действия, будет определяться следующей зависимостью:

$$W_p = W_{pi} = \frac{P_{pi}C_p}{P_{pi}C_p + P_{(K-p)i}C_{(K-p)}} W_i, \quad (2.2.1)$$

где  $P_{(K-p)i}$  — вероятность выполнения комплексом решаемой задачи в операции при условии, что входящее в его состав исследуемое радиоэлектронное средство свою задачу выполнит успешно;  $C_{(K-p)}$  — стоимость комплекса без стоимости входящего в его состав исследуемого радиоэлектронного средства.

Основной критерий эффективности радиоэлектронного средства группы А, входящего в состав комплекса однократного действия, будет определяться выражением

$$E_p = \frac{P_{pi}}{P_{pi}C_p + P_{(K-p)i}C_{(K-p)}} W_i. \quad (2.2.2)$$

Результат использования одного экземпляра радиоэлектронного средства группы А, входящего в состав комплекса смешанного вида, в соответствии с выражением (1.2.5), будет определяться следующей зависимостью:

$$W_p = W_{pi} = \frac{P_{pi}C_p}{P_{pi}C_p + \frac{P_{(K-p)i}C_{(K-p)}}{K_K}} W_i. \quad (2.2.3)$$

Основной критерий эффективности таких радиоэлектронных средств

$$E_p = \frac{P_{pi}}{P_{pi}C_p + \frac{P_{(K-p)i}C_{(K-p)}}{K_K}} W_i. \quad (2.2.4)$$

## Радиоэлектронные средства группы Б

Основная особенность средств данной группы состоит в том, что каждое из них имеет такой срок службы и так используется, что может обеспечить выполнение конечного числа ( $K_p$ ) последовательных по времени однотипных операций соответствующего одноканального комплекса.

Средства группы Б обычно являются элементами комплексов многократного действия. Нетрудно видеть, что их роль в каждой операции комплекса является такой же, как и роль средств группы А. Результат использования в операции радиоэлектронного средства группы Б, входящего в состав одноканального комплекса многократного действия и обеспечивающего выполнение  $K_p$  его операций ( $K_p \leq K_k$ ) в соответствии с выражением (1.2.6), будет определяться следующей зависимостью:

$$W_{pi} = \frac{P_{pi} C_p}{P_{i\tau} C_p + \frac{K_p P_{(k-p)\tau} C_{(k-p)}}{K_k}} W_i. \quad (2.2.5)$$

Полный результат использования по назначению радиоэлектронного средства группы Б, в соответствии с выражением (1.2.5), будет определяться следующей зависимостью:

$$W_p = \frac{P_{pi} C_p}{\frac{P_{pi} C_p}{K_p} + \frac{P_{(k-p)\tau} C_{(k-p)}}{K_k}} W_i. \quad (2.2.6)$$

Основной критерий эффективности средств данной группы может быть определен с помощью следующего выражения:

$$E_p = \frac{P_{pi}}{\frac{P_{pi} C_p}{K_p} \frac{P_{(k-v)\tau} C_{(k-p)}}{K_k}} W_i. \quad (2.2.7)$$

## Радиоэлектронные средства группы В

Радиоэлектронные средства групп А и Б являются одноканальными. Это значит, что одно средство данных групп может одновременно обеспечивать операцию только одного одноканального комплекса. Обеспечение средством группы Б каждой новой операции данного или

другого комплекса может быть начато лишь после того, как будет закончена или прекращена предыдущая операция. Если имеется многоканальный или несколько одноканальных комплексов, то для обеспечения их одновременного использования по назначению необходимо иметь соответствующее количество средств групп А и Б.

Средства группы В являются многоканальными. Это значит, что одно средство данной группы может одновременно обеспечить многоканальный или несколько одноканальных и многоканальных комплексов. В последнем случае средство группы В можно рассматривать как элемент системы техники или как общую составную часть нескольких одинаковых или различных по своему характеру комплексов. Наглядно это поясняется следующим примером. Корабль в качестве средств противовоздушной обороны имеет два комплекса зенитных управляемых ракет и три комплекса зенитной артиллерии, каждый из которых может одновременно действовать по отдельной цели. Эти комплексы средств противовоздушной обороны могут обслуживаться одной корабельной РЛС обнаружения воздушных целей и целеуказания. Данная РЛС при проведении исследований может считаться составной частью каждого комплекса или элементом системы противовоздушной обороны корабля.

Если средство группы В обеспечивает одновременное применение  $\mu$  одноканальных комплексов, то часть общего результата их использования в операции, приходящаяся на долю этого средства:

$$W_{pi} = \sum_{j=1}^{\mu} W_{pji}, \quad (2.2.8)$$

где  $W_{pji}$  — часть результата использования  $j$ -го комплекса в операции, приходящаяся на долю обслуживающего его радиоэлектронного средства группы В. Значение показателя  $W_{pji}$  может быть определено с помощью следующего выражения:

$$W_{pji} = \frac{P_{pj} C_{pj}}{P_{pj} C_{pj} + \frac{P_{pj} C_{pj}}{K_{pj} P_{(k-p)ji} C_{(k-p)j}} K_{kj}} W_{ji}, \quad (2.2.9)$$

где  $P_{pji}$  — вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством решаемой задачи в операции  $j$ -го комплекса;  $P_{(k-p)ji}$  — вероятность успешного выпол-

нения  $j$ -м комплексом решаемой задачи в операции при условии, что радиоэлектронное средство свою частную задачу выполнит успешно;  $W_{ji}$  — результат использования  $j$ -го комплекса в операции;  $C_{(k-p)j}$  — стоимость  $j$ -го комплекса без части стоимости радиоэлектронного средства, приходящейся на долю этого комплекса;  $C_{pj}$  — часть стоимости многоканального радиоэлектронного средства, приходящаяся на долю  $j$ -го обслуживаемого комплекса. Для однотипных обслуживаемых комплексов

$$C_{pj} = \frac{C_p}{\mu};$$

$K_{kj}$  — количество операций, выполняемых  $j$ -м комплексом.

Если средство группы В одновременно обслуживает комплексы разного типа, то его показатель  $P_{pji}$  должен определяться применительно к каждому из этих комплексов, поскольку успешность выполнения одним и тем же средством частных задач, являющихся составными частями задач разных комплексов, может быть различной. Так, одна и та же корабельная РЛС обнаружения воздушных целей и целеуказания может успешно обеспечивать ( $P_{pi} = 1$ ) использование комплекса зенитной артиллерии и иметь низкую эффективность ( $P_{pi} \ll 1$ ) при обеспечении расположенного на том же корабле зенитно-ракетного комплекса. Причиной этого могут быть различные требования к радиолокационной станции по обеспечению зенитной артиллерии и зенитных ракет (например, по дальности действия).

Полный результат использования средства группы В, обслуживающего  $\mu$  одноканальных комплексов, будет определяться выражением

$$W_p = \sum_{j=1}^{\mu} W_{pj},$$

где  $W_{pj}$  — часть полного результата использования  $j$ -го комплекса, приходящаяся на долю обеспечивающего его средства группы В.

Полный результат использования радиоэлектронного средства группы В, одновременно обслуживающего  $\mu$  одноканальных комплексов, а также основной критерий

его эффективности, с учетом зависимостей (2.2.8) и (2.2.9), будут определяться следующими выражениями:

$$W_p = \sum_{j=1}^{\mu} W_{pj} = \sum_{j=1}^{\mu} \frac{P_{pj} C_{pj}}{\frac{P_{pj} P_{pj}}{K_{pj}} + \frac{P_{(k-p) j} C_{(k-p) j}}{K_{kj}}} W_{ji}, \quad (2.2.10)$$

$$E_p = \sum_{j=1}^{\mu} \frac{P_{pj} C_{pj}}{\frac{P_{pj} C_{pj}}{K_{pj}} + \frac{P_{(k-p) j} C_{(k-p) j}}{K_{kj}}} W_{ji}. \quad (2.2.11)$$

Если радиоэлектронное средство группы В обслуживает один многоканальный комплекс, то значения его показателей  $W_{pi}$ ,  $W_p$  и  $E_p$  могут быть определены соответственно с помощью выражений (2.2.5)—(2.2.7). При этом входящие в указанные выражения показатели будут иметь следующее содержание:  $P_{pi}$  — вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством частной задачи по обеспечению операции всего многоканального комплекса;  $C_{(k-p)}$  — стоимость многоканального комплекса без стоимости радиоэлектронного средства;  $W_i$  — результат операции многоканального комплекса.

### Радиоэлектронные средства группы Г

Результат использования группы комплексов одного назначения зависит не только от состава группы и качества комплексов, но и от организации их использования. Для получения наилучших результатов использования группы комплексов одного назначения применяются специальные средства, назначением которых является обеспечение оптимальной организации использования комплексов группы.

Средства группы Г, как правило, являются средствами многократного действия. Характерной особенностью этих средств является то, что использование их имеет особый смысл, как правило, при одновременном использовании группы комплексов.

При оценке эффективности этих средств необходимо учитывать следующую особенность, отличающую их от радиоэлектронных средств других групп. Радиоэлектрон-

ные средства групп А, Б и В являются неотъемлемыми составными частями соответствующих комплексов и систем техники. Без этих средств комплексы и системы не могут выполнять своих функций. В то же время комплексы и системы техники в ряде случаев могут выполнять свои функции и без участия средств группы Г. Наличие этих средств позволяет получить лучший результат использования группы комплексов. В этой связи основой для оценки эффективности средств группы Г является тот выигрыш, который они обеспечивают за счет более рационального использования группы комплексов. Этот выигрыш можно рассматривать как следствие или результат использования соответствующих средств группы Г.

Результат использования средства группы Г в операции, связанной с обеспечением  $\mu$  комплексов, может быть определен как

$$W_{pi} = (X_p)_i - (X_-)_i, \quad (2.2.12)$$

где  $(X_p)_i$  и  $(X_-)_i$  — результат использования  $\mu$  комплексов в операции при наличии и отсутствии средства группы Г соответственно.

Показатель  $W_p$  средства группы Г и основной критерий его эффективности будут определяться соответственно как

$$W_p = K_p W_{pi} = K_p [(X_p)_i - (X_-)_i], \quad (2.2.13)$$

$$E_p = \frac{K_p [(X_p)_i - (X_-)_i]}{C_p}, \quad (2.2.14)$$

где  $(\bar{X}_p)_i$  и  $(\bar{X}_-)_i$  — средние значения показателей  $(X_p)_i$  и  $(X_-)_i$  для совокупности операций, проводимых соответственно при наличии и отсутствии средства группы Г.

Коротко остановимся на порядке определения показателя  $P_p$  радиоэлектронных средств группы Г. Как известно, показатель  $P_p$  характеризует успешность выполнения средством своих функций в операции. Задачей средства группы Г является обеспечение максимального результата использования группы комплексов. Показатель  $P_p$  и будет представлять собой вероятность успешного выполнения указанной задачи.

Для любого случая применения ряда комплексов можно найти такую организацию их использования по назначению, при которой обеспечивается получение наи-

лучшего результата. Значение этого результата при использовании группы комплексов в операции обозначим через  $(X_{pM})_i$ . Часть этого результата, приходящаяся на долю средства группы  $\Gamma$ , будет равна  $[(X_{pM})_i - (X_-)_i]$ . При этом показатель  $P_{pi}$  будет равен единице. Совершенно очевидно, что если  $(X_p)_i = (X_-)_i$ , то показатель  $P_{pi} = 0$ . В общем же случае показатель  $P_{pi}$  для средств группы  $\Gamma$  можно определить как вероятность получения результата  $[(X_{pM})_i - (X_-)_i]$  в операции. Статистически этот показатель может быть определен с помощью следующего выражения:

$$P_{pi} = \frac{M(W_{pi})}{W_{pMi}} = \frac{(\bar{X}_p)_i - (\bar{X}_-)_i}{(X_{pM})_i + (\bar{X}_-)_i}. \quad (2.2.15)$$

В качестве иллюстрации порядка определения показателя  $W_{pi}$  для средств группы  $\Gamma$  рассмотрим следующий пример. Для воздействия на противника, который представляет собой  $l$  одновременно действующих целей, может быть использовано  $\mu$  однотипных комплексов оружия, например комплексов зенитной артиллерии. При этом каждый из комплексов может быть одновременно использован только по одной цели. Примем, что воздействие группировки комплексов на противника представляет собой совокупность параллельных по времени операций, условия проведения которых таковы, что в каждой из них любой комплекс может воздействовать только на одну цель.

Для упрощения расчетов примем, что  $l = \mu$ . Примем также, что вероятность поражения цели, по которой в операции воздействует только один комплекс, равна  $P_{ki}$ . При воздействии на цель нескольких комплексов — накопление повреждений отсутствует.

Если при отсутствии средств управления и целераспределения каждый из  $\mu$  комплексов оружия с одинаковой вероятностью  $(1/l)$  может воздействовать на любую цель, то вероятность того, что любая ( $j$ -я) цель будет поражена

$$P_{kj} = 1 - \left(1 - \frac{P_{ki}}{l}\right)^l,$$

а среднее число пораженных целей в ходе операции группы комплексов

$$(\bar{X}_-)_i = l \left[1 - \left(1 - \frac{P_{ki}}{l}\right)^l\right].$$

Известно [2], что наилучший результат при использовании ряда однотипных средств по группе одинаковых целей может быть достигнут при равномерном распределении средств между целями.

Предположим, что средства управления и целераспределения построены таким образом, что указанный принцип ими реализуется. В этом случае показатель  $P_{pi}$  будет равен единице. При использовании таких средств управления и целераспределения (для случая, когда  $l=\mu$ ) вероятность поражения  $j$ -й цели

$$P_{kj} = P_{ki},$$

а среднее число пораженных целей в операции

$$(\bar{X}_p)_i = lP_{ki}.$$

В соответствии с (2.2.12) результат использования данного средства управления и целераспределения в операции

$$W_{pi} = l \left[ P_{ki} - 1 + \left( 1 - \frac{P_{ki}}{l} \right)^l \right]. \quad (2.2.16)$$

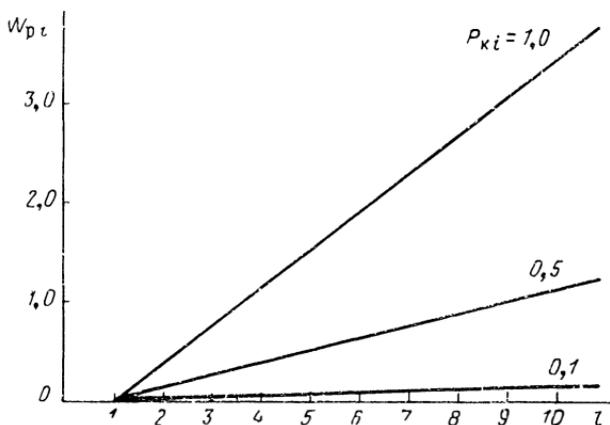


Рис. 2.2.1. График зависимости  $W_{pi}$  от  $l$ .

В табл. 2.2.1 приведены рассчитанные с помощью (2.2.16) значения, а на рис. 2.2.1 — график зависимости показателя  $W_{pi}$  от числа целей  $l$  для нескольких значений показателя  $P_{ki}$ .

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 2.2.1, следует, что применение средств группы Г наиболее целесообразно в тех случаях, когда соответствующие комплексы имеют высокую эффективность.

Таблица 2.2.1

$P_{\text{гт}}$	$l$				
	1	2	3	5	10
	Значения $W_{\text{гт}}$				
0,1	0	0,005	0,0124	0,0158	0,035
0,5	0	0,125	0,21	0,4525	1,13
1,0	0	0,5	0,9	1,64	3,42

### Радиоэлектронные средства группы Д

Согласно определению, средства группы Д представляют собой автономные средства и комплексы радиоэлектронных средств.

Показатели  $W_{\text{р}}$  и  $E_{\text{р}}$  средств данной группы зависят только от тактических характеристик последних, таких, как  $P_{\text{р}i}$ ,  $K_{\text{р}}$  и  $C_{\text{р}}$ , и могут быть определены с помощью (1.1.10) и (1.1.2) соответственно. Ниже в качестве примера рассмотрен порядок определения показателей  $W_{\text{р}i}$  и  $P_{\text{р}i}$  автономных средств и комплексов радиопротиводействия.

Примем, что средство (комплекс) радиопротиводействия используется против определенного числа комплексов (средств) противника. Обозначим результат применения комплексов (средств) противника в операции, осуществляемой без участия средств радиопротиводействия, через  $(X_{-})_i$ , а с их участием — через  $(X_{\text{р}})_i$ . Очевидно, что в общем случае значения показателей  $(X_{-})_i$  и  $(X_{\text{р}})_i$  будут не равны друг другу.

Результат применения средства радиопротиводействия в операции определяется следующим выражением:

$$W_{\text{р}i} = (X_{-})_i - (X_{\text{р}})_i. \quad (2.2.17)$$

Значение этого показателя в общем случае может изменяться от 0 [при  $(X_{\text{р}})_i = (X_{-})_i$ ] до максимальной величины  $W_{\text{р} \text{ м} i} = (X_{-})_i$  [при  $(X_{\text{р}})_i = 0$ ].

Показатель  $P_{pi}$  данных средств представляет собой вероятность получения в операции максимального результата  $W_{pmi} = (X_-)_i$ .

Статистически значение показателя  $P_{pi}$  для этих средств может быть определено с помощью следующего выражения:

$$P_{pi} = \frac{M(W_{pi})}{W_{pmi}}, \quad (2.2.18)$$

где  $M(W_{pi})$  — среднее значение показателя  $W_{pi}$  для совокупности однотипных операций.

Из сравнения выражений (2.2.12), (2.2.15), (2.2.17) и (2.2.18) следует, что содержание показателей  $W_{pi}$  и  $P_{pi}$  средств радиопротиводействия в основном аналогично содержанию этих же показателей средств группы Г. Единственное их различие состоит в том, что для средств группы Г значение показателей  $W_{pi}$  и  $P_{pi}$  определяется степенью повышения результатов применения по назначению обеспечиваемых ими комплексов и средств, а для средств радиопротиводействия — степенью снижения результатов применения по назначению комплексов и средств, против которых они используются.

### 2.3. СОДЕРЖАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{pi}$

Решение многих задач, основанных на количественной оценке эффективности радиоэлектронных средств, связано с необходимостью определения показателя  $P_{pi}$ . Этот показатель используется как в качестве частного критерия, так и в качестве одной из основных составных частей показателей  $W_{pi}$ ,  $W_p$  и  $E_p$ , также используемых в качестве критериев эффективности радиоэлектронных средств.

Показатель  $P_{pi}$  представляет собой вероятность выполнения радиоэлектронным средством стоящей перед ним задачи в соответствующей операции. Поэтому первым шагом при определении этого показателя является формулировка задачи, которую должно выполнять в операции исследуемое средство. Содержание этой задачи должно отражать назначение и условия использования исследуемого средства, а также учитывать его место в общей системе технического оборудования.

По признаку подхода к определению содержания задач, выполняемых в соответствующих операциях, все радиоэлектронные средства можно разбить на две группы.

К первой группе относятся автономные радиоэлектронные средства и комплексы средств, а ко второй группе — неавтономные радиоэлектронные средства, являющиеся элементами комплексов и систем техники.

Задачи средств первой группы должны формулироваться таким образом, чтобы через вероятность их успешного выполнения выражался результат использования в операции соответствующего автономного средства или комплекса, иначе, чтобы имело место следующее условие:

$$W_i = W_{0i} P_{p i},$$

где  $W_{0i}$  — результат использования автономного средства (комплекса) в операции при условии, что оно успешно выполнит стоящую задачу.

При определении содержания задачи радиоэлектронного средства, являющегося элементом комплекса или системы, необходимо учитывать его роль в выполнении соответствующей операции. Задачи данного радиоэлектронного средства должна быть сформулирована таким образом, чтобы вероятность ее успешного решения была составной частью вероятности выполнения сложной задачи, осуществляемой соответствующим комплексом или системой. В качестве примера рассмотрим в наиболее общем виде содержание задач, выполняемых в операции радиоэлектронными средствами, являющимися элементами комплексов оружия. Это рассмотрение проведено применительно к одноканальному комплексу многократного действия. Полученные при этом результаты, как будет показано ниже, определенным образом могут быть использованы и для радиоэлектронных средств, являющихся элементами других видов комплексов оружия.

Применение по назначению одноканального комплекса многократного действия представляет собой выполнение ряда ( $K_R$ ) последовательных по времени операций, содержание каждой из которых является использование отдельного снаряда (группы снарядов) по определенной цели. Конечной целью операции комплекса оружия является нанесение какого-либо ущерба противной стороне или предотвращение собственных потерь от действий

средств противника. Она достигается путем поражения соответствующей цели. В этой связи результат использования комплекса оружия в операции может быть определен в общем случае как

$$W_i = X_0 P_{ki},$$

где  $X_0$  — величина нанесенного (предотвращенного) ущерба при условии, что цель поражена;  $P_{ki}$  — вероятность поражения цели в операции комплекса.

Величина показателя  $X_0$  определяется характером выполняемой комплексом задачи (ценностью цели). Если имеется группа целей и комплекс может быть использован только против одной из них, то значение показателя  $X_0$  будет зависеть от ценности выбранной для обслуживания цели. С целью уменьшения показателя  $X_0$ , а следовательно, и показателя  $W_i$  противник может применять как один из способов противодействия, малочисленные и ложные цели, что приводит к значительному снижению эффективности используемых по ним комплексов

Результат применения комплекса по цели определенного типа ( $X_0 = \text{const}$ ) в операции определяется значением показателя  $P_{ki}$ . Как известно [16], поражение цели при использовании по ней одного снаряда (группы снарядов) является сложным событием, вероятность которого в общем случае может быть выражена через произведение вероятностей двух случайных событий

$$P_{ki} = P_{di} G(r), \quad (2.3.1)$$

где  $P_{di}$  — вероятность того, что снаряд будет доставлен в район цели с необходимой точностью;  $G(r)$  — вероятность поражения цели при условии, что снаряд будет доставлен в район ее нахождения с необходимой точностью.

Показатель  $G(r)$  представляет собой координатный закон поражения цели, т. е. зависимость вероятности ее поражения от координат точки (относительно цели), в которую доставляется снаряд. Конкретное содержание показателей  $P_{di}$  и  $G(r)$  определяется видом цели и используемого против нее снаряда. Так, при стрельбе снарядами ударного действия показатель  $P_{di}$  представляет собой вероятность попадания снаряда в цель, а показа-

тель  $G(r)$  — вероятность поражения цели при условии попадания в нее снаряда. Итак, вид и значение показателя  $G(r)$  зависят от живучести цели и свойств только одного основного элемента комплекса — его снаряда.

Для снарядов простейшего типа (не имеющих взрывчатого вещества) показатель  $G(r)$  определяется такими их свойствами, как вес, габариты и скорость у цели.

В снарядах сложного типа для поражения цели может использоваться взрывчатое вещество. Для обеспечения срабатывания на необходимом участке траектории эти снаряды имеют специальные устройства (взрывательные, предохранительные и т. д.). Функции этих специальных устройств могут выполнять и радиоэлектронные средства. Показатель  $G(r)$  сложных снарядов зависит прежде всего от вида и количества используемого взрывчатого или другого поражающего вещества, а также от надежности срабатывания снарядов на необходимом участке траектории. С учетом изложенного показатель  $G(r)$  любого снаряда можно представить в следующем виде:

$$G(r) = P_{ci} G_0(r), \quad (2.3.2)$$

где  $P_{ci}$  — вероятность того, что не произойдет подрыва снаряда на траектории и доставленный с заданной точностью в район цели снаряд сработает;  $G_0(r)$  — координатный закон поражения цели при условии, что снаряд, доставленный в район ее расположения, сработает.

Для снарядов простейшего типа показатель  $P_{ci}$  равен единице. Для снарядов сложного типа значение показателя  $P_{ci}$  зависит от успешного выполнения своих функций всеми средствами и устройствами, имеющими назначение обеспечить срабатывание снаряда в районе цели и не допустить его подрыва на другом участке траектории. Предположим, что в составе снаряда имеется  $n$  таких средств, каждое из которых выполняет свою частную задачу, направленную на обеспечение срабатывания снаряда в районе цели. Если вероятность выполнения  $j$ -м средством частной задачи оценивается показателем  $P_{ji}$ , то для снаряда в целом будет иметь место следующее соотношение:

$$P_{ci} = P_{ci} (P_{1i}, P_{2i}, \dots, P_{ji}, \dots, P_{ni}). \quad (2.3.3)$$

Во многих случаях совокупность указанных элементов снаряда имеет такую структуру, что выражение (2.3.3) для нее имеет следующий вид:

$$P_{ct} = \prod_{j=1}^n P_{jt}.$$

Таким образом, при оценке эффективности радиоэлектронного средства, являющегося элементом снаряда, решаемая им задача в операции комплекса должна быть сформулирована таким образом, чтобы она была составной частью задачи по обеспечению подрыва снаряда в районе цели и вероятность ее успешного выполнения удовлетворяла условию (2.3.3).

Входящий в (2.3.1) показатель  $P_{di}$  представляет собой вероятность доставки снаряда в район цели с необходимой точностью. Нетрудно видеть, что указанная задача является сложной, состоящей из ряда этапов, каждый из которых может выполняться отдельным средством или группой средств комплекса. В решении этой сложной задачи принимают участие все элементы комплекса оружия.

Предположим, что в составе комплекса, кроме снарядов, имеется  $n$  средств, каждое из которых выполняет свою частную задачу по обеспечению доставки снаряда в район цели с необходимой точностью. Если вероятность выполнения  $j$ -м средством частной задачи в операции оценивается показателем  $P_{ji}$ , то для комплекса в целом будет иметь место следующее соотношение:

$$P_{di} = P_{di}(P_{1t}, P_{2t}, \dots, P_{jt}, \dots, P_{nt}). \quad (2.3.4)$$

Во многих случаях совокупность элементов комплекса имеет такую структуру, что выражение (2.3.4) для нее имеет следующий вид:

$$P_{di} = \prod_{j=1}^n P_{ji}.$$

В этой связи, при оценке эффективности радиоэлектронного средства, не входящего в состав снаряда, решаемая им задача в операции должна быть сформулирована таким образом, чтобы она была этапом, составной частью задачи по обеспечению доставки снаряда в район цели

с необходимой точностью, а вероятность ее успешного выполнения была составной частью показателя  $P_{дi}$ .

Рассмотрим содержание задач, выполняемых в операции радиоэлектронными средствами-элементами многоканальных комплексов оружия. Предположим, что комплекс имеет  $\mu$  каналов, т. е. может одновременно использовать  $\mu$  снарядов (групп снарядов) по различным целям. Назначением любого снаряда данного комплекса является воздействие на определенную цель, т. е. оно аналогично назначению снаряда одноканального комплекса. В этой связи, общее содержание задач, выполняемых в операции аналогичными радиоэлектронными средствами, входящими в состав любых снарядов, является одинаковым.

Сложная операция многоканального комплекса представляет собой совокупность параллельных по времени операций, каждая из которых аналогична по содержанию операции одноканального комплекса. Полный результат использования в операции многоканального комплекса с учетом (2.3.3) и (2.3.4) можно записать в следующем виде:

$$W_i = \sum_{j=1}^{\mu} W_{ji} = \sum_{j=1}^{\mu} X_{0ji} P_{дji} G(r)_{ji}, \quad (2.3.5)$$

где  $W_{ji}$  — результат использования в операции  $j$ -го канала многоканального комплекса;  $X_{0ji}$  — результат применения  $j$ -го канала в операции при условии, что стоящая перед ним задача будет выполнена;  $P_{дji}$  — вероятность доставки  $j$ -го снаряда в район цели с необходимой точностью;  $G(r)_{ji}$  — координатный закон поражения цели применительно к  $j$ -му снаряду.

Если каналы комплекса одинаковы и выполняют в операции аналогичные задачи, то для такого комплекса показатель

$$W_i = \mu X_0 P_{дi} G(r). \quad (2.3.6)$$

В выражении (2.3.6) показатель  $P_{дi}$  представляет собой вероятность доставки в район цели с необходимой точностью каждого из  $\mu$  используемых в операции снарядов (групп снарядов). Указанная задача по своему характеру аналогична задаче, осуществляемой в операции одноканальным комплексом оружия и отличается от нее только по объему.

В этой связи общим содержанием задач, выполняемых в операции радиоэлектронными средствами (не являющимися составными частями снарядов) комплексов оружия, является обеспечение доставки с необходимой точностью в район цели (целей) определенного числа снарядов. Когда перед одним и тем же комплексом ставятся различные задачи (например, поражение одиночной цели и группы целей), то в соответствии с ними будут меняться объем и количественные характеристики частных задач, подлежащих выполнению входящими в его состав радиоэлектронными средствами. Если одно и то же радиоэлектронное средство входит в состав различных видов комплексов, то содержания его частных задач в операциях указанных комплексов могут отличаться друг от друга по объему и требованиям.

Рассмотрим основные факторы, которые необходимо учитывать при определении показателя  $P_{pi}$ . Анализ специфических свойств радиоэлектронных средств, а также условий использования их по назначению, позволяет установить основные положения, при совместном соблюдении которых средство может успешно выполнить свои функции в соответствующей операции. Эти положения сводятся к следующему:

— в необходимый момент времени средство должно быть готово к использованию по назначению;

— в течение всего времени осуществления операции средство должно быть исправным;

— исправное средство должно иметь такие характеристики, совокупность которых обеспечит успешное выполнение стоящих в операции задач.

Итак, необходимым условием успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящих задач в операции является сохранение его в исправном состоянии как перед использованием, так и в процессе использования по назначению.

Успешность выполнения этого условия зависит как от живучести и надежности средств, так и от условий его эксплуатации.

Наиболее благоприятными условиями эксплуатации радиоэлектронных средств являются так называемые простые условия, когда эти средства используются без противодействия со стороны противника. Предположим, что радиоэлектронное средство используется в простых

условиях в течение всего периода эксплуатации, готово к использованию по назначению в необходимые моменты времени и в каждой операции безотказно выполняет свои функции. Это будет иметь место в том случае, когда средство обладает абсолютной надежностью.

Абсолютно надежным будем называть такое средство, у которого перед любой операцией и в ходе ее выполнения не возникает неисправностей. Показатель  $P_{pi}$  этого средства будет определяться такими его характеристиками, как дальность действия, точность, пропускная способность и т. д.

Вероятность успешного выполнения стоящей задачи в операции радиоэлектронным средством, обладающим абсолютной надежностью и эксплуатирующимся в простых условиях, будем называть показателем потенциальной эффективности средства в операции и обозначать ее через  $P_{Ei}$ .

Реальные радиоэлектронные средства не обладают абсолютной надежностью. В них могут возникать неисправности как перед применением, так и в процессе использования по назначению.

Появление неисправностей в радиоэлектронном средстве может оказать серьезное влияние на успешность выполнения решаемой им задачи в операции. Степень этого влияния зависит от уровня надежности средства и характера выполняемой им задачи.

Если обозначить через  $P_n$  показатель, характеризующий влияние реального уровня надежности радиоэлектронного средства на успешность выполнения решаемой им задачи в операции, то для простых условий использования

$$P_{pi} = P_n P_{Ei}. \quad (2.3.7)$$

Таким образом, для простых условий показатель  $P_{pi}$  представляет собой вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящих перед ним задач в соответствующей операции с учетом его реальной надежности.

Многие виды радиоэлектронных средств могут использоваться по назначению не только в простых условиях, но и в условиях различных видов противодействия. Противодействие может оказать существенное влияние на успешность выполнения радиоэлектронными средствами своих функций в операции. Так, в результате актив-

ного противодействия радиоэлектронные средства могут быть выведены из строя как перед началом, так и в ходе выполнения операции, что не может не оказать влияния на успешность выполнения стоящих перед ними задач. Степень этого влияния для определенных условий активного противодействия будет зависеть как от живучести средства, так и от характера выполняемой им задачи.

Обозначим через  $P_a$  показатель, учитывающий влияние активного противодействия на успешность выполнения радиоэлектронным средством решаемой им задачи в соответствующей операции.

Известно, что в условиях радиопротиводействия общий реализуемый технический ресурс средств не изменяется. Однако при этом могут изменяться тактические характеристики средств, что может сказаться и на качестве выполнения ими своих функций в соответствующих операциях. Степень этого влияния для определенных условий радиопротиводействия будет зависеть от конструктивных особенностей средств и от характера выполняемых ими задач. Обозначим через  $P_{\Pi}$  показатель, учитывающий влияние радиопротиводействия на успешность выполнения радиоэлектронным средством решаемой задачи в соответствующей операции.

Поскольку причины, определяющие значения показателей  $P_{\Pi}$ ,  $P_a$  и  $P_{\Pi}$ , независимы друг от друга, то

$$P_{pi} = P_a P_{\Pi} P_{Ei}. \quad (2.3.8)$$

Итак, определение показателя  $P_{pi}$  должно производиться с учетом следующих факторов:

— если средство используется в простых условиях, то показатель  $P_{pi}$  должен определяться с учетом реальной надежности средства; значение его будет определяться выражением (2.3.7);

— если средство используется в условиях активного или пассивного противодействия, то показатель  $P_{pi}$  должен определяться как с учетом надежности средства, так и с учетом влияния соответствующих видов противодействия.

Нетрудно видеть, что в условиях активного противодействия или радиопротиводействия показатель  $P_{pi}$  будет определяться с помощью следующего выражения:

$$P_{pi,a,\Pi} = P_{a,\Pi} P_{\Pi} P_{Ei}.$$

Принципы определения показателя  $P_{Ei}$  изложены в гл. 3, а принципы определения показателя  $P_{pi}$  с учетом реальной надежности радиоэлектронных средств и при использовании их в условиях радиопротиводействия — в гл. 4 и 5 соответственно.

При определении показателя  $P_{pi}$  в условиях активного противодействия необходимо:

— знать организацию активного противодействия, в том числе и распределение по времени моментов начала операций радиоэлектронных средств и используемых против них средств поражения,

— уметь определять результат активного противодействия по выводу из строя соответствующего радиоэлектронного средства. Данная задача решается методами оценки эффективности стрельбы, при этом радиоэлектронное средство рассматривается как цель, подлежащая уничтожению. Эти методы дают принципиальную возможность при заданных характеристиках средства поражения, цели и условий стрельбы определить вероятность поражения любой цели. Указанные вопросы имеют специальный характер и подробно изложены в работах ряда авторов [3, 16 и др.].

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ  
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
В ОПЕРАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

3.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ  $P_{Ei}$

Согласно определению, показатель  $P_{Ei}$  представляет собой вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящей перед ним задачи в соответствующей операции при следующих условиях:

— средство до начала операции и в ходе ее выполнения не подвергается воздействию активного противодействия;

— задача в операции выполняется средством при отсутствии радиопротиводействия;

— средство обладает абсолютной надежностью, т. е. в нем отказов не возникает как перед использованием по назначению, так и в ходе операции.

Вероятность  $P_{Ei}$  является основным элементом показателя  $P_{Pi}$  и характеризует потенциальные возможности радиоэлектронных средств в решении стоящих перед ними задач в ходе соответствующих операций.

Показатель  $P_{Ei}$  любого средства определяется свойствами и условиями использования по назначению. Значение этого показателя может быть выражено с помощью соответствующих тактических характеристик исследуемого средства в следующем общем виде:

$$P_{Ei} = P_{Ei}(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_n, B_1, B_2, \dots), \quad (3.1.1)$$

где  $B_1, B_2$  — факторы, учитывающие роль средства в общей системе технического оборудования.

Вид функции (3.1.1) определяется в первую очередь назначением средства и содержанием стоящих перед ним задач, а также его ролью в общей системе технического оборудования. В зависимости от последнего фак-

тора возможны две основные разновидности функций (3.1.1).

В тех случаях, когда исследуемое радиоэлектронное средство выполняет функции автономного средства, показатель  $P_{Ei}$  зависит только от значения его собственных тактических характеристик. Этот показатель в данном случае представляет собой вероятность успешного выполнения средством стоящих задач в операции при определенных значениях его соответствующих тактических характеристик.

Для любого автономного средства, исходя из стоящих перед ним задач, можно определить такие значения каждой тактической характеристики, при которых указанные задачи в операции будут успешно выполняться. В дальнейшем их будем называть необходимыми значениями соответствующих тактических характеристик.

Показатель  $P_{Ei}$  автономного средства определяется специальной функцией, связывающей фактические и необходимые значения его соответствующих тактических характеристик. Иначе, для автономных средств показатель

$$P_{Ei} = P_{Ei}(A_1, A_2, \dots, A_{n_1}, A_{n_2}, \dots), \quad (3.1.2)$$

где  $A_1, A_2, \dots$  — фактические значения соответствующих тактических характеристик средства;  $A_{n_1}, A_{n_2}$  — необходимые значения указанных характеристик.

Показатель  $P_{Ei}$  некоторых видов автономных радиоэлектронных средств зависит от соотношения фактического и необходимого значений только одной их тактической характеристики. Чаще всего такой характеристикой является дальность действия средств. В этом случае показатель

$$P_{Ei} = P_{Ei}(D, D_n),$$

где  $D$  — фактическая дальность действия средства;  $D_n$  — необходимая дальность его действия.

В тех случаях, когда исследуемое радиоэлектронное средство выполняет функции неавтономного средства — элемента комплекса или системы техники, показатель  $P_{Ei}$  в общем случае зависит от значения как его собственных тактических характеристик, так и от свойств

других элементов комплекса (системы). Для любого неавтономного средства, исходя из его назначения и роли в соответствующем комплексе, можно определить необходимые значения соответствующих тактических характеристик, при которых стоящие перед ним задачи будут успешно выполняться. Итак, в общем случае для неавтономных радиоэлектронных средств показатель

$$P_{Ei} = P_{Ei}(A_1, A_2, \dots, A_{n_1}, A_{n_2}, \dots, A_{k_1}, A_{k_2}, \dots), \quad (3.1.3)$$

где  $A_{k_1}, A_{k_2}$  — тактические характеристики других средств комплекса.

Для установления явного вида соотношения (3.1.3) определим результаты применения в операции комплекса при условии, что соответствующие тактические характеристики входящего в его состав исследуемого радиоэлектронного средства имеют фактическое и необходимые значения. В соответствии с (1.2.8) и (1.2.10) эти результаты можно определить в следующем виде:

$$W_{\phi ki} = W_{k_0i} P_{Ei} P_{(k-p)i}$$

и

$$W_{nki} = W_{k_0i} P_{nEi} P_{(k-p)i},$$

где  $W_{\phi ki}$  и  $W_{nki}$  — результаты применения в операции комплекса при условии, что входящее в его состав исследуемое средство будет иметь соответственно фактические и необходимые значения соответствующих тактических характеристик;  $W_{k_0i}$  — результат применения комплекса в операции при условии, что стоящая перед ним задача полностью выполняется;  $P_{(k-p)i}$  — вероятность выполнения комплексом стоящей задачи в операции при условии, что исследуемое средство свои функции выполняет в полном объеме;  $P_{nEi}$  — вероятность выполнения исследуемым средством стоящей задачи в операции комплекса при условии, что средство будет иметь необходимые значения соответствующих тактических характеристик. В соответствии с определением  $P_{nEi} = 1$ .

Из сравнения приведенных выше зависимостей следует, что показатель  $P_{Ei}$  неавтономных средств может быть определен из следующего соотношения:

$$P_{Ei} = \frac{W_{\phi ki}}{W_{nki}} P_{nEi}. \quad (3.1.4)$$

Зависимость (3.1.4) является весьма сложной, что затрудняет ее непосредственное использование для практических расчетов. Анализ содержания показателей  $W_{\text{фки}}$  и  $W_{\text{нки}}$  показывает возможность использования при решении практических задач вместо зависимости (3.1.4) более простых соотношений. При этом возможны следующие наиболее общие случаи:

— исследуемое средство самостоятельно выполняет определенную задачу, которая является одним из этапов сложной задачи, выполняемой в операции комплексом в целом. Показатель  $P_{\text{Еi}}$  таких средств будет определяться зависимостью типа (3.1.2). Входящие в указанное выражение необходимые значения соответствующих тактических характеристик исследуемого неавтономного средства определяются в первую очередь назначением и свойствами как его, так и других средств комплекса;

— исследуемое радиоэлектронное средство совместно с другими средствами комплекса выполняет один из этапов его задачи в операции. Можно показать, что для средств такого вида показатель

$$P_{\text{Еi}} = \frac{P_{\text{фci}}}{P_{\text{нци}}}, \quad (3.1.5)$$

где  $P_{\text{фci}}$  и  $P_{\text{нци}}$  — вероятность выполнения этапа операции комплекса, осуществляемой исследуемым и рядом других средств при условии, что исследуемое средство имеет соответственно фактические и необходимые значения тактических характеристик, т. е.

— исследуемое средство самостоятельно выполняет один из этапов задачи комплекса в операции и совместно с другими средствами участвует в выполнении другого этапа.

$$P_{\text{фci}} = P_{\text{фci}}(A_1, A_2, \dots, A_{\text{н}_1}, A_{\text{н}_2}, \dots, A_{\text{к}_1}, A_{\text{к}_2}, \dots)$$

и

$$P_{\text{нци}} = P_{\text{нци}}(A_1 = A_{\text{н}_1}, A_2 = A_{\text{н}_2}, \dots, A_{\text{к}_1}, A_{\text{к}_2}, \dots)$$

В данном случае показатель

$$P_{\text{Еi}} = P'_{\text{Еi}} \frac{P_{\text{фci}}}{P_{\text{нци}}}, \quad (3.1.6)$$

где  $P'_{Ei}$  — вероятность успешного выполнения исследуемым средством самостоятельно осуществляемого им этапа операции комплекса.

Значение показателя  $P_{Ei}$  радиоэлектронных средств может быть определено путем теоретических расчетов, физического и математического моделирования, а также с помощью экспериментальных данных, характеризующих результаты применения исследуемых средств в соответствующих условиях.

В заключение необходимо отметить, что реальные средства могут выполнять свои функции не при одном значении комплекса простых условий, а в целом диапазоне их значений. Условия использования являются одним из факторов, определяющим результаты применения средств, а следовательно, и значение показателей, характеризующих их эффективность. Изменение простых условий использования может привести и к изменению значения показателя  $P_{Ei}$ .

Необходимо отметить, что изменение различных компонентов простых условий использования по-разному сказывается на изменении показателя  $P_{Ei}$ . Из всего комплекса условий использования всегда можно выделить те, изменение которых практически не сказывается на значении показателя  $P_{Ei}$ . В качестве примера можно указать, что время суток заметным образом не сказывается на способности радиолокационных станций выполнять стоящие перед ними задачи, поэтому нет необходимости определять показатель  $P_{Ei}$  при использовании этих станций ночью, утром и в другие времена суток.

Однако среди комплекса простых условий использования радиоэлектронных средств имеются и такие, изменение которых приводит к изменению способности средств выполнять свои функции, а следовательно, и к изменению значения показателя  $P_{Ei}$ . Примером таких условий для радиолокационных станций, работающих в коротковолновой части сантиметрового диапазона, могут служить метеорологические характеристики атмосферы, поскольку при осадках (дождь, снег) дальность действия указанных станций по сравнению с дальностью действия в ясную погоду уменьшается. В этой связи может возникнуть необходимость определять значение показателя  $P_{Ei}$  для всего возможного диапазона подоб-

ных простых условий, которые могут иметь место при использовании средств.

В последующих параграфах данной главы рассмотрены пути определения показателя  $P_{Ei}$  радиоэлектронных средств, входящих в состав комплексов оружия и выполняющих в них функции обнаружения целей, целеуказания и управления стрельбой. При этом задачи, выполняемые указанными средствами в операциях комплексов, сформулированы в наиболее общем виде. Следует иметь в виду, что предъявление к указанным средствам дополнительных требований может привести и к некоторому изменению вида выражений для определения их показателей  $P_{Ei}$ .

### 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{Ei}$ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ

Средства обнаружения являются составными частями многих комплексов оружия и систем военной техники. Они предназначаются для обзора определенного пространства и обнаружения находящихся в нем или проникающих в него целей. Информация от средств обнаружения используется другими элементами комплексов и систем военной техники. Во многих случаях эта информация служит основой для принятия решения по их использованию.

В соответствии с определением показатель потенциальной эффективности в операции любого радиоэлектронного средства представляет собой вероятность успешного выполнения решаемой им задачи в соответствующей операции, осуществляемой в условиях, указанных в § 3.1. При определении этого показателя для средств обнаружения необходимо иметь в виду, что одно и то же средство может быть использовано в составе различных комплексов и систем, а содержание операции одного и того же комплекса может изменяться в зависимости от условий его использования. В этой связи задачи, стоящие перед одними и теми же средствами обнаружения, используемыми в составе различных комплексов и систем и в различных условиях, могут отличаться друг от друга. Одну из них, состоящую в обнаружении одиночной (групповой) цели, будем называть

элементарной задачей средств обнаружения. Нетрудно видеть, что данная задача является составной частью любых практических задач, выполняемых средствами обнаружения в реальных условиях (обнаружение одиночных и групповых целей, разнесенных относительно средства обнаружения во времени или в пространстве).

Показатель успешности выполнения средством обнаружения элементарной задачи в реальных условиях использования обозначим через  $P_{oi}$ .

Радиоэлектронные средства обнаружения являются, как правило, многоканальными средствами многократного применения. Их эффективность определяется значением показателя  $P_{oi}$ , количеством целей ( $\mu$ ), которые могут быть обслужены средством в течение определенного интервала времени, а также продолжительностью использования средств по назначению.

В соответствии с (2.3.8) основной составной частью  $P_{oi}$  является показатель  $P_{Eoi}$ , который представляет собой вероятность успешного выполнения средством элементарной задачи по обнаружению одиночной (групповой) цели, осуществляемой в условиях, указанных в § 3.1.

Показатель  $P_{Eoi}$  может быть использован (как самостоятельно, так и совместно с показателями  $\mu$ ,  $K_{\Sigma}$ ,  $T_c$  и др.) в качестве частного критерия при решении некоторых задач, связанных со сравнительной оценкой эффективности средств обнаружения, а также в качестве основной составной части при определении показателей  $P_{ji}$ ,  $W_i$ ,  $W$  и  $E$  этих средств.

Показатели  $P_{Eoi}$  и  $P_{oi}$  в большинстве случаев могут быть связаны между собой следующим соотношением:

$$P_{oi} = P_a P_{\Pi} P_{\Pi} P_{Eoi}.$$

Рассмотрим пути определения показателя  $P_{Eoi}$ .

Элементарная задача радиоэлектронных средств обнаружения, входящих в состав комплексов оружия и систем военной техники, в самом общем виде может быть сформулирована следующим образом: обеспечить своевременное (на требуемой дальности) применение комплекса по соответствующей одиночной (групповой) цели. Вероятность успешного выполнения этой задачи в условиях, указанных в § 3.1, и будет представлять собой значение показателя  $P_{Eoi}$ .

Успешное выполнение средством обнаружения элементарной задачи будет иметь место при следующих условиях:

— средство обнаружения осуществляет обзор и поиск целей во всей заданной зоне. Если часть заданной зоны средством не просматривается, то находящиеся в ней цели обнаруживаться не будут и, следовательно, для этой части зоны его показатель  $P_{Eoi}$  будет равен нулю;

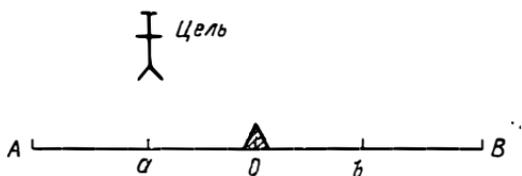


Рис. 3.2.1. К рассмотрению путей определения  $P_{Eoi}$ .

— цель в заданной зоне обзора обнаруживается своевременно, т. е. на дальности, при которой обеспечивается успешное выполнение задачи элементами комплекса (системы), использующими информацию от средства обнаружения.

Показатель  $P_{Eoi}$  для различных частей заданной зоны обзора может иметь различное значение. В этой связи одно и то же средство обнаружения может иметь различную эффективность при работе по однотипным целям, находящимся в различных областях зоны обзора.

Причиной различного значения показателя  $P_{Eoi}$  для разных областей зоны обзора может быть неодинаковая дальность обнаружения находящихся в них однотипных целей. Известно, например, что из-за особенностей распространения используемых радиоволн, дальность обнаружения радиолокационными станциями воздушных целей зависит от высоты полета целей. В этой связи показатель  $P_{Eoi}$  радиолокационных станций обнаружения может иметь различное значение при обслуживании одних и тех же типов целей, летящих на различных высотах.

Для определения путей вычисления показателя  $P_{Eoi}$  рассмотрим следующий элементарный пример.

Необходимо обнаруживать цели, пересекающие линию  $AB$  длиной  $L$  (рис. 3.2.1). Для решения этой задачи

привлекается средство, расположенное на середине линии  $AB$  (в точке  $O$ ).

Пусть это средство имеет дальность действия  $D = aO = bO$ . В этом случае цели, пересекающие линию  $AB$  на участке  $ab$ , будут обнаруживаться, а на участках  $Aa$  и  $bB$  — обнаруживаться не будут.

Показатель  $P_{Eoi}$  в данном случае будет представлять собой вероятность обнаружения цели, пересекающей линию  $AB$ . Нетрудно видеть, что эта вероятность будет зависеть от величины  $L$ , дальности действия средства, а также от места пересечения целью линии  $AB$ .

Примем, что по условиям использования пересечение целью линии  $AB$  в любой точке равновероятно.

Вероятность пересечения целью линии  $AB$  на элементарном участке  $dx$  в данном случае будет равна  $dx/L$ . Обозначим через  $x$  расстояние от точки  $O$  до точки, в которой цель пересекает линию  $AB$ . Вероятность обнаружения средством, расположенным на середине отрезка  $L$  и имеющим дальность действия  $D$ , цели, пересечение которой линии  $AB$  в ее любой точке равновероятно, будет определяться как

$$P(0 < x \leq D) = 2 \int_0^D \frac{dx}{L}.$$

Иначе, в данном случае показатель

$$P_{Eoi} = 2 \frac{D}{L}. \quad (3.2.1)$$

Из выражения (3.2.1) следует, что при увеличении дальности действия средства обнаружения от 0 до  $1/2L$ , показатель  $P_{Eoi}$  будет линейно увеличиваться от нуля до единицы. Необходимая дальность действия, при которой средство успешно выполнит свою задачу, независимо от места пересечения целью линии  $AB$ , равна  $1/2L$ .

Приведенный пример показывает, что значение этого показателя зависит от соотношения необходимой и фактической дальности действия средства обнаружения, а также от условий его использования. Данное положение имеет место и для любых других средств обнаружения.

В рассмотренном примере показатель  $P_{Eoi}$  равен единице, когда дальность действия средства обнаруже-

ния равна  $1/2L$ . Дальнейшее увеличение дальности действия указанного средства уже не будет сопровождаться ростом значения показателя  $P_{Eoi}$ . В этой связи более точное значение показателя  $P_{Eoi}$  для рассмотренного примера будет иметь следующий вид:

$$P_{Eoi} = 2 \frac{D}{L} \text{ при } 0 \leq D \leq \frac{1}{2} L,$$

$$P_{Eoi} = 1 \text{ при } D > \frac{1}{2} L.$$

Итак, для определения показателя  $P_{Eoi}$  требуется знать необходимую ( $D_n$ ) и фактическую ( $D$ ) дальности действия средств обнаружения, а также вид функции, связывающей эти величины.

Необходимая дальность действия зависит от свойств цели и элементов комплекса, использующих данные средств обнаружения, а также от ряда факторов, характеризующих условия применения последних.

Если комплекс и обеспечивающее его средство обнаружения расположены в одном месте, то величина  $D_n$  может быть определена из следующего соотношения:

$$D_n = D_o + V_{отн} t_{раб}, \quad (3.2.2)$$

где  $D_o$  — оптимальная дальность действия элемента комплекса (системы), использующего данные средства обнаружения;  $V_{отн}$  — относительная скорость изменения расстояния между целью и указанным элементом комплекса (системы);  $t_{раб}$  — время от момента обнаружения цели до начала использования соответствующих элементов комплекса (системы).

Если средство обнаружения и соответствующие элементы комплекса территориально разнесены, то для определения  $D_n$  следует пользоваться следующим выражением:

$$D_n = D_o + V_{отн} t_{раб} \pm D_{отс},$$

где  $D_{отс}$  — разность между дальностями до цели от соответствующего элемента комплекса и от средства обнаружения.

Как следует из выражения (3.2.2), требуемая дальность действия средства обнаружения в значительной степени зависит от величины  $D_o$ . Эта величина представляет собой такую дальность использования комплек-

са, при которой обеспечивается получение наилучшего результата, т. е. максимальное значение показателя  $W_i$  комплекса в целом.

Существует целый ряд типов комплексов, результат использования которых в определенных пределах пропорционален дальности их действия. К их числу можно отнести комплексы зенитной артиллерии. Для таких типов комплексов величина  $D_0$  определяется предельными техническими возможностями их соответствующих элементов. Так, у комплексов зенитной артиллерии показатель  $D_0$  равен предельной дальности стрельбы артиллерийских установок.

Наилучший результат использования других типов комплексов в простых условиях будет иметь место при применении их не на максимальной, а на минимально возможной дальности действия. Однако, как правило, такие комплексы используются не в простых условиях, а при воздействии средств противника. При этом дальность использования комплексов, при которой обеспечивается максимальный результат, будет в общем случае иной, чем при применении их в простых условиях.

Величина  $D_0$  при использовании комплексов в условиях активного противодействия может быть определена из следующего соотношения:

$$B_i = W_{iy}(D) - W_{in}(D) = \max,$$

где  $W_{iy}(D)$  — значение нанесенного ущерба противнику в операции при использовании комплекса на дальности  $D$ ;  $W_{in}(D)$  — собственные потери в операции за счет противодействия противника при использовании комплекса на дальности  $D$ .

К указанному типу относятся комплексы торпедного оружия, некоторых типов ракетного оружия и т. д.

Таким образом, для любого комплекса оружия существует оптимальная дальность его использования по назначению, с учетом которой может быть определена и необходимая дальность действия входящего в его состав средства обнаружения.

Для определения показателя  $P_{Eoi}$  необходимо так же знать явный вид функции, связывающей значения дальностей  $D$  и  $D_n$  средства обнаружения. С целью решения этой задачи рассмотрим общий случай применения комплекса оружия, имеющего в своем составе

средство обнаружения. Всю шкалу возможных дальностей действия средства обнаружения можно разбить на три зоны (рис. 3.2.2, на котором точка  $O$  — место расположения средства обнаружения).

**Зона А** — это интервал таких дальностей действия средства обнаружения, которые не обеспечивают использования комплекса. Эта зона является, по существу, «мертвой зоной» средства обнаружения. Величина ее может быть определена (при расположении средства обнаружения и обеспечиваемого элемента комплекса в одном месте) из следующего выражения:

$$D_m = D_{om} + V_{отн} t_{раб}, \quad (3.2.3)$$

где  $D_{om}$  — величина «мертвой зоны» обеспечиваемого элемента комплекса.

Из выражения (3.2.3) следует, что величина зоны А при работе средства обнаружения по неподвижным целям будет зависеть только от значения  $D_{om}$ , а при работе по подвижным целям она будет определяться как величиной  $D_{om}$ , так и значениями  $V_{отн}$  и  $t_{раб}$ .

Если средство обнаружения и элемент комплекса (системы), использующий его данные, разнесены в пространстве, то при определении величины зоны А, как впрочем и других зон (Б и В), должна быть учтена величина удаления их друг от друга.

Итак, если дальность действия средства обнаружения находится в пределах зоны А ( $D \leq D_m$ ), то обслуживаемый комплекс не может быть использован. Показатель  $P_{Еoi}$  такого средства обнаружения следует считать равным нулю.

**Зона В** — зона, включающая в себя все возможные дальности действия средства обнаружения, превышающие величину  $D_n$ , определяемую выражением (3.2.2). Когда дальность действия средства обнаружения лежит в зоне В (т. е. при  $D \geq D_n$ ), то обслуживаемый комплекс

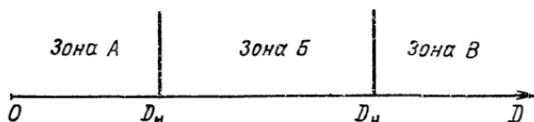


Рис. 3.2.2. Зоны возможной дальности действия средств обнаружения.

может использоваться на дальности  $D_0$ . Совершенно очевидно, что при заданных значениях  $D_0$ ,  $V_{\text{отн}}$  и  $t_{\text{раб}}$  увеличение дальности действия средства обнаружения за пределы  $D_{\text{н}}$  не приведет к увеличению результата использования в операции комплекса или системы военной техники. В этом случае, независимо от значения  $D$ , показатель  $P_{\text{Е}0i}$  будет равен единице. Однако необходимо иметь в виду, что если дальность действия средства обнаружения  $D > D_{\text{н}}$ , то без уменьшения значения показателя  $P_{\text{Е}0i}$  время  $t_{\text{раб}}$  комплекса может быть увеличено, например, за счет снижения готовности к использованию его элементов.

**Зона Б** — зона, включающая дальности действия средства обнаружения в интервале от  $D_{\text{м}}$  до  $D_{\text{н}}$ .

Нетрудно видеть, что если дальность действия средства обнаружения лежит в зоне Б, то обеспечиваемый комплекс может быть использован по назначению. Однако в этом случае дальность использования комплекса будет меньше  $D_0$ , а результат его применения в операции будет ниже максимально возможного. Степень снижения результата использования комплекса в операции из-за недостаточной дальности действия средства обнаружения зависит от вида и свойств комплекса, а также от соотношения  $D$  и  $D_{\text{н}}$ . Недостаточная дальность действия средства обнаружения в различных комплексах проявляется по-разному.

Так, при  $D < D_{\text{н}}$  комплексы зенитной артиллерии огонь по целям будут открывать на дальностях, меньших предельной дальности стрельбы артустановок, при этом продолжительность обстрела целей будет меньше возможной. Все это в конечном итоге приведет к снижению вероятности поражения цели. Если дальность действия средства обнаружения равна  $D$  ( $D_{\text{м}} < D < D_{\text{н}}$ ), то начальная дальность использования указанных комплексов

$$D_{0\text{н}} = D - V_{\text{отн}}(t_{\text{раб}} + t_{\text{пол}}), \quad (3.2.4)$$

где  $t_{\text{пол}}$  — время полета снаряда до цели, а время воздействия их по целям (время боевой работы)

$$t_{\text{бр}} = \frac{D - [D_{0\text{м}} + V_{\text{отн}}(t_{\text{раб}} + t_{\text{пол}})]}{V_{\text{отн}}}. \quad (3.2.5)$$

Комплексы типа комплексов торпедного оружия в случае, когда  $D < D_H$ , будут использоваться на дальностях, меньших  $D_0$ . Это приведет к снижению результата их использования в операции за счет превалирующего увеличения потерь от воздействия противника.

Из выражений (3.2.4) и (3.2.5) следует, что каждой дальности действия средства обнаружения (в интервале от  $D_M$  до  $D_H$ ) соответствуют определенная начальная дальность и продолжительность использования комплекса, однозначно определяющие результат применения его в операции. Таким образом, результат использования комплекса при прочих равных условиях будет функцией дальности действия средств обнаружения, т. е. функцией успешности выполнения ими решаемых задач. Это значит, что показатель  $P_{Eoi}$  средств обнаружения наиболее полно может быть определен с помощью результата использования соответствующего комплекса.

Обозначим  $W_{\Phi ki}$  результат использования соответствующего комплекса в операции, который будет иметь место при дальности действия средства обнаружения, равной  $D$ . Совершенно очевидно, что для любого комплекса каждой дальности действия средства обнаружения будет соответствовать определенное значение показателей  $W_{\Phi ki}$ . Максимальное значение этого показателя ( $W_{Hki}$ ) будет иметь место при  $D \geq D_H$ . При этом показатель  $P_{Eoi}$  равен единице.

Если средство обнаружения имеет дальность действия, равную  $D$ , то соотношение показателей  $W_{\Phi ki}$  и  $W_{Hki}$  и будет количественно характеризовать успешность выполнения средством обнаружения решаемой элементарной задачи.

В соответствии с (3.1.4) значение показателя  $P_{Eoi}$  средства обнаружения с дальностью действия в пределах зоны Б, будет определяться следующим соотношением:

$$P_{Eoi} = \frac{W_{\Phi ki}}{W_{Hki}} \quad (3.2.6)$$

Поскольку знаменатель выражения (3.2.6) для соответствующего комплекса имеет постоянное значение, то характер изменения показателя  $P_{Eoi}$  средства обнаружения с дальностью действия в пределах зоны Б, будет

аналогичен характеру изменения результата применения в операции обеспечиваемого комплекса (рис. 3.2.3).

Очевидно, что при  $D \leq D_M W_{\phi \kappa i} = 0$  и  $P_{Eoi} = 0$ , а при  $D \geq D_H W_{\phi \kappa i} = W_{\kappa i}$  и  $P_{Eoi} = 1$ .

Таким образом, выражение (3.2.6) является справедливым не только для зоны Б, но и для других зон средств обнаружения.

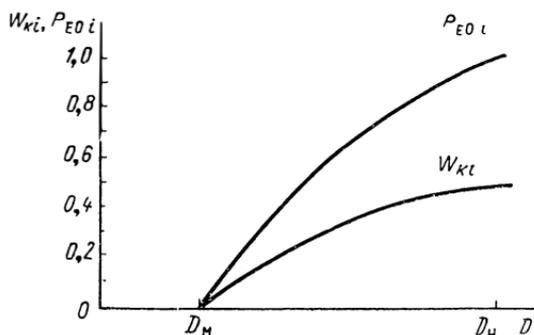


Рис. 3.2.3. Характер изменения  $P_{Eoi}$  от дальности действия средств обнаружения.

Выражение (3.2.6) для определения показателя  $P_{Eoi}$  является справедливым для всех видов комплексов военной техники. Для некоторых видов комплексов, в связи со спецификой их использования, выражения для определения показателя  $P_{Eoi}$  по форме могут несколько отличаться от (3.2.6). Так, для комплексов оружия, используемых в условиях активного противодействия, показатель потенциальной эффективности средств обнаружения в операции будет определяться выражением

$$P_{Eoi} = \frac{W_{iy}(D) - W_{in}(D)}{W_{iy}(D_H) - W_{in}(D_H)}.$$

В некоторых случаях величина показателя  $W_{\phi \kappa i}$  для зоны Б прямо пропорциональна дальности действия средств обнаружения, т. е.

$$W_{\phi \kappa i} = KD,$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Для таких средств обнаружения показатель

$$P_{Eoi} = 0 \text{ при } D < D_m,$$

$$P_{Eoi} = \frac{D}{D_n} \text{ при } D_m < D < D_n,$$

$$P_{Eoi} = 1 \text{ при } D \geq D_n.$$

Остановимся на особенностях одной из составных частей показателя  $P_{Eoi}$  — дальности  $D$ . Как следует из выражения (3.2.6), фактическая дальность действия средства обнаружения является одной из важнейших характеристик, определяющей значение показателя  $P_{Eoi}$ . Дальность действия является, обычно, функцией большого числа как технических характеристик средства обнаружения ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots$ ), так и условий его использования ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, x_1, x_2, \dots, x_i$ ), т. е.

$$D = D(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots). \quad (3.2.7)$$

Известно, что многие технические характеристики и условия использования, определяющие дальность действия средств обнаружения, в процессе эксплуатации могут изменять свои значения.

В зависимости от характера и скорости изменения, все параметры, входящие в (3.2.7), применительно к определенному отрезку времени могут быть разделены на постоянные, медленно меняющиеся и быстро меняющиеся. Существующие методы контроля параметров средств обнаружения и условий использования последних позволяют учитывать лишь влияние постоянно действующих и медленно меняющихся во времени параметров.

Так, дальность действия различного вида радиолокационных станций обнаружения может быть определена аналитически с помощью известных зависимостей [12] или экспериментально. При этом необходимо иметь в виду, что мощность передатчика, чувствительность приемника и другие параметры РЛС, а также эффективная отражающая поверхность цели, условия прохождения волн и подобные характеристики, определяющие дальность действия этих станций, обычно изменяются во времени. В этой связи с помощью указанных выражений дальность действия РЛС определяется, как прави-

ло, для средних значений параметров станций и условий их использования.

Имеющие место изменения параметров средств и условий их использования приводят к тому, что для каждого конкретного случая дальность обнаружения цели является случайной величиной. Разброс дальности действия средств обнаружения характеризуется величиной дисперсии или среднеквадратичного (срединного) отклонения.

В связи с тем, что дальность действия зависит от большого числа изменяющихся факторов, закон распределения этого параметра во многих случаях можно считать нормальным. Тогда вероятность обнаружения цели на дальности, не менее заданной ( $d$ ) [1]

$$P(d \leq D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_d^{\infty} e^{-\frac{(D-\bar{D})^2}{2\sigma^2}} dD,$$

или

$$P(d \leq D) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{d - \bar{D}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad (3.2.8)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение дальности действия средства обнаружения;  $\bar{D}$  — среднее значение дальности действия средства обнаружения;  $\Phi$  — функция Лапласа.

Зависимость вероятности обнаружения цели от дальности до нее для многих средств обнаружения имеет вид, приведенный на рис. 3.2.4. При определении характера зависимости  $P(D)$  необходимо учитывать конкретный вид критерия, который

применяется в исследуемом средстве для определения факта обнаружения цели (например, три отметки подряд при дискретном обзоре и т. д.).

Заметим, что определение характеристик дальности действия средств обнаружения как аналитическими методами, так и путем проведения специальных испытаний

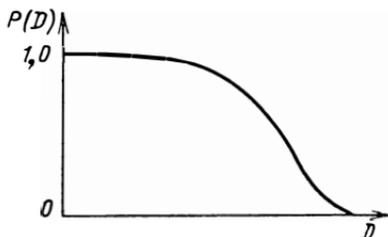


Рис. 3.2.4. Пример зависимости вероятности обнаружения цели от дальности до нее.

подробно рассмотрено в литературе, например в книге А. А. Афанасьева и В. А. Горбунова [1].

Для получения статистических характеристик показателя  $P_{Eoi}$  средства обнаружения необходимо знать два закона:

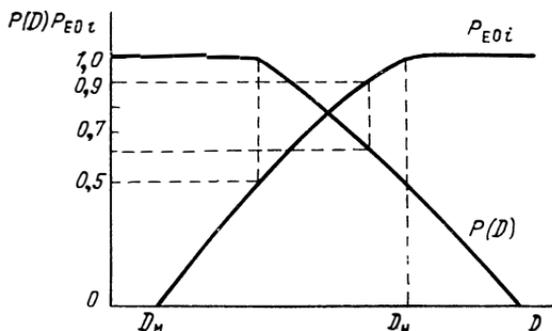


Рис. 3.2.5. Пример определения показателя  $P_{Eoi}$ .

— распределения дальности действия  $P(D)$  средства обнаружения;

— зависимости значения показателя  $P_{Eoi}$  средства обнаружения от дальности действия последнего.

Наглядно это показано на рис. 3.2.5. Из рисунка следует, что в данном случае значение показателя  $P_{Eoi} \leq 0,5$  будет иметь место со 100%-ной вероятностью, а значение  $P_{Eoi} \leq 0,9$  — в 60% случаях.

### 3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{Ei}$ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ

Средства целеуказания, являясь составной частью многих комплексов и систем военной техники, могут быть весьма разнообразными по виду используемой энергии и принципу действия. Они предназначаются для определения и выдачи другим элементам комплексов необходимых данных о целях, находящихся в определенной области пространства. Эти данные указанными элементами используются обычно для установления контакта с соответствующими целями.

Необходимо отметить, что во многих случаях функции средств обнаружения и целеуказания реализуются

в одной аппаратуре (средствах обнаружения и целеуказания). В других случаях средства целеуказания представляют собой самостоятельную аппаратуру, которая работает совместно со средствами обнаружения. Примером средств целеуказания такого типа могут служить выносные индикаторы, подключаемые к РЛС обнаружения и имеющие устройства для определения и передачи координат целей. Следует указать, что средства целеуказания являются важным, но не единственным элементом, участвующим в процессе целеуказания. В осуществлении этого процесса непосредственное и активное участие принимают элементы комплексов, использующие данные средств целеуказания. В дальнейшем эти элементы будем называть потребителями данных целеуказания или просто потребителями.

Средства целеуказания, как правило, являются средствами многократного действия. Они могут быть как одноканальными, так и многоканальными, иначе могут обеспечивать одновременное целеуказание одному или нескольким потребителям соответственно.

При определении показателя  $P_{Ei}$  средств целеуказания необходимо иметь в виду следующее обстоятельство. В ряде случаев одно и то же средство целеуказания может быть использовано в составе различных видов комплексов и систем, а содержание операции одного и того же комплекса может изменяться. В этой связи содержание задачи одного и того же средства целеуказания, используемого в составе различных комплексов и в разных условиях, может быть различным.

Рассмотрение путей определения показателя  $P_{Ei}$  этих средств целесообразно производить применительно к такой задаче, которая является основной частью любых задач, выполняемых средствами при обеспечении различных комплексов. Эта задача должна иметь такое содержание, чтобы вероятность ее успешного выполнения могла входить в показатели, характеризующие качество выполнения средствами целеуказания своих функций в любых операциях комплексов военной техники. Такую задачу будем называть элементарной задачей средств целеуказания. Ее содержанием является целеуказание одиночному потребителю по одиночной цели. Показатель ее успешного выполнения в реальных условиях использования средств целеуказания будем обо-

значать через  $P_{цi}$ . Нетрудно убедиться, что элементарная задача является составной частью любых задач, выполняемых средствами целеуказания в реальных условиях (целеуказание группе потребителей по нескольким одновременно действующим целям и т. д.).

В соответствии с (2.3.8) основной составной частью  $P_{цi}$  является показатель  $P_{Ецi}$ , который представляет собой вероятность успешного выполнения средством элементарной задачи по обеспечению целеуказания одному потребителю по одиночной цели, осуществляемой в условиях, указанных в § 3.1. Показатель  $P_{Ецi}$  может быть использован (как самостоятельно, так и совместно с показателями  $\mu$ ,  $K_{и}$ ,  $T_c$  в качестве частного критерия при решении некоторых задач, связанных со сравнительной оценкой эффективности средств целеуказания, а также в качестве основной составной части при определении показателей  $P_{ji}$ ,  $W_i$ ,  $W$ ,  $E$  этих средств.

Успешность выполнения средствами целеуказания сложных задач определяется как значением показателя  $P_{Ецi}$ , так и рядом других показателей. Так, эффективность одноканальных средств целеуказания при обеспечении нескольких комплексов и при работе по нескольким целям определяется как значением показателя  $P_{Ецi}$ , так и их пропускной способностью, которая зависит от продолжительности решения ими элементарной задачи. Эффективность многоканальных средств целеуказания определяется как успешностью и продолжительностью выполнения элементарной задачи, так и количеством целей ( $\mu$ ), которые могут быть одновременно (в течение определенного времени) ими обслужены. Более подробно вопросы оценки эффективности средств целеуказания при решении сложных задач рассмотрены в конце настоящего параграфа.

Рассмотрим пути определения показателя  $P_{Ецi}$ .

Содержание элементарной задачи средств целеуказания состоит в определении и передаче другим элементам комплекса необходимых данных о цели.

Началом элементарной операции средств целеуказания является момент обнаружения цели, а окончанием ее — момент установления контакта с целью элементом комплекса, использующим данные указанных средств. Элементарная операция, выполняемая средством целеуказания, по своему характеру является сложной и со-

стоит из двух последовательных по времени и различных по содержанию этапов. Содержанием первого этапа является своевременное обнаружение цели в заданной зоне обзора. Нетрудно видеть, что содержание данного этапа элементарной операции средств целеуказания целиком и полностью совпадает с содержанием элементарной операции средств обнаружения. Содержанием второго этапа элементарной операции средств целеуказания является определение необходимых параметров обнаруженной цели и передача их потребителю.

Очевидно, что успешность выполнения средством целеуказания первого этапа элементарной операции может быть оценена с помощью показателя  $P_{Eoi}$ , который используется для оценки эффективности средств обнаружения. Показатель успешности выполнения средством целеуказания второго этапа операции в условиях, указанных в § 3.1, обозначим через  $P'_{Eci}$ . Этот показатель представляет собой вероятность успешного выполнения второго этапа элементарной операции при условии, что первый ее этап выполнен успешно. Из анализа характера функций, выполняемых средствами целеуказания, следует, что показатель их потенциальной эффективности в операции

$$P_{Eci} = P_{Eoi} P'_{Eci} \quad (3.3.1)$$

Значение показателя  $P_{Eoi}$  средств целеуказания зависит от соотношения требуемой ( $D_{н}$ ) и фактической ( $D$ ) дальности их действия, а также вида зависимости  $W_{фки}$ , и может быть определено с помощью выражения (3.1.4).

Необходимая дальность действия средств целеуказания может быть определена с помощью выражения (3.2.2). Входящая в это выражение величина  $t_{раб}$  в данном случае будет представлять собой интервал времени от момента обнаружения цели до момента использования данных целеуказания потребителем. Это время представляет собой продолжительность операции целеуказания. В общем случае оно может быть определено как

$$t_{раб} = t_{пр\ реш} + t_{в\ цу} + t_{п\ цу},$$

где  $t_{пр\ реш}$  — время, затраченное на принятие решения о выдаче целеуказания по обнаруженной цели;  $t_{в\ цу}$  —

время, затраченное на выдачу целеуказания, т. е. время от принятия решения на выдачу целеуказания до момента окончания передачи необходимых данных о цели потребителю;  $t_{пцу}$  — время, затраченное на прием целеуказания, т. е. время от момента окончания передачи необходимых данных до момента окончания использования их потребителем.

Рассмотрим особенности определения показателя  $P'_{Ецi}$ . На втором этапе операции средство целеуказания обеспечивает определение и передачу соответствующему потребителю необходимых данных о цели. Обычно этими данными являются определенные параметры и чаще всего — координаты цели, которые необходимы потребителю для установления контакта с нею. Содержание понятия установление контакта с целью является различным для разных потребителей и определяется их особенностями. В первом случае это будет переход на сопровождение цели, во втором — установление энергетического контакта с целью, в третьем — определение расположения цели относительно комплекса без установления энергетического контакта с нею.

Показатель  $P'_{Ецi}$  представляет собой вероятность обеспечения средством целеуказания установления контакта с целью соответствующим элементом комплекса. Эта вероятность зависит в первую очередь от свойств потребителя, т. е. от объема и необходимой точности данных, которые он должен получать для установления надежного контакта с целью в течение заданного времени. Таким образом, свойства потребителя вместе с характеристиками цели определяют требования к средству целеуказания по составу параметров цели и точности их определения.

При соответствующих параметрах комплекса и цели вероятность успешного установления контакта с нею зависит от свойств средства целеуказания, т. е. от вида используемых параметров цели, а также точности определения их значений.

В соответствии с (3.1.5) показатель  $P'_{Ецi}$  может быть определен с помощью следующей зависимости:

$$P'_{Ецi} = \frac{P_{цy}(A_1, A_1, \dots, A_{н_1}, A_{н_2}, \dots, A_{к_1}, A_{к_2}, \dots)}{P_{цy}(A_1, A_2, \dots, A_{н_1}, A_{н_2}, \dots, A_{к_1}, A_{к_2}, \dots) |_{E_{цc}=0}},$$

где  $P_{цy}(A_1, A_2, \dots, A_{н_1}, A_{н_2}, \dots, A_{к_1}, A_{к_2}, \dots)$  — вероятность уста-

новления контакта с целью при условии, что средство целеуказания и другие элементы комплекса, участвующие в этом процессе, имеют фактические значения соответствующих тактических характеристик;

$$P_{цз}(A_1, A_2, \dots, A_{n_1}, A_{n_2}, \dots, A_{k_1}, A_{k_2}, \dots) | E_{цз}=0$$

вероятность установления контакта с целью при условии, что средство целеуказания безошибочно определяет и передает потребителю все необходимые данные о цели;  $E_{цз}$  — срединная ошибка средств целеуказания.

Для определения показателя  $P'_{E_{цз}}$  в каждом конкретном случае нужно найти зависимость вероятности установления контакта с целью соответствующим потребителем для применяемого способа целеуказания, количества определяемых и передаваемых средством целеуказания параметров цели, точности их определения и передачи. При этом необходимо учитывать, что в процессе целеуказания соответствующий элемент комплекса при установлении контакта с целью обычно использует не истинные, а искаженные параметры цели.

Расхождение значений истинных параметров цели с теми их значениями, которые используются для установления контакта с нею в процессе целеуказания, является следствием следующих причин:

— значения используемых параметров цели средствами целеуказания определяются с ошибками. Если при целеуказании используются координаты цели, то точность определения их значений может характеризоваться срединными ошибками измерения дальности ( $E_d$ ), азимута ( $E_a$ ) и угла места ( $E_g$ );

— параметры цели, используемые для целеуказания, при передаче их потребителям могут искажаться. Если при целеуказании используются координаты цели, то точность их передачи потребителю может характеризоваться срединными ошибками по дальности ( $E_{пд}$ ), азимуту ( $E_{па}$ ) и углу места ( $E_{пг}$ );

— воспроизведение соответствующим элементом комплекса принятых значений параметров цели может осуществляться неточно. Если этими параметрами являются координаты цели, то точность их воспроизведения может характеризоваться срединными ошибками по дальности ( $E_{прд}$ ), азимуту ( $E_{пра}$ ) и углу места ( $E_{прг}$ );

— поскольку процесс передачи и приема данных целеуказания требует определенного времени, то используемые для установления контакта с целью параметры движущихся относительно потребителя целей за время передачи и приема данных целеуказания могут изменять свои первоначальные значения («устаревать»).

Используемые потребителем данные целеуказания должны обеспечить установление контакта с целью. Это событие будет иметь место лишь в том случае, если расхождение между используемыми потребителем при целеуказании и истинными значениями параметров цели не будет превышать определенной величины, зависящей от свойств и особенностей потребителя. Если при целеуказании используются координаты цели, то установление контакта с нею может иметь место лишь в том случае, когда разность между истинными и используемыми потребителем координатами цели не превышает величины, значение которой определяется свойствами потребителя.

Определение значения показателя  $P'_{Ецi}$  для различных средств целеуказания и потребителей связано с необходимостью учета их возможных особенностей, к числу которых может быть отнесено: вид цели, количество ее параметров, используемых при целеуказании, способ целеуказания, наличие дополнительного поиска и т. д. В качестве примера рассмотрим один из возможных случаев определения показателя  $P'_{Ецi}$ .

Трехкоординатная РЛС обнаружения воздушных целей и целеуказания в заданной зоне производит обнаружение цели на дальности  $D$  и определение ее координат со средними ошибками  $E_d$ ,  $E_\alpha$  и  $E_\epsilon$ . Координаты цели по линии связи однократно передаются на РЛС управления стрельбой (рис. 3.3.1), где они воспроизводятся и используются для наведения дальнометра и антенной системы станции. Для упрощения расчетов примем, что потребителем получаемые данные целеуказания воспроизводятся безошибочно ( $E_{прд} = E_{пр\alpha} = E_{пре} = 0$ ). В этом случае

$$P'_{Ецi} = P_{цy}(A_1, A_2, \dots, A_{n_1}, A_{n_2}, \dots, A_{k_1}, A_{k_2}, \dots)$$

Ошибки определения координат цели и передачи их по линиям связи в большинстве случаев могут считаться

независимыми друг от друга. В этой связи суммарные срединные ошибки целеуказания по дальности, азимуту и углу места будут определяться следующими выражениями:

$$E_{цд}^2 = E_d^2 + E_{пд}^2,$$

$$E_{ца}^2 = E_\alpha^2 + E_{п\alpha}^2,$$

$$E_{це}^2 = E_\varepsilon^2 + E_{пе}^2.$$

Совершенно очевидно, что РЛС управления стрельбой захват цели может осуществить только в том случае, если цель попадет в ее зону обзора, ориентация

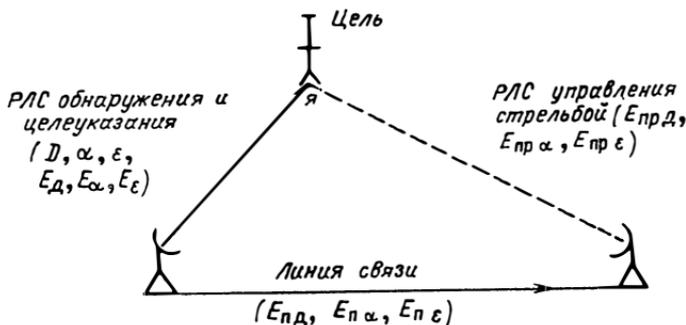


Рис. 3.3.1. Схема целеуказания РЛС управления стрельбой от трехкоординатной станции обнаружения и целеуказания.

которой в пространстве производится по данным средств целеуказания. Обозначим размеры зоны обзора РЛС управления стрельбой по дальности, азимуту и углу места через  $\Delta D$ ,  $\Delta \alpha$  и  $\Delta \varepsilon$  соответственно.

Показатель  $P'_{Ецi}$  в данном случае представляет собой вероятность попадания цели в область обзора РЛС управления стрельбой, ориентированную в пространстве по данным целеуказания. Эта вероятность определяется соотношением величины зоны обзора и суммарными ошибками целеуказания и может быть представлена как

$$P'_{Ецi} = \int_{-\Delta D/2}^{\Delta D/2} \int_{-\Delta \alpha/2}^{\Delta \alpha/2} \int_{-\Delta \varepsilon/2}^{\Delta \varepsilon/2} f(D, \alpha, \varepsilon) dD, d\alpha, d\varepsilon,$$

где  $f(d, \alpha, \varepsilon)$  — плотность вероятности нахождения цели относительно центра зоны обзора РЛС управления стрельбой.

Для облегчения вычислений значения показателя  $P'_{\text{Ец}i}$  примем, что область пространства, ограниченная диаграммой направленности РЛС управления стрельбой и ее стробом дальности, представляет собой прямоугольный параллелепипед. Плотность вероятности нахождения цели относительно центра указанной зоны при нормальном законе распределения суммарных ошибок целеуказания определяется следующим выражением:

$$f(d, \alpha, \varepsilon) = \frac{\rho^3}{\pi^{3/2} E_{\text{ц}x} E_{\text{ц}\alpha} E_{\text{ц}\varepsilon}} e^{-\rho^2 \left( \frac{\Delta D^2}{E_{\text{ц}d}^2} + \frac{\Delta \alpha^2}{E_{\text{ц}\alpha}^2} + \frac{\Delta \varepsilon^2}{E_{\text{ц}\varepsilon}^2} \right)},$$

где  $\rho = 0,477$ .

Как известно [3], вероятность попадания точки, распределенной по нормальному закону, в прямоугольный параллелепипед, ограниченный абсциссами  $\alpha$  и  $\beta$ , ординатами  $\gamma$  и  $\sigma$ , аппликатами  $\varepsilon$  и  $\eta$ , может быть определена с помощью следующего выражения:

$$P = \frac{1}{8} \left[ \widehat{\Phi} \left( \frac{\beta}{E_{\text{ц}x}} \right) - \widehat{\Phi} \left( \frac{\alpha}{E_{\text{ц}x}} \right) \right] \left[ \widehat{\Phi} \left( \frac{\sigma}{E_{\text{ц}\alpha}} \right) - \widehat{\Phi} \left( \frac{\gamma}{E_{\text{ц}\alpha}} \right) \right] \left[ \widehat{\Phi} \left( \frac{\eta}{E_{\text{ц}\varepsilon}} \right) - \widehat{\Phi} \left( \frac{\varepsilon}{E_{\text{ц}\varepsilon}} \right) \right],$$

где  $\widehat{\Phi}$  — приведенная функция Лапласа.

Если в рассматриваемом случае область возможного положения цели симметрична относительно центра зоны обзора РЛС управления, то показатель

$$P'_{\text{Ец}i} = \widehat{\Phi} \left( \frac{\Delta D}{2E_{\text{ц}d}} \right) \widehat{\Phi} \left( \frac{\Delta \alpha}{2E_{\text{ц}\alpha}} \right) \widehat{\Phi} \left( \frac{\Delta \varepsilon}{2E_{\text{ц}\varepsilon}} \right). \quad (3.3.2)$$

Выражение (3.3.2) является справедливым только для случая целеуказания по неподвижной цели. При целеуказании по подвижной цели вероятность ее захвата будет зависеть не только от соотношения размеров зоны обзора потребителя и суммарных ошибок целеуказания, но и от величины устаревания координат цели за время целеуказания. Величина этого устаревания зависит в первую очередь от скорости цели и продол-

жительности определения, передачи, приема и использования потребителем данных целеуказания.

Приведенное выше выражение (3.3.2) для определения показателя  $P'_{Ецi}$  получено в предположении, что соответствующие параметры цели определяются и передаются потребителю однократно. Когда при однократной передаче данных значение показателя  $P'_{Ецi}$  имеет недопустимо низкое значение, могут приниматься специальные меры для повышения надежности целеуказания. Одной из таких мер является многократное определение и передача потребителю необходимых данных о цели.

Если по условиям использования средств целеуказания имеется возможность определить и передать эти данные  $n$  раз, причем определение и передача данных каждый раз производятся независимо, то показатель  $P'_{Ецi}$  при этом будет определяться следующим выражением:

$$P'_{Ецi} = 1 - [(1 - P'_{Ецi_1}) \dots (1 - P'_{Ецi_j}) \dots (1 - P'_{Ецi_n})], \quad (3.3.3)$$

где  $P'_{Ецi_j}$  — вероятность установления контакта с целью по данным  $j$ -й передачи данных целеуказания.

Если по условиям использования  $P'_{Ецi_1} = P'_{Ецi_j} = \dots = P'_{Ецi_n}$  (например, при выдаче целеуказания с индикатора кругового обзора при каждом обороте антенны РЛС обнаружения), то

$$P'_{Ецi} = 1 - (1 - P'_{Ецi_j})^n. \quad (3.3.4)$$

Итак, значение показателя  $P'_{Ецi}$  определяется параметрами движения цели, свойствами средства целеуказания (значением величин  $E_d, E_\alpha, E_\epsilon, E_{дд}, E_{п\alpha}, E_{п\epsilon}$ ) и потребителя (значением величин  $E_{прд}, E_{пр\alpha}, E_{пр\epsilon}, \Delta D, \Delta\alpha, \Delta\epsilon$ ).

Наиболее рациональным путем обеспечения высокого значения  $P'_{Ецi}$  является разумное сочетание параметров средства целеуказания и потребителя, а наилучшим способом обеспечения указанного сочетания — их совместное проектирование.

В реальных условиях средство целеуказания может обеспечивать использование по одной цели не только

одного, но и нескольких потребителей. Примером этого может служить выдача данных по одной цели от РЛС целеуказания нескольким РЛС управления стрельбой зенитной артиллерии.

Процесс целеуказания нескольким потребителям по одной цели является сложной задачей, представляющей собой совокупность элементарных задач, содержание каждой из которых состоит в обслуживании одного потребителя. При этом сложная задача будет состоять из столько элементарных, сколько потребителям должно быть выдано целеуказание. По способу выполнения указанных элементарных задач все средства целеуказания могут быть разделены на две группы.

Первую группу составляют те из них, которые позволяют осуществить выдачу целеуказания по одной цели нескольким потребителям одновременно. Число потребителей, которым средство может обеспечивать одновременную выдачу целеуказания по одной цели, наряду с продолжительностью выполнения элементарной задачи, будет характеризовать его пропускную способность.

Ко второй группе относятся те средства, которые одновременно могут обслуживать только одного потребителя, а выдачу целеуказания нескольким потребителям по одной цели производить последовательно. Если число потребителей, которым должны быть выданы данные по одной и той же цели, не больше пропускной способности средства первой группы, то целеуказание каждому из них может выдаваться практически одновременно. В этом случае показатели  $P_{Eoi}$  и  $P'_{Eci}$  будут иметь такое же значение, как и в случае обслуживания средством одного потребителя по этой же цели.

Элементарные задачи, связанные с выдачей целеуказания ряду потребителей по одной цели, средствами второй группы могут выполняться только последовательно.

Как известно, значение показателя  $P_{Eoi}$  зависит в первую очередь от соотношения фактической и необходимой дальности действия средства. При последовательной выдаче целеуказания нескольким потребителям по одной цели, обнаруживаемой на дальности  $D$ , время  $t_{\text{раб}}$ , для каждого потребителя будет различным.

Для первого потребителя

$$t_{\text{раб}_1} = t_{\text{пр.реш}} + (t_{\text{в.цз}} + t_{\text{п.цз}}).$$

Для второго потребителя

$$t_{\text{раб}_2} = t_{\text{пр реш}} + 2(t_{\text{в цу}} + t_{\text{п цу}}).$$

По аналогии, для  $K$ -го потребителя

$$t_{\text{раб}_K} = t_{\text{пр реш}} + K(t_{\text{в цу}} + t_{\text{п цу}}).$$

Различные значения  $t_{\text{раб}}$  в элементарных задачах, связанных с последовательным обслуживанием нескольких потребителей по одной цели, могут быть причиной различных значений показателя  $D_n$  для каждой из указанных операций. Отмеченное обстоятельство в свою очередь может быть причиной различного значения показателя  $P_{E_o i}$  средства целеуказания при выполнении им однотипных элементарных задач. Это положение наглядно иллюстрируется следующим примером.

На корабле имеется РЛС обнаружения воздушных целей и целеуказания; а также две группы зенитных артиллерийских установок, каждая из которых обслуживается собственной РЛС управления стрельбой. Целеуказание этим РЛС управления стрельбой со станции обнаружения производится последовательно. Необходимая дальность действия РЛС обнаружения и целеуказания может быть определена по следующей формуле:

$$D_n = D_o + (t_{\text{раб}} + t_{\text{пус}} + t_{\text{пол}}) V_{\text{отн}}, \quad (3.3.5)$$

где  $t_{\text{пус}}$  — время от момента захвата цели РЛС управления стрельбой до момента выработки приборами управления стрельбой исходных данных для наведения артиллерийских установок;  $D_o$  — предельная дальность стрельбы артиллерийских установок;  $t_{\text{пол}}$  — время полета снаряда на дальность  $D_o$ .

Если принять  $D_o = 15$  км,  $t_{\text{пус}} = 10$  сек,  $t_{\text{пол}} = 20$  сек,  $V_{\text{отн}} = 500$  м/сек,  $t_{\text{пр реш}} = 5$  сек,  $t_{\text{в цу}} = 10$  сек,  $t_{\text{п цу}} = 5$  сек, то в соответствии с (3.3.5) необходимая дальность действия РЛС обнаружения и целеуказания применительно к одной РЛС управления стрельбой будет составлять 40 км, а ко второй РЛС управления — 45 км.

Если фактическая дальность действия РЛС обнаружения по какой-либо цели равна 40 км, то при последовательной выдаче целеуказания по ней значения пока-

зателей  $P_{Eoi}$  будут определяться следующими выражениями:

— для первой РЛС

$$P_{Eoi} = \frac{W_{\Phi ki}}{W_{\text{HKi}}} = \frac{W_{\Phi ki} (40 \text{ км})}{W_{\text{HKi}} (40 \text{ км})} = 1;$$

— для второй РЛС

$$P_{Eoi} = \frac{W_{\Phi ki} (40 \text{ км})}{W_{\text{HKi}} (45 \text{ км})},$$

где  $W_{\Phi ki}$  — вероятность поражения цели при условии, что РЛС обнаружения и целеуказания имеет дальность действия  $D$  км;  $W_{\text{HKi}}$  — вероятность поражения цели при условии, что РЛС обнаружения и целеуказания имеет дальность действия, обеспечивающую открытие огня по цели с предельной дальности стрельбы обслуживаемых артустановок.

Последовательное по времени обслуживание потребителей по одной цели может быть и у средств целеуказания первой группы. Оно будет иметь место в том случае, когда число потребителей, подлежащих одновременному обслуживанию, будет больше пропускной способности средства целеуказания. При этом обслуживание группы потребителей будет представлять собой совокупность последовательно-параллельных по времени элементарных операций целеуказания.

Порядок определения показателя  $P'_{Eci}$  средства, обеспечивающего последовательное по времени целеуказание группе потребителей по одной цели, будет таким же, как и при обслуживании одиночного потребителя по этой же цели (с учетом различных значений дальностей, на которых будет выдаваться целеуказание).

Одним из видов сложных операций целеуказания является обслуживание группы потребителей при наличии нескольких целей, одновременно появившихся в зоне действия средств целеуказания. Эта сложная операция представляет собой совокупность элементарных операций, содержание каждой из которых состоит в обслуживании (выдаче целеуказания) каждого потребителя по соответствующей цели. Анализ характера этой сложной операции показывает, что порядок определения показателей  $P_{Eoi}$  и  $P'_{Eci}$  при этом будет зависеть прежде всего от структуры средств целеуказания, их

пропускной способности, а также соотношения числа потребителей и целей, требующих одновременного обслуживания. При этом возможны следующие случаи:

— если средство целеуказания является одноканальным, то обслуживание каждого последующего потребителя по любой цели (по всем целям или части из них) может быть начато только после окончания обслуживания предыдущего потребителя. В данном случае сложная операция по обслуживанию группы потребителей по нескольким целям будет представлять собой совокупность последовательных по времени элементарных операций, каждая из которых связана с обслуживанием одного потребителя. Естественно, что число элементарных операций в данном случае будет равно числу потребителей, подлежащих обслуживанию одним и тем же средством целеуказания. При этом порядок определения показателей  $P_{E_{oi}}$  и  $P'_{E_{ci}}$  будет таким же, как и в рассмотренном выше случае выдачи целеуказания одноканальным средством нескольким потребителям по одной цели;

— если средство целеуказания является многоканальным, то порядок определения показателей  $P_{E_{oi}}$  и  $P'_{E_{ci}}$  будет зависеть от соотношения его пропускной способности, числа потребителей ( $N_{п}$ ) и целей ( $N_{ц}$ ), требующих одновременного обслуживания. При этом возможны следующие варианты:

а) число каналов ( $N_{к}$ ) средства целеуказания больше числа потребителей и целей, требующих одновременного обслуживания. Это значит, что все потребители и цели могут обслуживаться одновременно. При этом показатели  $P_{E_{oi}}$  и  $P'_{E_{ci}}$  должны определяться так же, как и для рассмотренного выше случая выдачи целеуказания одному потребителю по одиночной цели;

б) число каналов средства целеуказания больше числа целей, требующих одновременного обслуживания ( $N_{ц}$ ), но меньше числа потребителей, которым должно быть выдано целеуказание ( $N_{п}$ ). При этом по одной цели целеуказание может выдаваться нескольким потребителям. В данном случае одновременно может быть выдано целеуказание  $N_{к}$  потребителям. Целеуказание остальным потребителям, в зависимости от соотношения  $N_{п}$  и  $N_{к}$ , может быть выдано во вторую, третью и т. д. очереди. При этом порядок определения показателей

$P_{Eoi}$  и  $P'_{Eci}$  будет таким же, как и для рассмотренного выше случая обслуживания одноканальным средством нескольких потребителей по одиночной цели;

в) число каналов средства целеуказания меньше числа потребителей и целей, подлежащих одновременному обслуживанию, при этом  $N_{ц} \leq N_{п}$ . В этом случае сложная операция целеуказания будет состоять из ряда последовательных по времени операций, каждая из которых связана с выдачей целеуказания  $N_{к}$  потребителям.

Остальным потребителям целеуказание может быть выдано только в последующие очереди. Порядок определения показателей  $P_{Eoi}$  и  $P'_{Eci}$  для каждой элементарной операции при этом будет таким же, как и для рассмотренного выше случая обслуживания одноканальным средством нескольких потребителей по одиночной цели.

#### 3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ $P_{Ei}$ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СТРЕЛЬБОЙ

Доставка снаряда в район цели с необходимой точностью является важнейшим условием успешного выполнения операции любым комплексом оружия. Ведущая роль при решении этой задачи принадлежит специальному элементу комплекса, который носит название системы управления стрельбой.

Содержание основных задач систем управления стрельбой определяется прежде всего видом и параметрами снарядов.

Все снаряды можно разделить на две группы:

— неуправляемые на траектории (для краткости в дальнейшем они будут называться неуправляемыми снарядами);

— управляемые на траектории (для краткости в дальнейшем они будут называться управляемыми снарядами).

Системы управления стрельбой названных групп снарядов по характеру выполняемых задач отличаются друг от друга, что вызывает и некоторые особенности определения их показателей  $P_{Ei}$ .

## Определение показателя $P_{Ei}$ систем управления стрельбой неуправляемых снарядов

Системы управления стрельбой неуправляемых снарядов являются, как правило, средствами многократного действия. Они могут быть как одноканальными, так и многоканальными.

При определении показателя  $P_{Ei}$  для систем управления стрельбой необходимо иметь в виду, что одна и та же система может участвовать в осуществлении различных по объему и содержанию операций соответствующих комплексов оружия. В этой связи содержание задачи в операции, выполняемой одной и той же системой управления, используемой в разных условиях, может быть различной. Поэтому определение показателя  $P_{Ei}$  систем управления стрельбой должно проводиться применительно к тем задачам, которые выполняются ими в операциях соответствующих комплексов.

Рассмотрение путей определения показателя  $P_{Ei}$  систем управления целесообразно производить применительно к такой задаче, которая является основной составной частью любых задач, выполняемых системами управления в различных по содержанию операциях комплексов оружия. Такую задачу будем называть элементарной задачей систем управления. Ее содержанием является обеспечение необходимой точности доставки одиночного снаряда (группы снарядов) в район цели.

Нетрудно видеть, что элементарная задача является составной частью всех задач, выполняемых системами управления стрельбой в реальных условиях (обслуживание группы потребителей, потока целей и т. д.). Показатель успешного выполнения системой управления элементарной задачи в реальных условиях ее использования по назначению обозначим через  $P_{yi}$ .

Основной составной частью  $P_{yi}$  является показатель  $P_{Eyi}$ , представляющий собой вероятность успешного выполнения системой управления элементарной задачи, осуществляемой в условиях, указанных в § 3.1. Показатель  $P_{Eyi}$  может быть использован (как самостоятельно, так и совместно с показателями  $\mu$ ,  $K_n$ ,  $T_c$ ) в качестве частного критерия при решении ряда задач, основанных на сравнительной оценке эффективности систем

управления, а также в качестве основной составной части при определении показателей  $P_{ji}$ ,  $W_i$ ,  $W$  и  $E$  этих систем.

Рассмотрим принципиальные основы определения показателя  $P_{Eyi}$ . Для выполнения своих функций при обеспечении элементарной операции система управления стрельбой должна:

— определить координаты цели (иногда и некоторые ее параметры) относительно пусковых установок. Элементы системы управления стрельбой, предназначенные для выполнения указанного действия, будем называть средствами определения координат и параметров движения цели. В некоторых случаях функции указанного элемента системы управления стрельбой могут выполняться средством обнаружения комплекса. Примером средства, выполняющего функции средства обнаружения комплекса и средства определения координат цели системы управления стрельбой, может служить радиолокационная станция обнаружения надводных целей и управления торпедной стрельбой торпедного катера;

— определить место (в случае необходимости) и параметры движения носителя пусковых установок, в том числе и углы качки. Элементы системы управления стрельбой, предназначенные для выполнения этого действия, будем называть средствами определения параметров носителя. В ряде случаев, например, когда носитель неподвижен, средства данной группы в составе системы управления могут отсутствовать;

— на основе определенных координат и параметров движения цели, параметров движения носителя, а также учета баллистических характеристик снаряда и условий его полета, решить задачу встречи снаряда с целью и определить полные углы наведения пусковых установок в горизонтальной и вертикальной плоскостях (ПУГН и ПУВН соответственно), момент запуска снаряда, а иногда и момент его подрыва. Элементы системы управления стрельбой, предназначенные для выполнения этих действий, будем называть счетно-решающим устройством.

Принципиальная схема системы управления стрельбой неуправляемых снарядов приведена на рис. 3.4.1.

Для успешного выполнения решаемой элементарной задачи система управления стрельбой должна обладать следующими свойствами:

— иметь дальность действия ( $D_n$ ), обеспечивающую необходимую дальность ( $D_o$ ) использования снаряда;

— вырабатывать в течение определенного времени и с необходимой точностью исходные данные для использования снаряда.

Обозначим через  $P_{Едi}$  показатель, характеризующий успешность решения системой управления задачи по

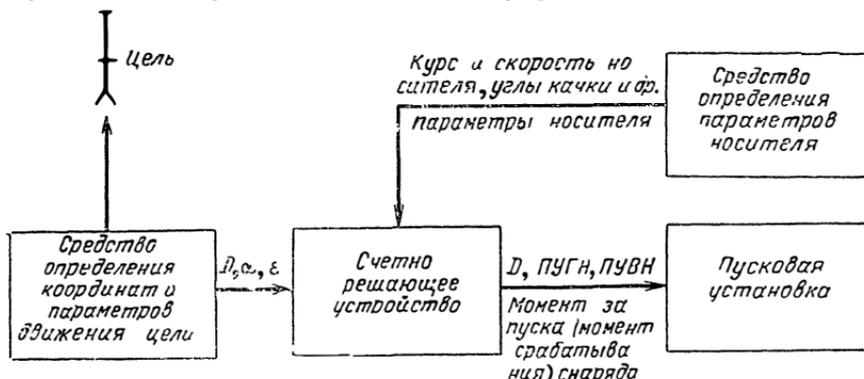


Рис. 3.4.1. Принципиальная схема системы управления стрельбой неуправляемых снарядов.

обеспечению использования снаряда на необходимую дальность действия в элементарной операции, осуществляемой в условиях, указанных в § 3.1, а через  $P_{Етi}$  показатель, характеризующий успешность решения задачи по обеспечению необходимой точности доставки снаряда в район цели в тех же условиях. Очевидно, что показатель потенциальной эффективности системы управления в элементарной операции

$$P_{Еуi} = P_{Едi} P_{Етi}. \quad (3.4.1)$$

Принцип определения показателя  $P_{Едi}$  системы управления может быть таким же, как и рассмотренный в § 3.2 принцип определения показателя  $P_{Еоi}$  средств обнаружения и целеуказания. Величина показателя  $P_{Едi}$  системы управления стрельбой определяется соотношением ее фактической и необходимой дальности действия, а также видом закона поражения цели как функции дальности стрельбы обеспечиваемого комплекса, т. е. следующей зависимостью:

$$P_{i\text{Ед}i} = \frac{P_{\text{к}i}(D, E_{\text{дс}}, E_{\text{ас}}, F_{\text{сс}})}{P_{\text{к}i}(D_{\text{н}}, E_{\text{дс}}, E_{\text{ас}}, E_{\text{сс}})}, \quad (3.4.2)$$

где  $E_{\text{дс}}, E_{\text{ас}}, E_{\text{сс}}$  — срединные суммарные отклонения снарядов от цели по дальности, направлению и углу места соответственно.

Необходимая дальность действия системы управления стрельбой определяется следующим выражением:

$$D_{\text{н}} = D_0 + (t_{\text{пус}} + t_{\text{пол}}) V_{\text{отн}}, \quad (3.4.3)$$

где  $D_0$  — оптимальная дальность использования снаряда;  $t_{\text{пус}}$  — время от момента установления контакта с целью до момента, когда выходные данные системы управления стрельбой могут быть использованы потребителем;  $t_{\text{пол}}$  — время полета снаряда на дальность  $D_0$ .

Из принципиальной схемы (рис. 3.4.1) следует, что фактическая дальность действия системы управления стрельбой определяется в первую очередь дальностью действия средства определения координат и параметров движения цели, являющегося единственным элементом системы, который должен иметь контакт с целью. Явный вид зависимости (3.4.2) для любой конкретной системы управления стрельбой может быть установлен при анализе ее свойств и особенностей обеспечиваемого ею комплекса.

Рассмотрим особенности определения показателя  $P_{\text{Ет}i}$ . Анализ характера использования неуправляемых снарядов показывает, что успешность решения задачи обеспечения необходимой точности доставки снаряда в район цели зависит не только от качества выполнения своих функций системой управления, но и от свойств других элементов комплекса. Точность доставки снаряда в район цели определяется следующими основными факторами:

1. Точностью решения задачи встречи снаряда с целью, которая может характеризоваться суммарными срединными ошибками определения дальности (или временем полета) до точки встречи и полных углов наведения пусковых установок в горизонтальной и вертикальной плоскостях —  $E_{\text{д}}$ ,  $E_{\text{пугн}}$  и  $E_{\text{пувн}}$  соответственно. Величина этих ошибок количественно характеризует точность работы системы управления стрельбой.

2. Точностью наведения пусковых установок, которая

может характеризоваться срединными ошибками наведения по дальности, азимуту и углу места —  $E_{дн}$ ,  $E_{ан}$  и  $E_{вн}$  соответственно.

Величина этих ошибок характеризует качество приводов наведения пусковых установок.

3. Величиной рассеивания, которое имеется у любого вида снарядов. Рассеивание может характеризоваться

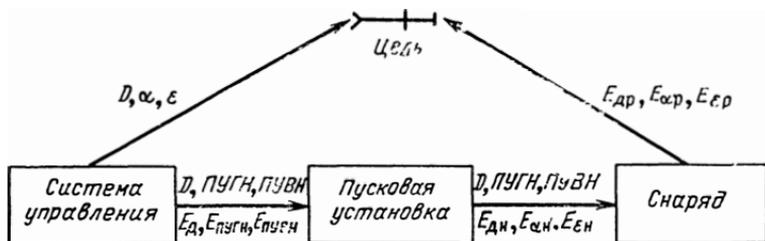


Рис. 3.4.2. Принципиальная схема доставки неуправляемого снаряда в район цели с необходимой точностью.

срединными значениями отклонений снарядов по дальности, азимуту и углу места  $E_{др}$ ,  $E_{ар}$  и  $E_{ер}$  соответственно.

Принципиальная схема обеспечения необходимой точности доставки неуправляемого снаряда в район цели показана на рис. 3.4.2.

Точность доставки может характеризоваться величиной суммарного отклонения снаряда от цели по каждой координате. Эти суммарные отклонения будут определяться точностью решения задачи встречи, точностью наведения пусковой установки, а также величиной рассеивания снарядов. Поскольку причины, вызывающие ошибки решения задачи встречи, наведения пусковых установок и рассеивание снарядов, обычно независимы друг от друга, то во многих случаях суммарные срединные отклонения снарядов от цели могут быть определены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 E_{дс} &= \sqrt{E_d^2 + E_{дн}^2 + E_{др}^2}, \\
 E_{ас} &= \sqrt{E_{пугн}^2 + E_{ан}^2 + E_{ар}^2}, \\
 E_{сс} &= \sqrt{E_{пуwn}^2 + E_{вн}^2 + E_{ер}^2}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.4}$$

Вероятность поражения цели является функцией характеристик суммарного отклонения снаряда ( $E_{дс}$ ,  $E_{ас}$  и  $E_{ес}$ ) и величины ее поражаемого пространства ( $r_{д}$ ,  $r_{а}$ ,  $r_{е}$ ), т. е.

$$P_{кi} = f(r_{д}, r_{а}, r_{е}, E_{дс}, E_{ас}, E_{ес}). \quad (3.4.5)$$

Явный вид зависимости (3.4.5) для различных видов снарядов и способов их использования определяется методами теории эффективности стрельбы [3, 16 и др.].

Если предположить, что система управления стрельбой вырабатывает исходные данные в течение установленного времени абсолютно точно ( $E_{д} = E_{пугн} = E_{пувн} = 0$ ), то вероятность поражения определенной цели для соответствующего типа снарядов будет максимальной и зависит только от точности наведения пусковой установки и рассеивания снарядов. Совершенно очевидно, что при  $E_{д} = E_{пугн} = E_{пувн} = 0$  показатель  $P_{Етi}$  системы управления стрельбой следует считать равным единице.

Для системы управления стрельбой, точность работы которой характеризуется конечными значениями  $E_{д}$ ,  $E_{пугн}$ ,  $E_{пувн}$ , показатель  $E_{Етi}$  определяется зависимостью:

$$P_{Етi} = \frac{P_{кi}(D, E_{д}, E_{пугн}, E_{пувн}, E_{дн}, E_{ан}, E_{ен}, E_{др})}{P_{кi}(D, E_{д}, E_{пугн}, E_{пувн}, E_{дн}, E_{ан}, E_{ен}, E_{др})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{E_{ар}, E_{ер})}{E_{ар}, E_{ер})} | E_{д} = E_{пугн} = E_{пувн} = 0 |$$

или

$$P_{Етi} = \frac{P_{кi}(D, E_{дс}, E_{ас})}{P_{кj}(D, E_{д}, E_{пугн}, E_{пувн}, E_{дн}, E_{ан}, E_{ен})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{E_{ес})}{E_{др}, E_{ар}, E_{ер})} | E_{д} = E_{пугн} = E_{пувн} = 0 | \quad (3.4.6)$$

Необходимо отметить, что определение показателя  $P_{Етi}$  в соответствии с выражением (3.4.6) является весьма трудоемким делом, поскольку в реальных условиях число факторов, влияющих на вероятность поражения цели, обычно бывает достаточно большим.

Во многих случаях для упрощения определения показателя  $P_{Етi}$  можно использовать следующий путь.

Поскольку в общем случае [16]

$$P_{ki} = G(r) P_{di}, \quad (3.4.7)$$

то в выражении (3.4.6) отношение показателей  $P_{ki}$  может быть заменено отношением более просто вычисляемых показателей  $P_{di}$ , тогда

$$P_{Eti} = \frac{P_{di}(D, E_{дс}, E_{ас}, E_{ес})}{P_{di}(D, E_{д}, E_{пугн}, E_{пувн}, E_{дн}, E_{ан}, E_{ен})} \rightarrow \frac{P_{дп}, E_{ап}, E_{сп}}{E_{д} = E_{пугн} = E_{пувн} = 0}, \quad (3.4.8)$$

где  $P_{di}$  — вероятность доставки снаряда в поражаемое пространство цели;  $G(r)$  — координатный закон поражения цели.

Рассмотрим в качестве примера способ определения показателя  $P_{Eti}$  системы управления стрельбой торпедного оружия, состоящей из РЛС обнаружения надводных целей и определения их координат, счетно-решающего устройства и приборов определения параметров движения (курса, скорости) и углов качки корабля-носителя торпедного оружия.

Счетно-решающее устройство этой системы управления по данным радиолокационной станции и приборов определения параметров движения носителя решает задачу встречи торпеды с целью или так называемый торпедный треугольник (рис. 3.4.3). Сущность этой задачи состоит в определении угла упреждения  $\varphi$ , при котором обеспечивается встреча торпеды и цели, имеющих скорости  $V_T$  и  $V_C$  соответственно.

Кроме того, задачей счетно-решающего устройства является и определение момента торпедного залпа с тем, чтобы при заданных параметрах движения цели и торпеды путь последней до встречи с целью был не больше ее возможностей или величины, определяемой какими-либо другими соображениями. Будем считать, что

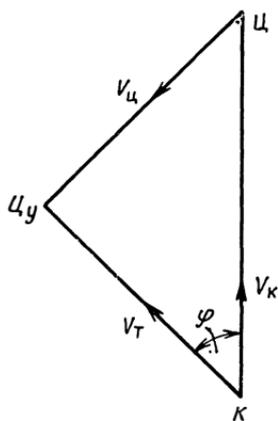


Рис. 3.4.3. К определению показателя  $P_{Eti}$ .

стрельба ведется в таких условиях, когда предельно возможная дальность движения торпеды больше дальности стрельбы ( $K, C_y$ ) и с большей вероятностью обеспечивается необходимая глубина хода торпеды. В этом случае вероятность попадания торпеды в цель определяется размерами последней и суммарной ошибкой наведения торпеды по азимуту.

Суммарная ошибка наведения торпеды по азимуту зависит от точности решения задачи встречи, точности наведения торпедных аппаратов и рассеивания торпед. Ошибки решения задачи встречи (определения угла упреждения  $\varphi$ ) имеют место из-за неточности работы средств определения параметров движения корабля, радиолокационной станции и счетно-решающего устройства. Предположим, что ошибка решения задачи встречи и наведения пусковой установки, а также рассеивание торпед являются независимыми друг от друга. При этом выражение для суммарного срединного отклонения торпеды по азимуту будет иметь следующий вид:

$$E_{\text{ас}} = \sqrt{E_{\text{пугн}}^2 + E_{\text{ан}}^2 + E_{\text{ар}}^2}.$$

Если при стрельбе прицеливание ведется по центру цели и систематические ошибки отсутствуют, то вероятность попадания торпеды в цель может быть определена с помощью следующего выражения:

$$P_{\text{ди}} = \hat{\Phi} \left( \frac{1000l}{2E_{\text{ас}}D_c} \right), \quad (3.4.9)$$

где  $\hat{\Phi}$  — приведенная функция Лапласа;  $l$  — проекция цели на линию, перпендикулярную направлению  $K, C_y$ ;  $D_c$  — дальность стрельбы.

Для расчета примем следующие исходные данные. Стрельба ведется по цели с  $l=200$  м, при этом прицеливание производится по центру цели. Дальность стрельбы  $D_c=10\,000$  м. Допустим, что рассеивание движения торпед по азимуту характеризуется  $E_{\text{ар}}=3$  т. д.,\* а срединная ошибка наведения пусковой установки по азимуту  $E_{\text{ан}}=2,2$  т. д. Средства определения параметров движения носителя, а также радиолокационная станция имеют такую периодичность и точность определения и

\*) т. д. — тысячные дистанции.

выдачи в счетно-решающее устройство необходимых данных, при которых и за счет неточности работы самого счетно-решающего устройства точность определения полного угла наведения торпедных аппаратов по азимуту будет характеризоваться срединной ошибкой  $E_{\text{пугн}} = 3 \text{ т. д.}$

Пользуясь полученными выражениями и принятыми исходными данными, найдем, что

$$P_{\text{дт}}(E_{\text{пугн}}, E_{\text{ан}}, E_{\text{ар}})_{E_{\text{пугн}}=0} = 0,9082,$$

$$P_{\text{дт}}(E_{\text{пугн}}, E_{\text{ан}}, E_{\text{ар}}) = 0,8227$$

и показатель  $P_{\text{Этi}} = 0,906$ .

Приведенный выше порядок определения показателя  $P_{\text{Этi}}$  получен при рассмотрении простейшего случая использования систем управления стрельбой, состоящего в обеспечении элементарной операции, связанной с обслуживанием одного потребителя по одиночной цели.

В реальных условиях как одноканальные, так и многоканальные системы управления могут принимать участие как в элементарных, так и в сложных операциях обеспечиваемых комплексов (обслуживание нескольких потребителей по группе, потоку целей и т. д.). При определении показателей эффективности систем управления стрельбой любая сложная операция может рассматриваться как совокупность элементарных.

Эффективность системы управления стрельбой при обеспечении сложной операции будет определяться:

— отношением числа выполняемых элементарных операций к их общему числу в сложной операции;

— успешностью решения системой задач в каждой выполняемой элементарной операции, т. е. значением показателя  $P_{\text{Этi}}$ .

Необходимо отметить, что успешность решения системой управления стрельбой стоящих задач в различных выполняемых элементарных операциях из состава сложной операции, в общем случае, может быть различной. Это положение объясняется следующими обстоятельствами.

Как известно, значение показателя  $P_{\text{Этi}}$  для любой элементарной операции системы управления стрельбой определяется двумя параметрами:

— соотношением фактической и необходимой дальностей действия системы управления;

— точностью решения системой управления задачи встречи.

Обычно в каждой системе управления устанавливается и выдерживается минимально необходимое время решения задачи встречи и выработки исходных данных для использования снаряда, что обеспечивает их одинаковую точность при обслуживании однотипных целей. При этом значение показателя  $P_{Eti}$  во многих случаях может считаться одинаковым для однотипных элементарных операций.

Показатель  $P_{Eyi}$  при обслуживании системой однотипных целей может изменяться только за счет изменения фактической или необходимой дальности действия системы управления стрельбой. Нетрудно видеть, что фактические и необходимые дальности действия одной и той же системы управления при обеспечении элементарных операций, являющихся составными частями сложных операций, могут иметь различные значения.

Наглядно это видно из следующего примера. Система управления стрельбой является одноканальной, а потребители в пространстве расположены так, что исходные данные для их использования по одной и той же цели имеют различное значение. При этом обслуживание каждого последующего потребителя может быть начато после того, как будет закончено обслуживание предыдущего. В этой связи интервалы времени от момента обнаружения цели до момента выработки исходных данных системой управления стрельбой для обеспечения различных потребителей будут отличаться друг от друга. Отмеченное обстоятельство при последовательном обслуживании одноканальной системой управления однотипных потребителей по одной цели ( $D = \text{const}$ ) будет причиной различных значений необходимой дальности  $D_{н}$ , а следовательно, и показателя  $P_{Eдi}$ .

Рассмотрим еще один пример. Пусть одноканальная система управления стрельбой имеет возможность обслуживать последовательно по времени несколько потребителей — каждого по соответствующей цели. Если эти цели подвижные и достигают зоны дальности действия системы управления в одно и то же время, то каждая из них будет обслуживаться по дальности, меньшей дальности действия по предыдущей цели на величину

$$\Delta D = V_{отн} t_{об},$$

где  $t_{об}$  — время обслуживания системой управления одной цели.

Определение возможности обеспечения системой управления стрельбой использования нескольких потребителей по нескольким одновременно действующим целям должно проводиться на основе сравнения соотношения продолжительности обслуживания одного потребителя и времени нахождения целей в зоне обстрела.

Если время обслуживания потребителя не меньше времени нахождения цели в зоне обстрела, то любая система управления стрельбой может обеспечить использование оружия против столько одновременно действующих целей, сколько каналов она имеет. Если же цели являются неподвижными или относительно тихходными (время нахождения их в зоне обстрела значительно больше времени обслуживания одной цели), то система управления будет иметь возможность обеспечить использование снарядов по целям, количество которых превышает число каналов системы.

### **Определение показателя $P_{Ei}$ систем управления стрельбой управляемых снарядов**

В настоящее время широкое распространение получили снаряды, траектории которых во время полета могут корректироваться. Эти снаряды обеспечивают высокую эффективность стрельбы, в том числе на большие дальности, а также по скоростным и малоразмерным целям. Для осуществления указанного метода стрельбы необходимо иметь возможность определять на траектории положение снаряда относительно цели, иначе — определять отклонение фактической траектории от расчетной, при которой должно обеспечиваться попадание снаряда в цель. Следовательно, для данного класса снарядов система управления стрельбой должна обеспечить сравнение расчетной и фактической траектории снаряда и корректировку последней по результатам этого сравнения.

Принципиальная схема системы управления стрельбой управляемых снарядов приведена на рис. 3.4.4. Из

рисунка следует, что система управления стрельбой управляемых снарядов состоит из элементов сравнения расчетной траектории с фактической и обеспечения корректировки последней, а также содержит в своем составе элементы, аналогичные по назначению элементам системы управления неуправляемых снарядов.

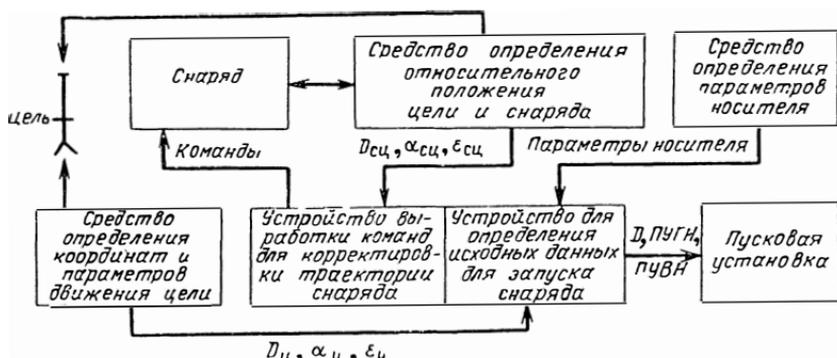


Рис. 3.4.4. Принципиальная схема системы управления стрельбой управляемых снарядов.

Необходимо отметить, что на рис. 3.4.4, как и на рис. 3.4.1, показаны только принципиально необходимые элементы системы управления стрельбой. Кроме них, в состав системы могут входить и другие устройства, предназначенные для обеспечения более качественного решения выполняемых системами задач. Примером таких устройств могут служить, например, приборы метеорологического и баллистического обеспечения стрельбы, данные которых используются счетно-решающим устройством для более точной выработки исходных данных для запуска снаряда. Наличие подобных дополнительных устройств не вносит принципиальных особенностей в порядок определения показателя  $P_{\text{Еу}}^i$ .

Поскольку назначение систем управления стрельбой любого вида состоит в обеспечении необходимой точности доставки снарядов в район цели, то для определения показателя  $P_{\text{Еу}}^i$  систем управления управляемых снарядов может быть использовано выражение (3.4.1). Это выражение может быть использовано для оценки эффективности систем управления стрельбой, участвующих в выполнении как элементарных, так и сложных

операций, состоящих в использовании нескольких снарядов против нескольких целей. В последнем случае сложная операция может рассматриваться как совокупность элементарных, каждая из которых состоит в использовании одного снаряда (группы снарядов) против одиночной цели. Эффективность системы управления при обеспечении сложной операции определяется как значением показателя  $P_{\text{Еу}i}$ , так и рядом других показателей, характеризующих пропускную способность системы.

Многие вопросы, связанные с определением показателя  $P_{\text{Еу}i}$  для систем управления стрельбой управляемых и неуправляемых снарядов, являются аналогичными. Поэтому при дальнейшем изложении будут рассмотрены только те особенности определения указанного показателя, которые вытекают из специфики систем управления стрельбой управляемых снарядов.

Составная часть  $P_{\text{Еу}i}$  — показатель  $P_{\text{Ед}i}$  характеризует успешность обеспечения системой управления необходимой дальности использования снаряда. Этот показатель для систем управления стрельбой как управляемых, так и неуправляемых на траектории снарядов определяется с помощью выражения (3.4.2).

Показатель  $P_{\text{Ет}i}$  характеризует успешность выполнения системой управления функций по обеспечению необходимой точности доставки снаряда в район цели. Поскольку параметры, через которые выражается успешность выполнения этой задачи, для неуправляемых и управляемых снарядов являются одинаковыми ( $P_{\text{К}i}$  или  $P_{\text{д}i}$ ), то для определения показателя  $P_{\text{Ет}i}$  систем управления стрельбой управляемых снарядов могут использоваться выражения (3.4.6) или (3.4.8). При определении значения этого показателя для систем управления стрельбой управляемых снарядов необходимо учитывать их особенности в части методов обеспечения необходимой точности доставки снаряда в район цели и распределения этих функций между их основными элементами.

В комплексах неуправляемых снарядов точность работы системы управления стрельбой (точность решения задачи встречи), наряду с точностью наведения пусковых установок и величиной рассеивания, непосредственно определяет точность доставки снарядов в поражаемое пространство цели.

В комплексах управляемых снарядов обеспечение необходимой точности доставки в район цели осуществляется последовательно в два этапа. В результате первого этапа снаряд выводится в такую область пространства (на такую траекторию), из которой он может быть доставлен в район цели с необходимой точностью. В результате второго этапа снаряд доставляется в район цели с необходимой точностью.

Показатели успешности выполнения системой управления своих функций при осуществлении указанных этапов обозначим соответственно через  $P'_{\text{Ет}i}$  и  $P''_{\text{Ет}i}$ . Показатель  $P'_{\text{Ет}i}$  представляет собой вероятность обеспечения системой управления вывода снаряда в такую область пространства (на такую траекторию), из которой он может быть доставлен в район цели с необходимой точностью. Показатель  $P''_{\text{Ет}i}$  представляет собой вероятность успешного решения задачи по обеспечению необходимой точности доставки снаряда в район цели при условии, что первый этап выполнен успешно.

Показатель потенциальной эффективности систем управления стрельбой управляемых снарядов в элементарной операции в большинстве случаев может быть определен с помощью следующего выражения:

$$P_{\text{Ет}i} = P_{\text{Ед}i} P'_{\text{Ет}i} P''_{\text{Ет}i} \quad (3.4.10)$$

В выполнении первого этапа участвует та часть системы управления, которая по характеру выполняемых функций аналогична системе управления стрельбой неу управляемых снарядов. Отличие их между собой состоит в том, что система управления стрельбой неу управляемых снарядов непосредственно обеспечивает необходимую точность доставки снаряда в район цели, а соответствующая часть системы управления стрельбой управляемых снарядов — вывод снаряда на траекторию, при которой второй частью системы обеспечивается вывод снаряда с необходимой точностью непосредственно в район цели. Совокупность траекторий снарядов, при которых обеспечивается успешное выполнение второго этапа наведения, будем называть зоной ввода в управление. Итак, в результате первого этапа снаряд должен быть доставлен в зону ввода в управление. Показатель  $P'_{\text{Ет}i}$  представляет собой вероятность успешного решения системой управления задачи по обеспечению доставки сна-

ряда в зону ввода в управление. Эта зона всегда связана с местом расположения цели в пространстве. Вид и размеры зоны определяются прежде всего дальностью действия аппаратуры той части системы управления, которая обеспечивает осуществление второго этапа наведения. Кроме того, размеры зоны зависят от параметров, характеризующих способность снаряда совершить маневр по выходу в район цели.

Вероятность обеспечения доставки управляемого снаряда в зону ввода в управление ( $P_B$ ) определяется соотношением величины этой зоны и совокупности ошибок, имеющих место при выполнении первого этапа наведения, иначе

$$P_B = f(D_c, S_z, E_{дс}, E_{ас}, E_{ес}), \quad (3.4.11)$$

где  $E_{дс}$ ,  $E_{ас}$ ,  $E_{ес}$  — срединные суммарные ошибки по дальности, азимуту, углу места, имеющие место при осуществлении первого этапа наведения снаряда;  $S_z$  — размеры зоны ввода снаряда в управление;  $D_c$  — дальность стрельбы.

Совокупность ошибок, имеющих место при выполнении первого этапа наведения, может быть разделена на две большие группы:

— связанные с работой системы управления. Срединные ошибки этой группы по дальности, азимуту, углу места обозначим соответственно через  $E_{ду}$ ,  $E_{ау}$ ,  $E_{еу}$ ;

— не связанные с работой системы управления (ошибки наведения пусковых установок, рассеивание снарядов и т. д.). Срединные ошибки этой группы по дальности, азимуту, углу места обозначим соответственно через  $E_{дд}$ ,  $E_{ад}$ ,  $E_{ед}$ .

Очевидно, что показатель  $P'_{Eti}$  системы управления будет равен единице в том случае, когда  $E_{ду} = E_{ау} = E_{еу} = 0$ . В общем же случае этот показатель будет определяться следующим выражением:

$$P'_{Eti} = \frac{P_B(S_z, D_c, E_{ду}, E_{ау}, E_{еу}, E_{дд}, E_{ад}, E_{ед})}{P_B(S_z, D_c, E_{ду}, E_{ау}, E_{еу}, E_{дд}, E_{ад}, E_{ед}) |_{E_{ду}=E_{ау}=E_{еу}=0}}. \quad (3.4.12)$$

В комплексах управляемых снарядов используются самые разнообразные методы наведения, которые обеспечиваются различной по принципу действия аппаратурой систем управления. Вид зависимости (3.4.11) определяется свойствами соответствующего комплекса, его элементов (в том числе системы управления) и может быть определен при их анализе.

В качестве примера рассмотрим порядок определения явного вида зависимости (3.4.11) для одного из возможных видов комплексов управляемых снарядов класса «корабль — корабль», принцип действия системы управления которого состоит в следующем.

По однократным данным средства определения координат цели и параметров движения носителя счетно-решающее устройство определяет направление и момент запуска снаряда, полет которого обеспечивается на заданной высоте. На борту снаряда имеется радиолокационная станция, которая включается сразу же после его запуска и ведет непрерывный поиск целей по азимуту в угле  $\pm\varphi$  относительно строительной оси снаряда. При попадании цели в зону обзора бортовой РЛС, последняя переводится в режим сопровождения, данные о цели при этом используются для наведения по ней снаряда. В данном случае часть системы управления, обеспечивающая осуществление первого этапа наведения снаряда, должна определять направление и момент запуска снаряда с такой точностью, чтобы цель могла попасть в зону обзора бортовой РЛС, а дальность до нее не превышала предельной дальности полета снаряда.

Успешность решения указанной задачи зависит от двух групп ошибок системы управления: ошибок в определении дальности до цели; ошибок в определении направления запуска снаряда.

Вследствие независимости указанных групп ошибок показатель

$$P_{\text{в}} = P_{\text{вд}} P_{\text{вз}}, \quad (3.4.13)$$

где  $P_{\text{вд}}$  — вероятность того, что дальность полета снаряда до цели будет не больше предельно возможной дальности его полета ( $D_{\text{п}}$ );

$P_{\text{вз}}$  — вероятность обеспечения попадания снаряда в зону ввода в управление по азимуту.

Для неподвижной цели показатель  $P_{вд}$  может быть определен из формулы

$$P_{вд} = P(D_{ц} \leq D_{п}), \quad (3.4.14)$$

где  $D_{ц}$  — фактическая дальность до цели.

Фактическая дальность до цели

$$D_{ц} = \bar{D}_{ц} \pm \Delta D,$$

где  $\bar{D}_{ц}$  — измеренная дальность до цели;  $\Delta D$  — случайная величина, представляющая собой ошибку измерения дальности.

Для определения показателя  $P_{вд}$  кроме значений  $\bar{D}_{ц}$  и  $D_{п}$  необходимо также знать закон распределения ошибки измерения дальности и его параметры.

Во многих случаях ошибки измерения дальности до цели распределены по нормальному закону. При этом показатель  $P_{вд}$  можно определить с помощью следующего выражения:

$$P_{вд} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \hat{\Phi} \left( \frac{D_{п} - \bar{D}_{ц}}{E_{\kappa}} \right) \right]. \quad (3.4.15)$$

В реальных условиях всегда можно выбрать такое значение  $(D_{п} - \bar{D}_{ц})$ , чтобы показатель  $P_{вд}$  был близок к единице. Оно будет иметь место при

$$\bar{D}_{ц} \leq D_{п} - 4E_{\kappa}.$$

В случае использования снарядов по подвижным целям при определении показателя  $P_{вд}$  необходимо учитывать изменение расстояния до них за время полета снаряда.

Для определения показателя  $P_{вд}$  рассмотрим рис. 3.4.5, на котором: точка  $K$  — место корабля-носителя управляемого снаряда в момент его запуска; точка  $C$  — фактическое место цели в этот же момент времени;  $K, O$  — фактическое направление запуска снаряда;  $2\varphi$  — угол обзора бортовой РЛС в режиме поиска;  $D_{к}$  — дальность обнаружения корабля бортовой РЛС и перехода ее в режим сопровождения.

Очевидно, что значение угла  $\gamma$  (между направлением носитель — цель и направлением запуска снаряда) будет определяться как точностью работы системы управления при осуществлении первого этапа наведения, так и другими причинами, не связанными с работой систе-

мы управления (точностью наведения пусковых установок, точностью удержания корабля на заданном курсе и т. д.).

Зоной ввода в управление в данном случае будет такая совокупность траекторий, при которой цель будет попадать в зону обзора бортовой РЛС (при условии,

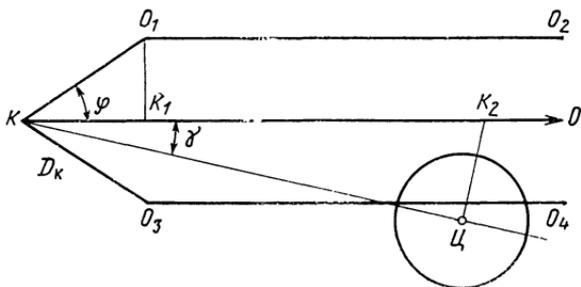


Рис. 3.4.5. Схема для определения показателя  $P_{вх}$  системы управления одним из классов управляемых снарядов.

что снаряд может совершить маневр по выходу к обнаруженной цели). При этом показатель  $P_{вх}$  будет представлять собой вероятность того, что цель окажется в полосе обзора бортовой РЛС, т. е. в полосе, ограниченной линиями  $O_1, O_2$  и  $O_3, O_4$ . Значение этой вероятности при заданных параметрах системы управления ( $\varphi, D_k$ ) и дальности стрельбы ( $K, l$ ) будет зависеть только от величины угла  $\gamma$ . В каждом конкретном случае угол  $\gamma$  является случайной величиной. Поэтому для определения показателя  $P_{вх}$  необходимо знать закон и параметры распределения случайной величины — угла  $\gamma$ . Если на образование угла  $\gamma$  влияет достаточно много факторов, то можно принять, что его распределение подчиняется нормальному закону, а среднее значение равно нулю, т. е. среднее направление запуска снарядов совпадает с направлением на цель.

Примем вначале, что цель неподвижна. Из рис. 3. 4. 5 следует, что линейное отклонение цели от линии полета снаряда

$$K_2, l = K, l \sin \gamma = D_c \sin \gamma,$$

и ширина полосы зоны поиска бортовой РЛС

$$2l = 2O_1, K_1 = 2D_k \sin \varphi.$$

Как уже отмечалось, для данного случая показатель  $P_{вз}$  есть вероятность того, что цель будет находиться в зоне поиска бортовой РЛС, иначе

$$P_{вз} = P(D_k \sin \varphi \geq D_c \sin \gamma). \quad (3.4.16)$$

Величину  $P_{вз}$  при нормальном законе распределения угла  $\gamma$  можно определить с помощью следующей формулы:

$$P_{вз} = \hat{\Phi}\left(\frac{D_k \sin \varphi}{D_c \sin \gamma_c}\right), \quad (3.4.17)$$

где  $\gamma_c$  — суммарное срединное отклонение траекторин снаряда от направления на цель.

Тогда для данного типа системы управления стрельбой (при условии, что  $P_{вд} = 1$ ) показатель  $P'_{Этi}$  может быть определен как

$$P'_{Этi} = \frac{P_{вз}}{P_{в\alpha_0}},$$

где  $P_{в\alpha_0}$  — вероятность обеспечения попадания цели в зону управления стрельбой по азимуту при осуществлении обзора бортовой РЛС при условии что ошибки системы первого этапа отсутствуют. С учетом (3.4.17) показатель  $P'_{Этi}$  будет определяться следующим выражением:

$$P'_{Этi} = \frac{\hat{\Phi}\left(\frac{D_k \sin \varphi}{D_c \sin \gamma_c}\right)}{\hat{\Phi}\left(\frac{D_k \sin \varphi}{D_c \sin \gamma_c}\right) |_{E_{\alpha y}=0}}. \quad (3.4.18)$$

Рассмотрим особенности определения показателя  $P'_{Этi}$  при работе анализируемого комплекса по подвижной цели. При этом необходимо учитывать принятый метод стрельбы. Пусть в комплексе применяется метод стрельбы в действительное место цели. Это значит, что исходные данные для запуска определяются таким образом, чтобы направить снаряд в точку, в которой находится цель в момент его запуска.

В общем случае за время полета снаряда цель может двигаться любым курсом со скоростью  $V_{ц}$ . Пройденный целью путь за это время будет равен  $V_{ц}t_{пол}$ . Через время  $t_{пол}$  после старта снаряда район возможного положения цели будет представлять окружность

с центром в точке  $\dot{Ц}$  и радиусом  $V_{ц}t_{пол}$  (рис. 3.4.6). Из рис. 3.4.6 следует, что при движении цели любым курсом  $Ц, Б$  за время  $t_{пол}$  произойдет изменение дальности на величину  $Ц, Ц_1 = V_{ц}t_{пол} \cos q$  и перемещение ее от линии  $К, Ц$  на величину  $Б, Ц_1 = V_{ц}t_{пол} \sin q$ .

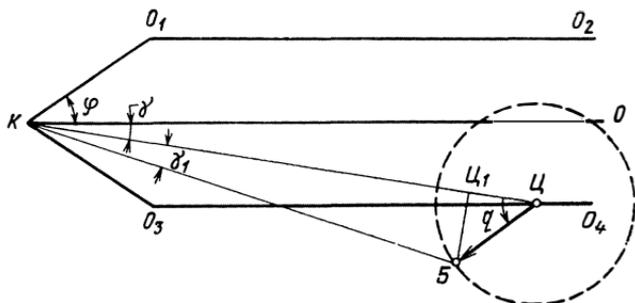


Рис. 3.4.6. Схема для определения показателя  $P_{вх}$  системы управления одним из классов управляемых снарядов при работе по подвижной цели.

Показатель  $P_{вд}$  при нормальном законе распределения ошибок измерения дальности до цели может быть определен с помощью следующего выражения:

$$P_{вд} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \widehat{\Phi} \left( \frac{D_{п} - \bar{D}_{ц} - V_{ц}t_{пол} \cos q}{E_x} \right) \right].$$

Дальность полета снаряда до цели будет меньше его технических возможностей, если

$$\bar{D}_{ц} + \Delta D \leq D_{п} \pm V_{ц}t_{пол} \cos q.$$

В этом случае показатель  $P_{вд}$  будет равен единице и значение показателя  $P_{в}$  будет зависеть только от величины  $P_{вх}$ .

Как уже указывалось, движение цели за время полета снаряда приведет к смещению середины полосы обзора бортовой РЛС относительно действительного места цели, иначе, к смещению линии  $К, Ц$  относительно направления  $К, О$  на величину  $Б, Ц_1 = V_{ц}t_{пол} \sin q$ . В этой связи при определении показателя  $P_{вх}$  в выражение (3.4.17) должна быть введена поправка, учитывающая перемещение цели за время полета снаряда.

Для метода стрельбы в действительное место цели вероятность обеспечения попадания снаряда в зону ввода в управление с учетом изложенного, будет определяться следующим выражением:

$$P_{вз} = \frac{1}{2} \left[ \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi + V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right) + \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi - V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right) \right]. \quad (3.4.19)$$

Показатель  $P'_{Этi}$  в этом случае (при условии, что  $P_{вд}=1$ ) может быть определен как

$$P'_{Этi} = \frac{\widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi + V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right) + \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi - V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right)}{\widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi + V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right) + \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi - V_{цтпол} \sin q}{D_c \sin \gamma_c} \right) |_{E_{\alpha y}=0}}. \quad (3.4.20)$$

Пользуясь приведенными выше выражениями, значение показателей  $P_{вд}$ ,  $P_{вз}$  и  $P'_{Этi}$  можно определить для каждого возможного значения угла  $q$ . В ряде случаев возникает необходимость оценить максимально возможное влияние движения цели на успешность первого этапа наведения снаряда, в том числе определить минимальное значение показателя  $P_{вз}$  для реальных условий использования комплекса.

Из рис. 3. 4, 6 видно, что это будет иметь место, когда угол  $q=90^\circ$ . В этом случае показатель

$$P_{вз} = \frac{1}{2} \left[ \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi + V_{цтпол}}{D_c \sin \gamma_c} \right) + \widehat{\Phi} \left( \frac{D_k \sin \varphi - V_{цтпол}}{D_c \sin \gamma_c} \right) \right]. \quad (3.4.21)$$

Укажем на некоторые особенности определения показателя  $P''_{Этi}$ , характеризующего успешность выполнения задач по обеспечению второго этапа наведения управляемого снаряда на цель. Для обеспечения второго этапа может использоваться различная аппаратура системы управления. В ряде случаев это может быть специальная аппаратура, не участвующая в обеспечении первого этапа.

В ряде случаев для обеспечения второго этапа наведения снаряда на цель могут привлекаться элементы системы управления, принимавшие участие в осуществлении первого этапа. Примером может служить система управления комплекса зенитных ракет с командным методом наведения ракеты на цель. В таком комплексе первый этап заканчивается выводом ракеты в район, где она должна быть захвачена РЛС сопровождения ракеты. В этом случае в осуществлении второго этапа наведения снаряда участвует как специальная аппаратура (РЛС сопровождения ракеты, аппаратура выработки и передачи команд на борт ракеты, бортовая аппаратура управления и т. д.), так и аппаратура системы управления, принимавшая участие в обеспечении первого этапа (РЛС сопровождения цели).

Как известно, задача второго этапа наведения состоит в непосредственном обеспечении необходимой точности доставки снаряда в район цели. В начале данного параграфа было показано, что показатель, характеризующий успешность выполнения системой управления задачи по обеспечению необходимой точности доставки снаряда в район цели, в общем случае может быть определен из выражения

$$P_{\text{Эт}i} = \frac{P_{\text{д}i}(D, E_{\text{д}y}, E_{\alpha y}, E_{\epsilon y}, E_{\text{д}x}, E_{\alpha x}, E_{\epsilon x})}{P_{\text{д}i}(D, E_{\text{д}y}, E_{\alpha y}, E_{\epsilon y}, E_{\text{д}x}, E_{\alpha x}, E_{\epsilon x})|_{E_{\text{д}y}=E_{\alpha y}=E_{\epsilon y}=0}},$$

где  $E_{\text{д}y}$ ,  $E_{\alpha y}$ ,  $E_{\epsilon y}$  — ошибки в наведении снаряда, связанные с работой системы управления;  $E_{\text{д}x}$ ,  $E_{\alpha x}$ ,  $E_{\epsilon x}$  — ошибки в наведении снаряда, не связанные с работой системы управления.

Поскольку для управляемых на траектории снарядов успешность второго этапа наведения зависит только от качества работы системы управления, то для определенной цели показатель

$$P''_{\text{Эт}i} = P_{\text{д}i}(E_{\text{д}y}, E_{\alpha y}, E_{\epsilon y}). \quad (3.4.22)$$

Для нахождения показателя  $P_{\text{д}i}$  в соответствии с (3.4.22) необходимо знать размеры поражаемого пространства цели, а также область возможных траекторий снаряда и закон их распределения в этой области.

Поражаемое пространство цели определяется свойствами цели (размерами и живучестью), а также разрушительными свойствами снаряда.

Определение показателя  $P_{дi}$  при известных размерах поражаемого пространства цели сводится к определению распределения фактических траекторий снаряда относительно цели в зависимости от выходных параметров системы управления. Важнейшими из указанных параметров являются ошибки наведения, которые обычно делятся на две группы:

— динамические, определяемые тем обстоятельством, что как снаряд, так и любые элементы системы управления обладают инерционностью и в этой связи неточно и немгновенно выполняют выработанные команды управления;

— флюктуационные, обусловленные наличием помех в каналах информации о движении цели и снаряда.

Динамическая и флюктуационная ошибки образуют суммарную ошибку наведения снаряда на цель. Для определенных условий динамическая ошибка имеет характер постоянной составляющей суммарной ошибки наведения. Знак динамической ошибки определяется видом кинематической траектории снаряда. Характерной особенностью флюктуационной ошибки является случайное значение (по направлению и величине) в любой момент времени как самой ошибки, так и вызываемого ею отклонения снаряда.

В заключение отметим, что определение значения показателя  $P_{дi}$  для управляемых снарядов является весьма сложным и трудоемким процессом. Все аспекты данного вопроса применительно к различным методам наведения снарядов достаточно подробно освещены в специальной литературе, например в работах А. Н. Шукина [18], Л. С. Гуткина [5], В. Н. Типугина и В. А. Вейцеля [13], Ю. В. Чуева [16] и ряда других авторов.

## ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ИХ РЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ

### 4.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ИХ РЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ

Анализ особенностей использования радиоэлектронных средств показывает, что для большинства из них высокая потенциальная эффективность является необходимым, но недостаточным условием успешного выполнения стоящих задач. в соответствующих операциях, осуществляемых даже в простых условиях. Данное положение объясняется тем, что решение многих задач, стоящих перед радиоэлектронными средствами, жестко привязано к оси времени. Это значит, что решение таких задач должно начинаться в определенный момент времени и продолжаться не больше необходимого срока.

Для успешного выполнения этих задач необходимо, чтобы соответствующие средства:

— были готовы к использованию по назначению в необходимый момент времени;

— безотказно функционировали в течение всего необходимого времени использования по назначению, иначе, чтобы в течение этого времени их характеристики находились в допустимых пределах.

Высокая готовность и безотказность функционирования радиоэлектронных средств зависят от многих факторов, которые в общем случае могут быть разделены на две группы:

— не зависящие от свойств средств (организация использования, квалификация обслуживающего персонала и т. д.);

— зависящие от тех свойств средств, которые определяют их необходимую готовность к использованию, безотказность при выполнении своих функций, а для многих из них — и возможность быстрого восстановления работоспособности в случае возникновения отказа.

Совокупность указанных свойств определяет уровень надежности средств.

Обеспечение необходимой надежности является одной из основных проблем при проектировании и организации использования любых средств. Особое значение эта проблема имеет для средств военной техники в современных условиях, характерных большой разрушительной мощностью оружия, высокими скоростями и темпами ведения боевых действий. Несвоевременное приведение средств в состояние готовности к использованию, а также отказ их при выполнении боевых задач в указанных условиях могут привести к самым тяжелым последствиям.

Отмеченные положения целиком и полностью относятся и к радиоэлектронным средствам.

Во многих случаях при проектировании организации использования этих средств возникает необходимость оценить их эффективность с учетом реальной надежности. Ниже приведены основные исходные положения, которые необходимо учитывать при решении указанной задачи.

В любой момент периода эксплуатации каждое радиоэлектронное средство находится в одном из двух режимов — функционирования или хранения. В режиме функционирования средство находится при использовании по назначению или при проверке исправности. В процессе функционирования средство расходует свой технический ресурс, который представляет собой суммарное время, в течение которого оно может использоваться по назначению. Технический ресурс ( $T_p$ ) любого средства может быть определен на основании теоретических расчетов или опыта эксплуатации в соответствующих условиях. В режиме хранения средство может находиться на складе, при транспортировке, между циклами использования по назначению и т. д. Во время хранения средство подвергается воздействию внешних условий (температуры, влажности и т. д.), в результате чего происходит его износ и старение.

Для каждого вида радиоэлектронных средств на основании теоретических расчетов или опыта эксплуатации может быть определена величина суммарного времени хранения  $T_{\text{хр}}$ , в течение которого они в определенных условиях сохраняют свои свойства и могут быть использованы по назначению. Значения показателей  $T_p$  и  $T_{\text{хр}}$  средства в целом зависят от технического ресурса и времени хранения комплектующих элементов, а также от особенностей построения и условий использования, определяющих возможность замены элементов, вышедших из строя.

Если по условиям использования или из-за особенностей конструкции замена элементов исключается, то значения показателей  $T_p$  и  $T_{\text{хр}}$  средства в целом определяются величиной технического ресурса и временем хранения его наименее надежных комплектующих элементов.

Для большинства средств имеется возможность замены элементов, отказавших в режиме хранения, а для многих из них — и возможность замены элементов, отказавших при использовании по назначению. Последний случай имеет место, если средство при использовании по назначению обслуживается. Замена элементов, вышедших из строя при хранении, осуществляется, как правило, по результатам проверки исправности средства, производимой периодически или перед использованием его по назначению. Технический ресурс и время хранения радиоэлектронных средств, в которых имеется возможность замены элементов, определяются их конструктивными особенностями и долговечностью узлов и агрегатов, не подлежащих замене.

Каждое радиоэлектронное средство в любой момент периода эксплуатации находится в исправном или неисправном состоянии. Исправным принято считать такое состояние, при котором основные характеристики средства находятся (для режима функционирования) или будут находиться в допустимых пределах после его перевода в режим функционирования (для режима хранения). В противном случае средство считается неисправным. Неисправностью называется [19] состояние средства, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации.

Основными причинами неисправностей радиоэлектронных средств являются их схемно-конструктивные и производственные недостатки, а также отказы комплектующих элементов. Необходимо отметить, что отказы блоков, схем и комплектующих элементов могут по-разному влиять на исправность средств в целом. По этому признаку радиоэлектронные средства можно разделить на простые и сложные.

К простым относятся средства, отказ любого блока, схемы или элемента которых приводит к полной потере работоспособности средства в целом. Для простых средств характерны только два состояния — полностью исправное или полностью неисправное.

К сложным относятся средства, у которых отказ блока, схемы или элемента может и не привести к полной потере их работоспособности. Для сложных средств, наряду с крайними состояниями (полностью исправное или полностью неисправное), характерны и промежуточные, при которых средство может выполнять свои функции, но при этом успешность решения стоящих задач будет ниже уровня, который имеет место у полностью исправного средства.

Итак, вследствие отказов комплектующих элементов и схемно-конструктивных недостатков, в радиоэлектронных средствах как при использовании по назначению, так и в режиме хранения могут возникать неисправности и отказы различного характера.

Для определения путей оценки влияния неисправностей и отказов, возникающих при хранении и использовании радиоэлектронных средств, на эффективность последних проанализируем процесс подготовки и использования средства в соответствующей операции.

Пусть в момент времени  $t_1$  исправное средство переводится в режим хранения, в котором находится до момента  $t_2$ . В момент  $t_2$  средство начинает приводиться в состояние готовности для использования по назначению. Можно показать, что если продолжительность хранения  $(t_1, t_2) = t_{xp} > 0$ , то будет иметься некоторая вероятность того, что в средстве за это время возникнет одна или несколько неисправностей. Иначе, если  $t_{xp} > 0$ , то будет иметь место некоторая вероятность, что к моменту включения для использования по назначению средство будет находиться в неисправном состоянии. По-

скольку в рассматриваемом случае  $t_{xp} > 0$ , то в момент  $t_2$  средство будет находиться в одном из двух состояний:

— средство полностью или частично неисправно. Вероятность этого состояния зависит от интенсивности возникновения неисправностей при хранении, а также от величины  $t_{xp}$ ;

— средство полностью исправно. Это состояние будет иметь место, если в средстве за время  $t_{xp}$  не возникает ни одной неисправности.

Характер использования средства после хранения будет определяться в первую очередь его состоянием в момент  $t_2$ . Если в момент  $t_2$  средство окажется в исправном состоянии, то оно сразу же после включения может использоваться по назначению. Если в средстве во время хранения возникли неисправности, то возможность использования его по назначению будет определяться в первую очередь характером этих неисправностей.

Если в результате возникших во время хранения неисправностей радиоэлектронное средство окажется неспособным выполнять свои функции, то решение стоящих перед ним задач может быть обеспечено путем:

- привлечения резервного средства;
- восстановления работоспособности отказавшего средства путем проведения его ремонта.

Нетрудно видеть, что неисправности, возникающие во время хранения, в любом случае приводят к снижению эффективности радиоэлектронных средств. Так, применение не полностью исправного средства обычно приводит к снижению успешности решения стоящих задач в соответствующей операции, иначе, к снижению показателя  $P_{pi}$ .

Если для обеспечения соответствующей операции вместо отказавшего привлекается резервное средство того же назначения, то в соответствии с выражением (1.1.2) их эффективность будет снижаться за счет увеличения показателя стоимости. Необходимо также заметить, что во многих случаях данный способ обеспечения решения стоящих задач не может быть реализован.

Восстановление исправного состояния средства требует затраты определенного времени. Оно складывается из времени на отыскание причин неисправностей и вре-

мени на их устранение. Обозначим через  $\bar{t}_{от}$  — среднее время отыскания одной неисправности, а через  $\bar{t}_{уст}$  — среднее время устранения обнаруженной неисправности. Тогда среднее время приведения средства в исправное состояние при условии, что в нем имелась только одна неисправность,

$$\bar{t}_в = \bar{t}_{от} + \bar{t}_{уст}. \quad (4.1.1)$$

В общем случае за время хранения ( $t_{хр}$ ) может возникнуть не одна, а  $N_{oi}$  независимых неисправностей, каждая из которых в отдельности может быть причиной неработоспособного состояния средства. При этом общее среднее время восстановления после хранения

$$\bar{t}_{в хр} = N_{oi} (\bar{t}_{от} + \bar{t}_{уст}). \quad (4.1.2)$$

Средство, в котором при хранении возникли неисправности, требующие его ремонта, может приступить к выполнению своих функций только через время ( $t_{вкл} + t_{в хр}$ ) после получения соответствующего распоряжения, где  $t_{вкл}$  — время перевода исправного средства из режима хранения в рабочее состояние. Необходимость устранения неисправностей, возникших при хранении, в тех случаях, когда начало подлежащей решению средством задачи в соответствующей операции жестко привязано к оси времени (например, при отражении налетов самолетов противника), может привести к полному или частичному невыполнению указанной задачи.

В тех случаях, когда начало использования радиоэлектронного средства жестко не привязано к оси времени, необходимость устранения неисправностей, возникших при хранении, может привести лишь к допустимому по условиям использования переносу срока выполнения поставленной задачи.

Приведенные соображения показывают, что степень влияния неисправностей, возникающих при хранении, на эффективность радиоэлектронных средств зависит не только от числа неисправностей и времени восстановления, но и от характера выполняемых средствами задач. В тех случаях, когда вероятность исправного состояния средства после хранения может иметь недопустимо малое значение, целесообразно принимать специальные меры по его повышению. Этого можно достиг-

нуть за счет сокращения времени  $t_{xp}$  путем проведения профилактических проверок исправности средства.

Если профилактические проверки проводятся периодически, то  $0 \leq t_{xp} \leq T_{п}$ , где  $T_{п}$  — период профилактики. Для любого средства можно выбрать такое значение времени  $T_{п}$ , при котором будет обеспечена сравнительно высокая вероятность исправленного состояния в момент приведения его в состояние готовности для использования по назначению. Необходимо иметь в виду, что проведение профилактических проверок приводит к ухудшению некоторых показателей, определяющих эффективность средств. Это связано с тем, что проведение проверок требует привлечения специалистов и использования необходимой контрольно-измерительной аппаратуры, что приводит к увеличению стоимости эксплуатации средств, а их технический ресурс при этом расходуется не по назначению. Кроме того, средство в период прохождения проверки, как правило, не может использоваться по назначению, что требует в ряде случаев иметь резервные средства.

Таким образом, проведение профилактических проверок, с одной стороны, способствует повышению готовности средств к использованию по назначению, а с другой — ведет к увеличению стоимости эксплуатации и уменьшению их технического ресурса, используемого по назначению, а следовательно, и к снижению полного результата применения средств, поскольку в общем случае показатель

$$W = k K_{и} T_{р} Z, \quad (4.1.3)$$

где  $K_{и}$  — коэффициент использования средства по назначению;  $T_{р}$  — технический ресурс средства;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Для любого средства можно определить такую периодичность проведения профилактических проверок, при которой будет обеспечиваться его наибольшая эффективность.

Для многих видов радиоэлектронных средств обеспечение высокой готовности к использованию в необходимый момент времени имеет чрезвычайно важное значение. Однако выполнение этого требования еще не дает полной гарантии, что стоящие перед средствами задачи бу-

дут успешно выполняться. Это связано с тем, что неисправности могут возникать не только во время хранения, но и при использовании средств по назначению. Любое радиоэлектронное средство стоящую задачу в соответствующей операции должно выполнить в определенное время ( $t_{брн}$ ), в течение которого оно должно нормально функционировать, т. е. находиться в исправном состоянии и сохранять необходимые значения своих параметров. Можно показать, что для любого средства существует некоторая вероятность того, что в течение времени  $t_{брн}$  в нем могут возникнуть одна или несколько неисправностей. Таким образом, при использовании средства по назначению в соответствующей операции будет иметь место одно из двух противоположных событий:

— в течение  $t_{брн}$  не возникнет ни одной неисправности;

— в течение  $t_{брн}$  возникнет одна или несколько неисправностей.

Неисправности, возникшие при использовании средства, могут по-разному влиять на успешность решения стоящих задач в соответствующей операции. Степень этого влияния зависит от момента возникновения неисправности в интервале  $t_{брн}$ , ее характера и особенностей выполняемой средством задачи. Если возникшая неисправность приводит к частичному отказу средства, то выполнение стоящей задачи в некоторых случаях может продолжаться и после ее появления. Однако при этом успешность выполнения задачи может быть ниже, чем при осуществлении ее исправным средством. В ряде случаев выполнение стоящих задач при полном или частичном отказе средства может быть передано другому средству. Для этого необходимо иметь не меньше двух средств одного назначения. При этом их эффективность в соответствии с (1.1.2) будет уменьшаться за счет увеличения показателя стоимости. Необходимо также отметить, что данный способ по целому ряду причин не всегда может быть реализован.

Если средство при использовании по назначению не обслуживается личным составом, то полный отказ его приводит, как правило, к полному невыполнению стоящей задачи. Так, выход из строя приемного устройства радиолокационной головки самонаведения ракетного снаряда, находящегося в полете и наводящегося на цель,

может быть причиной потери управления и, как следствие этого, промаха снаряда.

Если средство при использовании по назначению обслуживается, то при возникновении отказа (полного или частичного) могут быть приняты меры для приведения средства в исправное состояние. Восстановление работоспособности отказавшего средства связано с отысканием и устранением неисправностей, т. е. с затратой определенного времени. Средство в данном случае может продолжить выполнение своих функций только через промежуток времени, равный времени восстановления. Совершенно естественно, что указанное обстоятельство не может не оказать влияния на результат выполнения решаемой средством задачи, т. е. на значение показателя  $P_{pi}$ .

Итак, любое радиоэлектронное средство в процессе эксплуатации в каждый момент времени может находиться в одном из двух режимов — хранения или функционирования. В средствах, находящихся как в том, так и в другом режиме, могут возникать неисправности, вызывающие их полную или частичную непригодность к выполнению своих функций. Недостаточная надежность радиоэлектронных средств может влиять на их эффективность по следующим основным направлениям:

— неисправности, возникающие при хранении, могут привести к тому, что средство не может начать решение стоящих задач в необходимый момент времени. Во многих случаях указанное обстоятельство приводит к невыполнению стоящих задач или к снижению результатов использования средства в соответствующей операции;

— отказы, возникающие в процессе применения средств по назначению, могут привести к полному невыполнению стоящих задач или к снижению результатов использования средств в соответствующих операциях;

— недостаточная надежность вынуждает проводить профилактические проверки, ремонтные работы и другие мероприятия, во время которых расходуется технический ресурс средств;

— недостаточная надежность вынуждает осуществлять комплекс мероприятий, направленных на поддержание необходимой готовности средств и обеспечение быстрого нахождения и устранения возникающих неис-

правностей, что требует наличие квалифицированного персонала, соответствующей контрольной аппаратуры и запасных элементов.

Итак, недостаточная надежность и необходимость проведения вследствие этого специальных мероприятий по обеспечению требуемой готовности и безотказного функционирования радиоэлектронных средств, приводят к:

- снижению показателя  $P_{pi}$ ;
- уменьшению продолжительности использования средств по назначению, т. е. к уменьшению показателя  $K_p(T_c)$ ;
- увеличению показателя  $C_p$ .

Нетрудно видеть, что все указанные последствия ведут к снижению эффективности средств. Степень этого снижения зависит от организации использования, характера выполняемых функций и уровня надежности средств.

#### 4.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Совокупность технических характеристик полностью описывает все свойства любого радиоэлектронного средства в заданных условиях. Часть из них характеризует способность средства сохранять свои свойства при использовании по назначению и при хранении, т. е. его надежность. Основы надежности любого средства закладываются при его проектировании путем выбора определенных схемных и конструктивных решений, вида комплектующих изделий и т. д.

Уровень надежности радиоэлектронных средств описывается с помощью специальных характеристик, называемых показателями надежности. Любой показатель надежности может быть определен из выражения

$$A_{nj} = A_{nj}(\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \dots, \beta_{n_1}, \beta_{n_2}, \dots, x_{n_1}, x_{n_2}), \quad (4.2.1)$$

где  $\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \dots$  — комплекс технических характеристик средства, влияющих на значение  $A_{nj}$  показателя надежности;  $\beta_{n_1}, \beta_{n_2}, \dots, x_{n_1}, x_{n_2}$  — комплекс условий использования средства, влияющих на значение показателя  $A_{nj}$ .

В настоящее время разработана достаточно стройная система показателей для количественной оценки надежности различного вида радиоэлектронных средств, а также методы определения их значений.

Ниже приведены основные виды показателей, которые используются для оценки надежности невосстанавливаемых средств. К этой категории относятся средства, которые в процессе эксплуатации не подвергаются ремонту и замене.

Одним из важнейших показателей надежности невосстанавливаемых средств в процессе функционирования является вероятность безотказной работы за промежуток времени  $t$ . Этот показатель обозначается через  $P(t)$  и определяется как отношение числа однотипных невосстанавливаемых средств, продолжающих безотказно выполнять свои функции после времени  $t$ , к общему числу средств ( $N_c$ ), т. е.

$$P(t) = \frac{N_c - n(t)}{N_c} = 1 - \frac{n(t)}{N_c},$$

где  $n(t)$  — число средств, отказавших за промежуток времени  $t$ .

Обратная характеристика  $[q(t)]$  есть вероятность того, что в течение промежутка времени  $t$  средство откажет.

Очевидно, что

$$q(t) = 1 - P(t). \quad (4.2.2)$$

Если функцию  $q(t)$  продифференцировать, то можно получить плотность распределения времени  $T$  безотказной работы соответствующего средства. Дифференциальный закон распределения времени безотказной работы используется в качестве показателя надежности невосстанавливаемых средств в двух формах:

а) как безусловная плотность распределения, имеющая смысл частоты отказов;

б) как «относительная» плотность распределения, имеющая смысл интенсивности отказов.

Частота отказов представляет собой скорость падения надежности невосстанавливаемых средств и определяется как

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

Статистическое значение частоты отказов представляет собой отношение числа  $\Delta n$  однотипных невосстанавливаемых средств, отказавших в единицу времени, к их первоначальному числу ( $N_c$ ), т. е.

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n}{N_c \Delta t}.$$

Интенсивность отказов определяется соотношением:

$$\lambda(t) = \frac{\hat{f}(t)}{P(t)}.$$

Статистическое значение интенсивности отказов представляет собой отношение числа  $\Delta n(t)$  отказавших в единицу времени невосстанавливаемых средств к числу  $N_n(t)$  средств, которые остались исправными к рассматриваемому моменту времени, т. е.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_n(t) \Delta t}, \quad \text{где } N_n = N_c - \Delta n(t).$$

Количественные значения как частоты, так и интенсивности отказов могут быть определены путем обработки результатов испытаний или эксплуатации в соответствующих условиях большого числа однотипных и однородных средств.

Показатели  $P(t)$  и  $\lambda(t)$  для любых средств, в том числе и невосстанавливаемых, связаны между собой следующей зависимостью:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Когда поток отказов является простейшим [ $\lambda(t) = \text{const}$ ], то

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4.2.3)$$

Зависимость (4. 2. 3) носит название экспоненциального закона надежности.

Одним из распространенных и удобных для использования показателей надежности невосстанавливаемых средств является среднее время  $T_0$  безотказной работы, которое называется также средним сроком службы или средней наработкой до отказа. В соответствии с определением

$$T_0 = M(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

или

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Нетрудно видеть, что для невосстанавливаемых средств среднее значение технического ресурса будет равно среднему времени безотказной работы, т. е. для указанных средств  $\bar{T}_p = T_0$ .

Статистически величина  $T_0$  для группы однородных невосстанавливаемых средств определяется как отношение суммарного времени наработки каждого из них до появления отказа к общему числу ( $N_c$ ) средств, т. е.

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_c} t_j}{N_c}, \quad (4.2.4)$$

где  $t_j$  — время наработки до отказа  $j$ -го средства.

Когда  $\lambda(t) = \text{const}$ , то среднее время (математическое ожидание) безотказной работы средства

$$T_0 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.2.5)$$

Интенсивность отказов при этом может быть определена как

$$\lambda = \frac{1}{T_0}.$$

Большинство радиоэлектронных средств в той или иной степени являются восстанавливаемыми системами, которые в случае возникающих отказов подвергаются ремонту или замене. При отнесении средств к категориям восстанавливаемых или невосстанавливаемых необходимо учитывать организацию их использования, поскольку одни и те же средства в одних условиях могут рассматриваться как восстанавливаемые, а в других — как невосстанавливаемые. Примером таких средств может служить бортовая аппаратура, которая до пуска ракеты

обычно относится к восстанавливаемым, а при полете ракеты — к невозстанавливаемым средствам.

Показатели, используемые для количественной оценки безотказности функционирования восстанавливаемых средств, по форме одинаковы с аналогичными показателями невозстанавливаемых средств. Однако, по содержанию они в общем случае отличаются от соответствующих показателей невозстанавливаемых средств.

Для оценки безотказности функционирования восстанавливаемых средств применяются в основном следующие показатели:

- вероятность безотказной работы за время  $t$ ;
- параметр потока отказов (средняя частота отказов);
- средняя наработка на отказ.

Параметром потока отказов  $\Lambda(t)$  называется предельное отношение вероятности появления хотя бы одного отказа за промежуток времени  $\Delta t$  к длине этого промежутка. В статистическом смысле этот показатель представляет собой отношение числа  $\Delta n'$  отказов средств в единицу времени к общему числу средств, при этом в число  $\Delta n'$  входят как первоначальные отказы, так и отказы, возникшие после восстановления или замены отказавших средств, т. е.

$$\Lambda(t) = \frac{\Delta n'}{N_c \Delta t}.$$

Можно показать [6], что если поток отказов восстанавливаемых средств может рассматриваться как простейший, то его параметр численно равен интенсивности отказов однотипных невозстанавливаемых средств, т. е. в данном случае

$$\Lambda^*(t) = \lambda(t) = \text{const.}$$

При этом вероятность безотказной работы восстанавливаемых средств за время  $t$  может быть определена по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t^*}. \quad (4.2.6)$$

Одним из наиболее распространенных показателей надежности восстанавливаемых средств является средняя наработка на отказ  $T_{\text{ср}}$ , определяемая по всем отказам группы средств за некоторый промежуток времени, т. е.

$$T_{\text{cp}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{n_k} t_{ik}}{\sum_{k=1}^{N_c} n_k}, \quad (4.2.7)$$

Где  $t_{ik}$  — время наработки между соседними отказами  $k$ -го образца средства;  $n_k$  — число отказов  $k$ -го образца средства.

Если поток отказов средства является простейшим ( $\Lambda(t) = \text{const}$ ), то среднее время безотказной работы и средняя наработка на отказ равны между собой, т. е.  $T_0 = T_{\text{cp}}$ .

В этом случае экспоненциальный закон надежности для восстанавливаемых средств можно записать в следующем виде:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{\text{cp}}}}. \quad (4.2.8)$$

Показатели, характеризующие безотказность функционирования невосстанавливаемых и восстанавливаемых средств, могут быть определены при использовании этих средств как в непрерывном, так и в циклическом режимах функционирования.

Для количественной оценки способности средств сохранять свои свойства в режиме хранения применяются специальные показатели, так называемые показатели сохраняемости. По своей форме эти показатели в основном аналогичны приведенным выше показателям, используемым для оценки безотказности действия средств.

Основными показателями надежности радиоэлектронных средств в режиме хранения являются:

$P(t_{\text{xp}})$  — надежность в режиме хранения, представляющая собой вероятность того, что в заданных условиях за время хранения  $t_{\text{xp}}$  в средстве не возникнет ни одной неисправности. Значение показателя  $P(t_{\text{xp}})$  может быть определено из следующего выражения:

$$P(t_{\text{xp}}) = e^{-\int_0^{t_{\text{xp}}} \lambda_{\text{xp}}(t) dt}, \quad (4.2.9)$$

где  $\lambda_{\text{xp}}(t)$  — интенсивность возникновения неисправностей при хранении, определяемая обычно по результатам

хранения или специальных испытаний;  $T_{\text{оxp}}$  — среднее время безотказного хранения, определяется выражением

$$T_{\text{оxp}} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda_{\text{xp}}(t) dt} dt. \quad (4.2.10)$$

Значения показателей сохраняемости могут быть определены как для непрерывного, так и циклического режима хранения соответствующих средств.

Для оценки восстанавливаемости средств применяются специальные показатели, важнейшим из которых является среднее время восстановления ( $\bar{t}_B$ ). Статистическое значение этого показателя определяется следующим выражением:

$$\bar{t}_B = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{m_k} t_B(j_k)}{\sum_{k=1}^{N_c} m_k}, \quad (4.2.11)$$

где  $t_B(j_k)$  — время восстановления, затрачиваемое на устранение  $j$ -го отказа  $k$ -го образца средства;  $m_k$  — число отказов  $k$ -го образца средства, имевших место за определенный период времени;  $N_c$  — количество образцов средства, по которым проводится анализ.

#### 4.3. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{pi}$ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ИХ РЕАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ

В параграфе 4.1 было показано, что неисправности и отказы, возникающие при хранении и использовании по назначению радиоэлектронных средств, могут привести к снижению значения показателя  $P_{pi}$ .

Степень этого снижения характеризуется отношением

$$P_n = \frac{P_{pi}}{P_{Ei}},$$

где  $P_{pi}$  — показатель успешности выполнения средством, имеющим определенный уровень надежности и используемым в простых условиях, своих функций в соответствующем

щей операции;  $P_{Ei}$  — показатель успешности выполнения средством, используемым в простых условиях и обладающим абсолютной надежностью, своих функций в соответствующей операции. Напомним, что абсолютной надежностью обладает такое средство, у которого в течение  $T_p$  и  $T_{xp}$  не возникает неисправностей соответственно ни в режиме использования по назначению, ни в режиме хранения. Естественно, что для такого средства показатель  $P_H$  равен единице.

В данном параграфе будут рассмотрены пути определения показателя  $P_{pi}$  радиоэлектронных средств, используемых в простых условиях и обладающих определенным уровнем надежности. Эта задача может быть сформулирована следующим образом. Имеется радиоэлектронное средство, характеристики которого, в том числе и показатели надежности, для соответствующих условий использования, известны. Требуется определить значение показателя  $P_{pi}$  при использовании средства в соответствующей операции.

В § 4.1 было показано, что степень влияния неисправностей на значение показателя  $P_{pi}$  зависит как от уровня надежности радиоэлектронных средств, так и от организации их использования и характера выполняемых ими задач. В этой связи при определении показателя  $P_{pi}$  для простых условий использования радиоэлектронных средств необходимо учитывать:

— вид действий или комплексов, которые обеспечиваются соответствующим средством;

— организацию использования средства;

— характер обеспечиваемых операций, продолжительность использования средства по назначению в операции:

— организацию подготовки средства к использованию по назначению;

— организацию профилактики и других мероприятий по поддержанию средства в исправном состоянии.

С учетом изложенных выше предварительных замечаний рассмотрим пути определения показателя  $P_{pi}$ . этой целью проанализируем процесс приведения радиоэлектронного средства в готовность после хранения и использования его по назначению в соответствующей операции. При этом вначале будем считать, что анализируемые средства являются простыми, т. е. имеющими

только два состояния — полностью исправное и полностью неисправное.

Обратимся к рис. 4.3.1, на котором нанесена ось времени с наиболее характерными моментами подготовки и использования средства. На этом рисунке:

— точка 0 — момент времени, когда средство после проведения профилактики или использования по назначению в полностью исправном состоянии переводится в режим хранения;

— точка  $t_1$  — момент времени, в который поступает указание о приведении средства в готовность для использования по назначению;



Рис. 4.3.1. К рассмотрению порядка определения  $P_{pi}$ .

— точка  $t'_1$  — момент приведения в готовность средства, в котором во время хранения не возникло неисправностей;

— точка  $t_H$  — момент времени, начиная с которого средство должно использоваться в операции;

— точки  $t_2$  и  $t_3$  — моменты фактического начала и окончания использования средства в соответствующей операции.

Интервал  $(t_2, t_3)$  представляет собой фактическое время использования средства в операции. Если обозначить интервал  $(t_1, t_3)$  через  $t_{ок}$ , а интервал  $(t_1, t_2)$  через  $t_{бр}$ , то фактическое время применения средства в операции

$$t_{бр} = t_{ок} - t_{бр}$$

Интервал  $t_{бр}$  представляет собой фактическое время приведения средства в готовность для использования по назначению, а интервал  $t_{ок}$  — время от момента выдачи указания о приведении средства в готовность до момента окончания использования его в соответствующей операции. Значение интервала  $t_{ок}$  для любого радиоэлектронного средства может быть определено, исходя из анализа организации и условий его использования. Этот интервал в общем случае состоит из двух частей: допустимого времени приведения средства в готовность ( $t_{брH}$ ) и необходимого времени использования его в соответствующей

операции ( $t_{брн}$ ) — отрезки ( $t_1, t_n$ ) и ( $t_n, t_3$ ) соответственно на рис. 4.3.1, т. е.

$$t_{ок} = t_{бгн} + t_{брн}.$$

Необходимая продолжительность использования любого радиоэлектронного средства в соответствующей операции (значение интервала  $t_{брн}$ ) может быть определена на основе анализа организации и условий его применения. Так, необходимая продолжительность работы головки самонаведения, которая включается в момент старта ракеты, будет равна времени полета последней до цели.

Для РЛС управления стрельбой зенитной артиллерии необходимое время использования по назначению при обслуживании одной цели определяется следующими выражениями:

$$t_{брн} = \frac{D_y}{V_{отн}} \text{ при } D_y \leq D_{нy},$$

$$t_{брн} = \frac{D_{нy}}{V_{отн}} \text{ при } D_y \geq D_{нy},$$

где  $D_y$  — фактическая дальность действия РЛС управления стрельбой;  $D_{нy}$  — необходимая дальность действия этой станции, определяемая выражением

$$D_{нy} = D_0 + (t_{пус} + t_{пол}) V_{отн},$$

где  $D_0$  — максимальная дальность стрельбы обеспечиваемых артустановок;  $t_{пол}$  — время полета снаряда на дальность  $D_0$ ;  $t_{пус}$  — время от начала сопровождения цели до момента выработки приборами управления стрельбой данных для наведения артустановок.

Необходимое время использования в операции одного и того же радиоэлектронного средства может изменяться в зависимости от условий его применения. Так, значение показателя  $t_{брн}$  указанной выше головки самонаведения ракеты при прочих равных условиях будет зависеть от дальности стрельбы. Приведенные соображения о содержании интервалов времени  $t_{ок}$  и  $t_{брн}$  радиоэлектронных средств являются справедливыми как для элементарных, так и для сложных операций.

Итак, для любого радиоэлектронного средства применительно к обслуживанию как простой, так и сложной операции можно установить значения интервалов времени  $t_{ок}$  и  $t_{брн}$ . Знание указанных показателей в свою

очередь дает возможность определить значение максимально допустимого времени приведения средства в готовность для использования по назначению

$$t_{бгн} = t_{ок} - t_{брн}.$$

Интервал  $t_{бгн}$  в общем случае состоит из двух составляющих:

$$t_{бгн} = t_{вкл} + t_{рез},$$

где  $t_{вкл}$  — время включения исправного средства;  $t_{рез}$  — резервное время, которое наряду с  $t_{вкл}$  может быть использовано для перевода средства из режима хранения в состояние готовности для использования по назначению. Появление дополнительного времени  $t_{рез}$  связано с различными причинами, в том числе с различными источниками образования интервалов  $t_{ок}$  и  $t_{брн}$ .

Так, для РЛС управления стрельбой зенитной артиллерии значение показателя  $t_{брн}$  зависит в первую очередь от дальности действия самой станции, а значение показателя  $t_{ок}$  от дальности действия РЛС обнаружения и целеуказания.

Нетрудно видеть, что момент фактического начала использования средства в операции в значительной степени зависит от соотношения интервалов  $t_{бг}$  и  $t_{бгн}$ . Если в процессе использования по назначению средство работает безотказно, то соотношение интервалов  $t_{бг}$  и  $t_{бгн}$  будет также определять и фактическую продолжительность применения средства в операции. Так, если в указанных условиях  $t_{бг} \leq t_{бгн}$ , то средство может быть использовано по назначению в операции в течение необходимого времени  $t_{брн}$ .

Если же  $t_{бг} > t_{бгн}$ , то продолжительность использования средства в операции будет меньше необходимого времени.

Таким образом, увеличение интервала  $t_{бг}$  сверх  $t_{бгн}$  ведет к уменьшению фактического времени использования средства по назначению в операции.

Увеличение времени  $t_{бг}$  может иметь место по разным причинам, в том числе и за счет недостаточной надежности средств в режиме хранения.

Если в момент  $t_1$  (рис. 4.3.1) дается указание, то процесс подготовки средства к использованию по назначению после хранения может происходить двумя путями:

-- если за время  $(0, t_1)$  не возникло никаких неисправностей, то для перевода средства из режима хранения в рабочее состояние требуется только его включение, для чего необходимо затратить время  $t_{\text{вкл}}$ . Итак, в данном случае время приведения средства в готовность для использования по назначению  $t_{\text{бг}} = t_{\text{вкл}}$ . Показатель  $t_{\text{вкл}}$  зависит от конструктивных особенностей средства, времени сбора и квалификации обслуживающего персонала и, в общем случае, является случайной величиной. Однако в дальнейшем, с целью упрощения расчетов, величину  $t_{\text{вкл}}$  будем считать постоянной и зависящей только от конструктивных особенностей средства;

— если за время  $(0, t_1)$  возникла одна или несколько неисправностей, то средство может быть подготовлено для использования по назначению только после их устранения, на что требуется определенное время.

Так, если за время хранения  $t_{\text{хр}}$  возникло  $N_{oi}$  независимых неисправностей, то средство может быть приведено в готовность для использования по назначению после получения соответствующего указания только через время

$$t_{\text{бг}} = t_{\text{вкл}} + N_{oi} \bar{t}_{\text{в}},$$

где  $\bar{t}_{\text{в}}$  — среднее время восстановления при одной неисправности.

Итак, время приведения средства в готовность для использования по назначению в общем случае состоит из двух частей: времени включения  $t_{\text{вкл}}$  и времени восстановления  $t_{\text{в хр}} = N_{oi} \bar{t}_{\text{в}}$ . Интервал  $t_{\text{бг}}$  в значительной степени зависит от числа независимых неисправностей, возникших в средстве во время хранения.

Вероятность возникновения  $N_{oi} = i (N_{oi} = 0, 1, 2, \dots)$  независимых неисправностей за время хранения может быть определена, если известна организация эксплуатации средства (величина интервала  $t_{\text{хр}}$ ), а также закон возникновения неисправностей при хранении и его характеристики. Так, если распределение неисправностей при хранении аппроксимируется законом Пуассона, то вероятность возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения  $t_{\text{хр}}$  может быть определена с помощью следующего выражения [3]:

$$q_{N_{oi}} = \frac{(\lambda_{\text{хр}} t_{\text{хр}})^{N_{oi}}}{N_{oi}!} e^{-\lambda_{\text{хр}} t_{\text{хр}}} . \quad (4.3.1)$$

Итак, возникновение неисправностей в режиме хранения приводит к увеличению фактического времени приведения средства в готовность для использования по назначению. В результате этого использование средства в операции может быть начато после требуемого момента  $t_{\text{н}}$  и продолжаться меньше необходимого времени  $t_{\text{бр н}}$ . Указанное обстоятельство не может не оказать влияния на успешность выполнения стоящих перед средством задач. Степень этого влияния зависит от характера выполняемых задач и соотношения интервалов  $t_{\text{рез}}$ ,  $t_{\text{в хр}}$  и  $t_{\text{бр н}}$ , что видно из следующего примера.

Указание о приведении в готовность для использования по назначению радиолокационной станции управления стрельбой зенитных артиллерийских установок дается при обнаружении цели РЛС целеуказания. Если в этот момент РЛС управления стрельбой окажется в неисправном состоянии и для ввода ее в строй требуется время  $t_{\text{в хр}}$ , то возможны следующие варианты:

$$1) t_{\text{в хр}} \leq \frac{D_{\text{ц}} - D_{\text{о}}}{V_{\text{огн}}} - (t_{\text{вкл}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{пол}}),$$

где  $D_{\text{ц}}$  — дальность до цели, при которой дается команда на включение РЛС управления стрельбой;  $D_{\text{о}}$  и  $t_{\text{пол}}$  — максимальная дальность стрельбы артиллерийских установок и время полета снаряда на эту дальность;  $t_{\text{раб}}$  — время от момента обнаружения цели РЛС управления стрельбой до открытия огня;  $V_{\text{огн}}$  — относительная скорость изменения расстояния между целью и артиллерийскими установками.

В данном случае неисправности будут устранены так быстро, что станция обеспечит открытие огня по цели на предельной дальности стрельбы;

$$2) t_{\text{в хр}} \geq \frac{D_{\text{ц}} - D_{\text{о м}}}{V_{\text{огн}}} - (t_{\text{вкл}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{пол м}}),$$

где  $D_{\text{о м}}$  и  $t_{\text{пол м}}$  — минимальная дальность стрельбы артиллерийских установок и время полета снаряда на эту дальность.

В данном случае неисправности будут устраняться столь продолжительное время, что цель не будет подвергнута обстрелу;

$$3) \frac{D_{\text{ц}} - D_{\text{о}}}{V_{\text{огн}}} - (t_{\text{вкл}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{пол}}) \leq t_{\text{в хр}} \leq \frac{D_{\text{ц}} - D_{\text{о м}}}{V_{\text{огн}}} - (t_{\text{вкл}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{пол м}}).$$

В данном случае РЛС управления стрельбой обеспечит открытие огня по цели на дальности, которая в зависимости от значения  $t_{в\ хр}$  может изменяться от минимально возможного ( $D_{о\ м}$ ) до максимально возможного значения ( $D_о$ ).

Данный пример показывает, что степень снижения результатов использования радиоэлектронных средств в операции зависит не только от уровней их сохраняемости и ремонтпригодности, но и от значения параметров, определяющих потенциальную эффективность средств. Степень этого снижения при прочих равных условиях будет меньше у тех средств, которые обладают более высокой потенциальной эффективностью.

Приведенные соображения дают основания рекомендовать следующий порядок определения показателя  $P_{рi}$  радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности в режиме хранения (при условии, что в ходе использования по назначению средства работают безотказно):

— исходя из назначения, условий использования и других факторов, определить значения интервалов  $t_{ок}$ ,  $t_{бр\ н}$  и  $t_{бг\ н}$  исследуемого средства;

— определить вероятность возникновения за время хранения одной, двух и т. д. независимых неисправностей, а также необходимое время для их устранения ( $t_{в\ хр}$ ) и сравнить его с интервалом

$$t_{рез} = t_{ок} - (t_{бр\ н} + t_{вкл});$$

в том случае, когда  $t_{в\ хр} \leq t_{рез}$ , средство будет иметь возможность выполнять стоящую перед ним задачу в операции в течение времени  $t_{бр\ н}$ . Это значит, что в данном случае неисправности, возникающие при хранении, не будут влиять на значение показателя  $P_{рi}$  средства; когда  $t_{в\ хр} > t_{рез}$ , то необходимость устранения неисправностей приведет к сокращению времени использования средства в операции;

— определить фактическое время, в течение которого средство может быть использовано в операции при условии возникновения за время хранения одной, двух и т. д. независимых неисправностей, по следующим формулам:

$$t'_{бр\ н} = t_{бр\ н} - (N_{оi} \bar{t}_{в} - t_{рез}). \quad (4.3.2)$$

ИЛИ

$$t'_{бр} = t_{ок} - (t_{вкл} + N_{oi} \bar{t}_в); \quad (4.3.3)$$

— оценить успешность выполнения решаемых средством задач, т. е. определить значение показателя  $P_{pi}$  при условии возникновения за время хранения одной, двух и т. д. независимых неисправностей, с помощью следующего выражения:

$$P_{pi N_{oi}} = P_{Ei}(t'_{бр}), \quad (4.3.4)$$

где значение интервала  $t'_{бр}$  определяется соотношениями (4.3.2) и (4.3.3).

Явный вид зависимости  $P_{Ei}(t'_{бр})$  определяется характером выполняемых средством задач и может быть самым разнообразным. Можно, например, указать такие средства, использование которых должно начинаться в строго определенное время, а если это условие не соблюдается, то они или не могут быть использованы или стоящие перед ними задачи не будут выполнены. Для данного случая показатель

$$P_{Ei}(t'_{бр}) = P_{Ei}(t_{брн}) \text{ при } t'_{бр} = t_{брн}$$

и

$$P_{Ei}(t'_{бр}) = 0 \text{ при } t'_{бр} < t_{брн}.$$

Для многих радиоэлектронных средств, например, в течение продолжительного времени выполняющих функции поиска и обнаружения целей в определенной области пространства, показатель  $P_{Ei}(t'_{бр})$  пропорционален отношению  $t'_{бр}$  и  $t_{брн}$ . Иначе, для таких средств показатель

$$P_{Ei}(t'_{бр}) = \frac{t'_{бр}}{t_{брн}} P_{Ei}(t_{брн});$$

— по формуле полной вероятности определить значение показателя

$$P_{pi} = \sum_{N_{oi}=0}^{N_{п}} P_{pi N_{oi}} q_{N_{oi}}, \quad (4.3.5)$$

где  $N_{п}$  — предельное число неисправностей, могущих возникнуть за время  $t_{xp}$ ;  $q_{N_{oi}}$  — вероятность возникновения за время хранения  $N_{oi}$  независимых неисправностей ( $N_{oi} =$

$= 0, 1, 2, 3, \dots, N_{\text{п}})$ ;  $P_{\text{р}iN_{\text{о}i}}$  — значение показателя  $P_{\text{р}i}$  при условии возникновения за время хранения  $N_{\text{о}i}$  независимых неисправностей.

Как уже отмечалось, в реальных условиях неисправности могут возникать не только во время хранения, но и при использовании радиоэлектронных средств по назначению. Влияние указанных неисправностей на результаты использования средств в соответствующих операциях может быть самым различным. В общем случае оно определяется: интенсивностью возникновения неисправностей; характером выполняемых средствами задач; ремонтпригодностью аппаратуры.

Можно назвать ряд радиоэлектронных средств, например, не обслуживаемых при использовании средств однократного действия, для которых появление хотя бы одной неисправности в любой момент использования по назначению приводит к полному срыву выполняемых ими задач. Вместе с тем можно указать некоторые виды радиоэлектронных средств, для которых появление неисправностей при использовании их по назначению приводит не к полному срыву, а только к некоторому снижению успешности выполнения стоящих задач. Последнее положение может иметь место, например, если:

— использование средства в сложной операции связано с последовательным обслуживанием нескольких целей или выполнением ряда однотипных и последовательных по времени действий. Поскольку отказы при использовании носят случайный характер, то во многих случаях средство до выхода из строя может выполнить часть стоящей в операции задач (например, обнаруживать цели в течение какой-то части необходимого времени работы по графику);

— характер стоящей задачи таков, что она может решаться и после перерыва в использовании средства по назначению, а соотношение интервалов  $t_{\text{в бр}}$  и  $t_{\text{бр п}}$  позволяет устранить до момента  $t_3$  отказы, возникшие в интервале  $(t_2, t_3)$ .

С целью установления общего порядка учета реальной надежности средств при их использовании по назначению при определении показателя  $P_{\text{р}i}$  рассмотрим рис. 4.3.2. На этом рисунке моменты  $0, t_1, t_{\text{н}}, t_2$  и  $t_3$  имеют такое же значение, как и на рис. 4.3.1.

Примем, что в данном случае моменты  $t_H$  и  $t_2$  совпадают, т. е. средство начинает использоваться по назначению в необходимый момент времени.

Предположим, что в какой-то случайный момент времени  $t_0$  возникает отказ и средство полностью выходит из строя, а его работоспособность может быть восстановлена к моменту  $t_B$ . Возможность дальнейшего

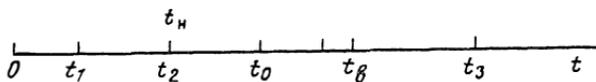


Рис. 4.3.2. К рассмотрению порядка определения  $P_{pi}$ .

использования средства после ремонта в выполняющейся операции будет зависеть от:

— характера решаемой задачи и организации эксплуатации средства;

— соотношения времени восстановления и необходимого времени использования средства в операции;

— положения момента  $t_0$  в интервале  $(t_2, t_3)$ .

Нетрудно видеть, что наиболее общим последствием появления отказов при использовании средств по назначению является снижение успешности решения стоящих задач за счет сокращения времени применения средств в соответствующих операциях.

Если средство используется по назначению, начиная с момента  $t_H$ , то его показатель  $P_{pi}$  может быть определен как

$$P_{pi} = P_{Ei}(t''_{бр}), \quad (4.3.6)$$

где

$$t''_{бр} = t_{брH} - N_{oj}t_B = t_{брH} - t_B \text{ бр}. \quad (4.3.7)$$

Из приведенных соображений следует, что для определения показателя  $P_{pi}$  средств с учетом их реальной надежности в режиме использования по назначению (при условии, что средство начинает использоваться по назначению в необходимый момент времени) необходимо:

— определить величину интервала  $t_{брH}$  исследуемого средства;

— определить вероятность возникновения одного, двух и т. д. независимых отказов за время использова-

ния средства в операции, а также необходимое время на их устранение ( $t_{в\ бр}$ );

— определить фактическое время использования средства в операции при одном, двух и т. д. независимых отказах с помощью зависимости (4.3.7);

— определить успешность выполнения решаемой средством задачи с учетом использования его в соответствующей операции в течение времени  $t''_{бр}$ , определяемого в соответствии с выражением (4.3.7), т. е. определить значение показателя  $P_{pi}$  при условии возникновения при использовании средства в операции одного, двух и т. д. независимых отказов;

— определить по формуле полной вероятности, аналогичной приведенному выше выражению (4.3.5), значение показателя  $P_{pi}$ .

Приведенные выше соображения дают возможность получить общее выражение для определения показателя  $P_{pi}$  с учетом реальной надежности средств как в режиме хранения, так и в режиме использования по назначению. С этой целью рассмотрим полную систему событий, которая может иметь место при подготовке средства, а также при использовании его по назначению в соответствующей операции.

Система состоит из следующих сложных событий:

а) средство приготовлено для применения к моменту  $t_n$  и при использовании по назначению в течение времени  $t_{бр\ n}$  действует безотказно.

Очевидно, что в данном случае показатель  $P_{pi}$  будет равен  $P_{Ei}(t_{бр\ n})$ . Вероятность данного события

$$P(A) = K_r P(t_{бр\ n}), \quad (4.3.8)$$

где  $K_r$  — вероятность того, что средство будет готово для использования по назначению к моменту  $t_n$  (см. рис. 4.3.1);  $P(t_{бр\ n})$  — вероятность безотказной работы средства в течение  $t_{бр\ n}$ ;

б) средство приготовлено для применения позднее момента  $t_n$ , а при использовании по назначению действует безотказно.

Очевидно, что вероятность данного события

$$P(B) = (1 - K_r) P(t'_{бр}), \quad (4.3.9)$$

где

$$t'_{бр} = t_{бр\ n} - (t_{в\ xp} - t_{рез}),$$

Показатель успешности выполнения при этом средством стоящей задачи в соответствующей операции

$$P'_{pi} = P_{Ei}(t'_{бp});$$

в) средство приготовлено для применения к моменту  $t_{н}$ , а при его использовании по назначению в течение времени  $t_{бpн}$  имеют место отказы.

Очевидно, что вероятность этого события

$$P(B) = K_r [1 - P(t_{бpн})]. \quad (4.3.10)$$

Показатель успешности выполнения средством стоящей задачи в соответствующей операции в данном случае

$$P''_{pi} = P_{Ei}(t''_{бp}),$$

где

$$t''_{бp} = t_{бpн} - t_{в бp};$$

г) средство приготовлено для применения позднее момента  $t_{н}$ , а при использовании его по назначению имеют место отказы.

Вероятность данного события

$$P(\Gamma) = (1 - K_r) [1 - P(t'_{бp})]. \quad (4.3.11)$$

Показатель успешности выполнения средством стоящей задачи в соответствующей операции в данном случае

$$P'''_{pi} = P_{Ei}(t'''_{бp}),$$

где

$$t'''_{бp} = t'_{бp} - t_{в бp} = t_{бpн} - (t_{в xp} - t_{pвз}) - t_{в бp}.$$

В соответствии с формулой полной вероятности показатель  $P_{pi}$  будет определяться следующим выражением:

$$P_{pi} = P(A) P_{Ei}(t_{бpн}) + P(B) P'_{pi} + P(C) P''_{pi} + P(\Gamma) P'''_{pi}$$

или

$$P_{pi} = K_r P(t_{бpн}) P_{Ei}(t_{бpн}) + (1 - K_r) P(t'_{бp}) P_{Ei}(t'_{бp}) + K_r [1 - P(t_{бpн})] P_{Ei}(t''_{бp}) + (1 - K_r) [1 - P(t'_{бp})] P_{Ei}(t'''_{бp}). \quad (4.3.12)$$

Рассмотрим некоторые общие особенности определения показателей, входящих в выражение (4.3.12).

## Особенности определения коэффициента $K_r$

Согласно определению коэффициент  $K_r$  есть вероятность того, что средство будет приготовлено для использования по назначению не позже момента  $t_n$  (рис. 4.3.1).

Это событие будет иметь место, если:

а) за время хранения в средстве не возникло ни одной неисправности. Для определения вероятности  $P(t_{xp})$  этого события необходимо знать закон возникновения неисправностей средства в режиме хранения и его характеристики, а также продолжительность хранения;

б) за время хранения возникла одна или несколько неисправностей, однако средство имеет такие параметры ( $\bar{t}_в$ ,  $t_{рез}$ ,  $t_{вкл}$ ) и особенности использования, которые позволяют устранять указанные неисправности и обеспечивать готовность средства для использования по назначению к моменту  $t_n$ . Указанное обстоятельство будет иметь место, если

$$t_{в xp} \leq t_{ок} - (t_{вкл} + t_{бр н}).$$

Вероятность выполнения этого неравенства обозначим через  $K'_r$ . Значение показателя  $K'_r$  может быть определено, если известен закон распределения возникновения неисправностей при хранении средства, а также характеристики ремонтпригодности.

Поскольку по определению  $K'_r$  есть вероятность выполнения неравенства

$$N_{од} t_{в} \leq t_{бр н} - t_{вкл}, \quad (4.3.13)$$

то при известных характеристиках средства ( $t_{вкл}$ ,  $\bar{t}_в$ ,  $t_{ок}$ ) можно найти наибольшее число независимых неисправностей ( $N_{од}$ ), при котором указанное неравенство будет выполняться. Нетрудно видеть, что это число неисправностей может быть определено из следующих соотношений:

$$N_{од} \leq \frac{t_{бр н} - t_{вкл}}{\bar{t}_в}$$

ИЛИ

$$N_{од} \leq \frac{t_{ок} - (t_{бр н} + t_{вкл})}{\bar{t}_в}. \quad (4.3.14)$$

Поскольку неравенство (4.3.13) будет выполняться при любом числе неисправностей от 1 до  $N_{од}$  включительно, то значение показателя  $K'_r$  можно определить как

$$K'_r = \sum_{N_{oi}=1}^{N_{од}} q_{N_{oi}}, \quad (4.3.15)$$

где  $q_{N_{oi}}$  — вероятность возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения  $t_{xp}$  при условии, что к моменту включения средство окажется в неисправном состоянии.

Нетрудно видеть, что

$$K_r = P(t_{xp}) + K'_r. \quad (4.3.16)$$

Для средств, у которых необходимое время приведения в готовность  $t_{бгн} = t_{ок} - t_{брн} = t_{вкл}$ , показатель

$$K_r = P(t_{xp}). \quad (4.3.17)$$

### Определение показателя $P(t)$

Показатель  $P(t)$  представляет собой вероятность безотказной работы средства при использовании по назначению в течение времени  $t$ . Как уже указывалось, в общем случае

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

Если  $\lambda(t) = \text{const}$ , то показатель  $P(t)$  может быть определен с помощью выражения (4.2.3).

### Определение показателей $P'_{pi}$ , $P''_{pi}$ , $P'''_{pi}$

Согласно определению  $P'_{pi}$ ,  $P''_{pi}$ ,  $P'''_{pi}$  представляют собой показатели успешности выполнения средством стоящих задач при условии, что фактическая продолжительность его использования в соответствующей операции меньше интервала  $t_{брн}$  за счет необходимости устра-

нения неисправностей, возникающих соответственно при хранении, использовании по назначению или в том и другом случае.

Для определения значения указанных показателей необходимо:

— с учетом уровня надежности и особенностей использования найти фактическое время ( $t_{бр}$ ) использования средства в соответствующей операции;

— определить зависимость показателя  $P_{Ei}$  от продолжительности работы средства в операции и с ее помощью определить значение показателя  $P_{Ei}$  для найденного интервала  $t_{бр}$ .

#### 4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{pi}$ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В предыдущем параграфе были получены общие выражения для определения показателя  $P_{pi}$  радиоэлектронных средств, а также для его основных составных элементов. Указанные выражения могут быть конкретизированы для любого радиоэлектронного средства с учетом особенностей его эксплуатации и использования по назначению.

Ниже в качестве примера рассмотрены отдельные особенности определения показателя  $P_{pi}$  для некоторых видов радиоэлектронных средств, объединенных по ряду общих признаков в следующие группы:

к первой группе относятся радиоэлектронные средства многократного действия, имеющие следующие особенности:

— моменты начала использования этих средств планируются заранее; таким образом, величина  $t_{xp}$  для средств данной группы известна;

— для обеспечения высокой готовности средств к использованию могут приниматься специальные меры;

— неисправности, возникающие при хранении и использовании средств по назначению, могут устраняться обслуживающим персоналом;

— выполняемые средствами задачи в соответствующих операциях имеют такой характер, который позволяет продолжать их решение (если это возможно по соотношению интервалов  $t_{вбр}$  и  $t_{брн}$ ) после перерыва, вы-

званного необходимостью устранения возникших неисправностей. Примером средств данной группы может служить радиолокационная станция обнаружения, работающая по расписанию;

ко второй группе относятся радиоэлектронные средства многократного действия, имеющие следующие особенности:

— моменты выдачи указаний о приведении средств в готовность к использованию по назначению являются случайными; время хранения средств ( $t_{xp}$ ) перед использованием по назначению также является случайной величиной;

— с целью обеспечения высокой готовности к использованию средства могут периодически проходить профилактическую проверку;

— неисправности, возникающие при хранении и использовании средств по назначению, могут устраняться обслуживающим персоналом;

— выполняемые средствами задачи в соответствующих операциях имеют такой характер, который позволяет продолжать их решение (если это возможно по соотношению интервалов  $t_{вбр}$  и  $t_{брн}$ ) после перерыва, вызванного необходимостью устранения возникших неисправностей. Примером средств данной группы может служить радиолокационная станция управления стрельбой, указание о приведении в готовность к использованию которой дается в момент обнаружения цели средствами целеуказания;

к третьей группе относятся радиоэлектронные средства однократного действия, имеющие следующие особенности:

— моменты выдачи указаний о приведении средств в готовность к использованию по назначению являются случайными, поэтому время хранения средств перед использованием по назначению также является случайной величиной;

— для обеспечения высокой готовности к использованию по назначению средства могут периодически подвергаться профилактическим проверкам;

— при использовании по назначению средства не могут подвергаться ремонту;

— появление хотя бы одного отказа при использовании средств по назначению приводит к полному срыву

стоящих перед ними задач. Примером средств данной группы может служить бортовая аппаратура системы управления зенитных ракет, указание о приведении в готовность к использованию которой дается в момент обнаружения воздушной цели;

к четвертой группе относятся радиоэлектронные средства однократного действия, имеющие следующие особенности:

— момент начала использования средств по назначению известен заранее; таким образом, величина  $t_{xp}$  для средств данной группы может планироваться;

— для обеспечения высокой готовности средств могут приниматься специальные меры (профилактические осмотры и т. д.);

— при использовании по назначению средства не могут подвергаться ремонту;

— появление хотя бы одного отказа при использовании средств по назначению приводит к полному срыву стоящих перед ними задач. Примером средств данной группы может служить бортовая аппаратура системы управления баллистической ракеты.

Рассмотрим некоторые особенности определения показателя  $P_{pi}$  и его основных элементов применительно к указанным выше группам радиоэлектронных средств.

### **Определение показателя $P_{pi}$ для средств первой группы**

Для рассмотрения временной последовательности подготовки и использования по назначению средств первой группы в операции воспользуемся рис. 4.3.1.

Отличительная особенность указанных средств состоит в том, что необходимый момент начала использования их по назначению, т. е. положение точки  $t_n$  на оси времени, известен заранее. Это дает возможность осуществить подготовку средства таким образом, чтобы оно с большей вероятностью было готово для использования по назначению к моменту  $t_n$ .

Эта возможность может быть реализована различными методами; укажем два из них,

Первый метод состоит в том, что профилактическая проверка средства может быть организована таким образом, чтобы интервал  $t_{xp}$  имел минимально возможное значение.

Второй метод состоит в следующем: если момент  $t_n$  известен заранее, то это дает возможность так выбрать момент  $t_1$ , чтобы в течение интервала  $(t_1, t_n)$  можно было не только включить исправное средство, но и устранить неисправности, возникшие за время хранения.

Показатель  $P_{pi}$  для средств данной группы может быть определен с помощью полученного в предыдущем параграфе общего выражения (4.3.12) и с учетом рассмотренных ниже особенностей.

### Определение показателя $P'_{pi}$ для средств первой группы

В соответствии с определением показатель  $P'_{pi}$  характеризует успешность выполнения средством стоящей задачи в операции при условии, что оно оказывается готовым к использованию позже необходимого момента времени (за счет неисправностей, возникших при хранении), а при использовании по назначению функционирует безотказно.

Для определения показателя  $P'_{pi}$  в первую очередь необходимо найти фактическое время использования средства в операции с учетом затрат времени на устранение неисправностей, возникших при хранении, т. е. найти значение интервала

$$t'_{брн} = t_{брн} - (t_{вxp} - t_{рез}). \quad (4.4.1)$$

Входящие в выражение (4.4.1) интервалы  $t_{брн}$  и  $t_{рез}$  зависят от свойств средств и для определенных организации и условий использования являются постоянными величинами. Входящий в это выражение интервал  $t_{вxp}$  представляет собой время устранения возникших при хранении неисправностей при условии, что их число  $N_{oi} > N_{од}$ .

При определении показателя  $P'_{pi}$  необходимо учитывать, что за время хранения  $t_{xp}$  в средстве может возникнуть различное число независимых неисправностей, удов-

летворяющее условию  $N_{oi} > N_{од}$ . Поскольку в общем случае

$$t_{вхр} = N_{oi} t_{в}, \quad (4.4.2)$$

то время устранения неисправностей, возникших при хранении, является случайной величиной. В этой связи показатель  $P'_{pi}$  может быть определен по формуле полной вероятности

$$P'_{pi} = \sum_{N_{oi}=N_{oiн}}^{N_{п}} (P'_{pi}/N_{oi} t) (q_{N_{oi}}/A),$$

где  $P'_{pi}/N_{oi}$  — значение показателя  $P_{pi}$  при условии возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения средства.

Величина показателя  $N_{oiн}$  определяется из соотношения

$$N_{oiн} > N_{од},$$

где  $N_{од}$  — максимальное число независимых неисправностей, возникших за время хранения, при наличии которых средство может быть подготовлено для использования по назначению к моменту  $t_{н}$

Значение показателя  $N_{од}$  может быть определено с помощью соотношения (4.3.14);  $q_{N_{oi}}/A$  — вероятность возникновения за время хранения  $N_{oi}$  независимых неисправностей при условии, что к моменту  $t_{н}$  средство не готово для использования по назначению.

При определении значения вероятности  $q_{N_{oi}}/A$  необходимо пользоваться формулой Байеса, которая в данном случае будет иметь вид

$$q_{N_{oi}} = \frac{q_{N_{oi}} q_A / N_{oi}}{\sum_{N_{oi}=N_{oiн}}^{N_{п}} q_{N_{oi}} q_A / N_{oi}},$$

где  $q_{N_{oi}}$  — безусловная вероятность возникновения за время хранения  $N_{oi}$  ( $N_{oiн}$ ,  $N_{oiн+1}$ , ...) независимых неисправностей;  $q_A/N_{oi}$  — вероятность неисправного состояния средства к моменту  $t_{н}$  при условии, что за время хранения в нем возникло  $N_{oi}$  независимых неисправностей.

Поскольку при любом значении  $N_{oi} > N_{oiH}$  показатель  $q_A/N_{oi}$  равен единице, то вероятность возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения при условии, что средство готово к использованию по назначению позже момента  $t_H$ , будет определяться следующим выражением:

$$q_{N_{oi}}/A = \frac{q_{N_{oi}}}{N_{\Pi} \sum_{N_o=N_{oiH}} q_{N_{oi}}} \quad (4.4.3)$$

Показатели  $q_{N_{oi}}$  могут быть определены, если известен вид и характеристики закона распределения неисправностей, возникших при хранении. Так, если это распределение аппроксимируется законом Пуассона, то вероятности  $q_{N_{oi}}$  могут быть определены с помощью выражения, аналогичного (4.3.1).

#### Определение показателя $P''_{pi}$ для средств первой группы

Согласно определению показатель  $P''_{pi}$  представляет собой вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящих задач в соответствующей операции при условии, что использование средства по назначению начинается в необходимый момент времени  $t_H$ , но при обеспечении операции имеют место отказы.

Характер решаемых средствами первой группы задач таков, что их выполнение может продолжаться и после устранения отказов, возникших при использовании средств по назначению. Совершенно естественно, что в связи с необходимостью устранения отказов, фактическое время использования средства в операции ( $t''_{бр}$ ) будет меньше необходимого ( $t_{брH}$ ), что может привести к снижению успешности выполнения стоящих задач или их полному срыву.

Показатель  $P''_{pi}$  для средств первой группы может быть определен по формуле

$$P''_{pi} = P_{Ei}(t''_{бр}), \quad (4.4.4)$$

где

$$t''_{бр} = t_{брH} - t_{в\ бр}.$$

Интервал  $t_{в\ бр}$  представляет собой время устранения отказов, возникших при обеспечении средством соответствующей операции. Таким образом, для определения в соответствии с (4.4.4) значения показателя  $P''_{pi}$  необходимо установить:

— продолжительность использования средства в операции ( $t_{бр\ п}$ );

— значение интервала ( $t_{в\ бр}$ ). Это время определяется как числом независимых отказов ( $N_{oj}$ ), так и средней продолжительностью устранения одного отказа ( $\bar{t}_в$ ). Оно может быть определено с помощью выражения, аналогичного (4.4.2). Входящий в это выражение показатель  $\bar{t}_в$  определяется ремонтопригодностью средства и квалификацией обслуживающего персонала. При определенной квалификации обслуживающего персонала значение  $\bar{t}_в$  зависит от заложенных в средство возможностей по отысканию причин отказов и их устранению, а также от степени автоматизации этих процессов. Величина  $\bar{t}_в$  определяется, как правило, экспериментально при испытаниях и эксплуатации средств.

Для определения интервала  $t_{в\ бр}$  необходимо знать число возникших отказов за время операции и моменты их возникновения. Однако точное число отказов за время операции, а также моменты их возникновения заранее не могут быть определены, поскольку отказы при использовании средств по назначению имеют случайный характер. В этой связи показатель  $P''_{pi}$  может быть определен по формуле полной вероятности как

$$P''_{pi} = \sum_{N_{oj}=1}^{N_{п}} (P''_{pi}/N_{oj}) (q_{N_{oj}}/A), \quad (4.4.5)$$

где  $P''_{pi}/N_{oj}$  — значение показателя  $P''_{pi}$  при условии возникновения в течение интервала  $t_{бр\ п} N_{oj}$  ( $N_{oj} = 1, 2, 3, \dots, N_{п}$ ) независимых отказов;  $q_{N_{oj}}/A$  — вероятность возникновения в течение операции  $N_{oj}$  независимых отказов при условии, что за это время средство хотя бы один раз откажет.

При определении вероятности  $q_{N_{oj}}/A$  необходимо пользоваться формулой Байеса, которая в данном случае по аналогии с (4.4.3) будет иметь следующий вид:

$$q_{N_{oj}/A} = \frac{q_{N_{oj}}}{\sum_{N_{oj}=1}^{N_{\Pi}} q_{N_{oj}}}, \quad (4.4.6)$$

где  $q_{N_{oj}}$  — безусловная вероятность возникновения в течение интервала  $t_{брн}$   $N_{oj}$  ( $N_{oj} = 1, 2, 3, \dots, N_{\Pi}$ ) независимых отказов.

Для определения безусловной вероятности возникновения  $N_{oj}$  независимых отказов за время  $t_{брн}$  необходимо знать закон распределения времени их возникновения. Если, например, поток отказов средства при использовании его по назначению обладает свойствами простейшего потока событий, то вероятность появления  $N_{oj}$  независимых отказов за время  $t_{бр}$  может быть определена с помощью следующего выражения [3]:

$$q_{N_{oj}} = \frac{(\Lambda t_{бр})^{N_{oj}}}{N_{oj}!} e^{-\Lambda t_{бр}}. \quad (4.4.7)$$

Выражение (4.4.7) для определения вероятности  $q_{N_{oj}}$  имеет общий характер. При проведении вычислений с его помощью сразу же возникает вопрос о том, для каких значений  $N_{oj}$  ( $N_{oj} = 1, 2, 3, \dots, N_{\Pi}$ ) должны определяться показатели  $q_{N_{oj}}$ , а также какие интервалы времени  $t_{бр}$  должны использоваться в выражении (4.4.7).

При определении числа независимых отказов, для которых должны находиться значения вероятности  $q_{N_{oj}}$ , следует руководствоваться следующими основными положениями:

— во-первых, необходимо оценить влияние на точность определения показателя  $P''_{рi}$  второго и последующих слагаемых из выражения (4.4.5). На основании этой оценки при дальнейших расчетах следует ограничиваться только теми слагаемыми, которые по условиям проводимого исследования заметно влияют на величину показателя  $P''_{рi}$ ;

— во-вторых, необходимо учитывать соотношение интервалов  $t_{брн}$  и  $\bar{t}_в$ . Нетрудно видеть, что если первый отказ возникнет в момент  $t_2$  (рис. 4.3.2), второй — в момент  $t_0$  ( $t_2, t_0 = \bar{t}_в$ ) и т. д., то наибольшее теоретически возможное среднее число независимых отказов, которые

могут возникнуть в течение интервала  $t_{\text{брн}}$ , не может превышать величины

$$N_{\text{н}} = \frac{t_{\text{брн}}}{\bar{t}_{\text{в}}}. \quad (4.4.8)$$

При определении значений вероятности  $q_{N_{\text{ој}}}$  с помощью (4.4.7) необходимо также учитывать, что интервал  $t_{\text{брн}}$  имеет всегда конечное значение. Поскольку появление первого же отказа сокращает время фактического использования средства в операции, то при определении вероятности  $q_{N_{\text{ој}}}$  величину  $t_{\text{брн}}$  можно подставлять в (4.4.7) лишь в тех случаях, когда имеет место условие

$$\bar{t}_{\text{в}} \ll t_{\text{брн}}.$$

Нетрудно видеть, что если характер выполняемой средством задачи в соответствующей операции таков, что  $t_{\text{брн}} \leq \leq \bar{t}_{\text{в}}$ , то появление отказа в любой момент интервала  $(t_2, t_3)$  приведет к тому, что использование средства в этой операции будет закончено. При этом фактическое время использования средства в соответствующей операции будет равно  $(t_2, t_0)$ . Так как отказ может возникнуть в любой момент интервала  $(t_2, t_3)$ , то продолжительность фактического использования средства по назначению в операции будет случайной величиной, которая может принимать любое значение от 0 до  $t_{\text{брн}}$ .

Показатель  $P''_{\text{рi}}$  в данном случае будет определяться выражением

$$P''_{\text{рi}} = P_{\text{Ei}}(t''_{\text{бр}}),$$

где

$$t''_{\text{бр}} = t_{\text{брн}} - (t_0, t_3).$$

Поскольку интервал  $(t_0, t_3)$  является случайной величиной, то показатель  $P''_{\text{рi}}$  в данном случае может быть определен с помощью выражения

$$P''_{\text{рi}} = \int_0^{t_{\text{брн}}} P_{\text{Ei}}(t''_{\text{бр}}) \lambda_{\text{р}} dt''_{\text{бр}}, \quad (4.4.9)$$

где  $\lambda_{\text{р}}$  — плотность вероятности возникновения отказов средства при условии, что в интервале  $(t_2, t_3)$  отказ обязательно произойдет.

Если поток отказов подчиняется закону Пуассона, то  $\lambda_p = \frac{1}{t_{брн}}$ . В этом случае показатель  $P''_{pi}$  будет определяться по формуле

$$P''_{pi} = \frac{1}{t_{брн}} \int_0^{t_{брн}} P_{Ei}(t''_{бр}) dt''_{бр}. \quad (4.4.10)$$

### Определение показателя $P'''_{pi}$ для средств первой группы

Согласно определению показатель  $P'''_{pi}$  представляет собой вероятность успешного выполнения радиоэлектронным средством стоящих задач в соответствующей операции при условии, что использование его вследствие неисправностей, возникших при хранении, начинается позже необходимого момента времени, а при выполнении им своих функций будут иметь место отказы (рис. 4.3.1 и 4.3.2). Нетрудно видеть, что при определении показателя  $P'''_{pi}$  должны учитываться рассмотренные выше особенности нахождения показателей  $P'_{pi}$  и  $P''_{pi}$ . При этом показатель  $P'''_{pi}$  можно рассматривать как показатель  $P''_{pi}$  для случая, когда использование средства по назначению начинается не в момент  $t_n$ , а в момент  $t_2$  [ $t_1, t_2 > (t_1, t_n)$ ].

Фактическое время использования средства по назначению в соответствующей операции при этом будет составлять

$$t'''_{бр} = t_{брн} - [(t_{вхр} - t_{рез}) + t_{вбр}], \quad (4.4.11)$$

где  $t_{вхр}$  и  $t_{вбр}$  — интервалы времени, которые должны быть затрачены на устранение неисправностей, возникших соответственно при хранении средства и при использовании его по назначению.

Показатель  $P'''_{pi}$  может быть определен по формуле

$$P'''_{pi} = P_{Ei}(t'''_{бр}), \quad (4.4.12)$$

где интервал  $t'''_{бр}$  определяется выражением (4.4.11).

Показатель  $P'''_{pi}$  должен определяться при условии, что неисправности будут возникать как при хранении

средства, так и при использовании его по назначению. Число неисправностей, возникших при хранении и использовании средства по назначению, будет случайной величиной. В этой связи интервалы  $t_{в\text{ хр}}$  и  $t_{в\text{ бр}}$  также являются случайными величинами. Поэтому показатель  $P'''_{pi}$  может быть определен по формуле

$$P'''_{pi} = \sum_{\substack{N_{oi}=N_{oiн} \\ N_{oj}=1}}^{N_{п}} (P'''_{pi}/N_{oi}N_{oj}) q_{N_{oi}N_{oj}}, \quad (4.4.13)$$

где  $P'''_{pi}/N_{oi}N_{oj}$  — значение показателя  $P'''_{pi}$  при условии возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения и  $N_{oj}$  ( $N_{oj} = 1, 2, 3, \dots$ ) независимых отказов в соответствующей операции;  $q_{N_{oi}N_{oj}}$  — вероятность возникновения  $N_{oi}$  ( $N_{oi} = N_{oiн}, N_{(он+1)}, \dots$ ) независимых неисправностей за время хранения и  $N_{oj}$  независимых отказов за время использования средства в операции при условии, что оно не будет готово для использования в необходимый момент времени, а за время операции хотя бы один раз откажет.

При независимости возникновения отказов при хранении и использовании средства по назначению

$$q_{N_{oi}N_{oj}} = q_{N_{oi}} q_{N_{oj}},$$

где  $q_{N_{oi}}$  — вероятность возникновения  $N_{oi}$  независимых неисправностей за время хранения при условии, что к моменту  $t_{н}$  средство не готово для использования по назначению;  $q_{N_{oj}}$  — вероятность возникновения  $N_{oj}$  независимых отказов при использовании средства в операции при условии, что за это время оно хотя бы один раз откажет. Вероятности  $q_{N_{oi}}$  и  $q_{N_{oj}}$  могут быть определены с помощью выражений (4.4.3) и (4.4.6) соответственно.

Из анализа выражений для показателей  $P'_{pi}$ ,  $P''_{pi}$  и  $P'''_{pi}$  следует, что для определения их значений необходимо знать не только интервалы времени  $t_{бр}$ , но и явный вид функции  $P_{Э}(t_{бр})$ , характеризующей зависимость успешности выполнения стоящих перед средством задач от фактического времени его использования в соответствующей операции. Явный вид этой функции может

быть определен при анализе особенностей использования любого конкретного радиоэлектронного средства.

В качестве примера рассмотрим порядок определения показателя  $P'_{pi}$  для одного из средств первой группы, задача которого состоит в обнаружении целей, пересекающих линию  $AB$  (рис. 4.4.1).

Примем, что средство выполняет свои функции по расписанию и имеет следующие свойства. Исправное средство обнаруживает все цели, пересекающие линию  $AB$  в любой ее точке (показатель  $P_{Bi} = 1$ ). Неисправное средство целей, пересекающих линию  $AB$ , не обнаруживает. Нетрудно видеть, что при данных условиях уровень надежности будет единственным фактором, определяющим значение показателя  $P_{pi}$ .

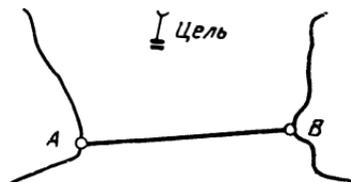


Рис. 4.4.1. К определению показателя  $P'_{pi}$  средств первой группы.

Примем также, что необходимая продолжительность работы средства по назначению в операции равна  $t_{брн}$  и что за счет устранения неисправностей, возникших при хранении, необходимая продолжительность использования средства в операции сокращается на величину  $t_{вхр}$ . Если средство при использовании по назначению работает безотказно, то интервал

$$t'_{бр} = t_{брн} - t_{вхр}.$$

Пусть вероятность пересечения целью линии  $AB$  одинакова для любого момента интервала времени  $t_{брн}$ .

При этом плотность вероятности пересечения целью линии  $AB$

$$f(t) = \frac{1}{t_{брн}},$$

а функция распределения вероятности обнаружения пересечений целью линии  $AB$

$$F(t) = \int_0^{t'_{бр}} \frac{dt}{t_{брн}}$$

или

$$F(t) = \frac{t'_{\text{бп}}}{t_{\text{бпн}}} = \frac{t_{\text{бпн}} - t_{\text{вxp}}}{t_{\text{бпн}}} = 1 - \frac{t_{\text{вxp}}}{t_{\text{бпн}}}.$$

Показатель  $P_{\text{Еi}}(t'_{\text{бп}})$  в заданных условиях есть не что иное, как функция распределения вероятности обнаружения пересечения целью линии АВ, иначе, функция распределения вероятности нахождения аппаратуры в интервале времени  $t_{\text{бпн}}$  в исправном состоянии, т. е. в данном случае показатель

$$P'_{\text{pi}} = P_{\text{Еi}}(t'_{\text{бп}}) = 1 - \frac{t_{\text{вxp}}}{t_{\text{бпн}}}. \quad (4.4.14)$$

#### Определение показателя $P_{\text{pi}}$ для средств второй группы

Рассмотрим временную последовательность подготовки и использования по назначению в операции средств этой группы, представленную на рис. 4.4.2. Обозначения моментов времени на нем аналогичны принятым на предыдущем рисунке данного параграфа.

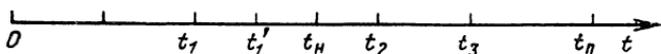


Рис. 4.4.2. К определению показателя  $K_{\text{Г}}$  средств второй группы.

Из анализа особенностей средств второй группы следует, что их показатель  $P_{\text{pi}}$  должен определяться с помощью общего выражения (4.3.12). В этой связи представляется целесообразным установить, что является общим и какие имеются отличия в порядке определения основных элементов показателя  $P_{\text{pi}}$  средств первой и второй групп. Для этого обратимся к особенностям указанных средств, которые описаны в начале данного параграфа. Анализ этих особенностей показывает, что средства первой и второй групп имеют много общего как в характере выполняемых задач, так и в организации эксплуатации и использования их по назначению. Единственное существенное различие между ними состоит в следующем: момент начала использования средств первой группы планируется заранее и известен, а для

средств второй группы он является случайным. Отмеченные общие стороны и отличия средств первой и второй групп позволяют сделать следующие основные выводы о порядке определения основных элементов показателя  $P_{pi}$  радиоэлектронных средств второй группы:

— порядок определения коэффициента  $K_{\Gamma}$  средств второй группы должен отличаться от изложенного выше порядка определения этого показателя для средств первой группы;

— порядок определения значений интервалов  $t_{бр}$  при вычислении показателей  $P'_{pi}$ ,  $P''_{pi}$  и  $P'''_{pi}$  для средств обеих групп является одинаковым. Этот порядок подробно рассмотрен применительно к средствам первой группы, поэтому в данном разделе будет рассмотрен только порядок определения коэффициента готовности для средств второй группы.

Согласно определению, коэффициент  $K_{\Gamma}$  представляет собой вероятность того, что средство будет готово для использования по назначению к необходимому моменту времени  $t_{н}$ , т. е. вероятность выполнения условия  $(t_1, t_2) \leq (t_1, t_{н})$ . В предыдущем параграфе было показано, что в общем случае коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = P(t_{xp}) + K'_{\Gamma},$$

где  $P(t_{xp})$  — вероятность того, что за время хранения, т. е. в интервале  $(0, t_1)$  не возникнет ни одной неисправности, иначе вероятность того, что после хранения в течение времени  $t_{xp}$  средство в момент  $t_1$  будет находиться в исправном состоянии;  $K'_{\Gamma}$  — вероятность того, что возникшие за время хранения  $t_{xp}(0, t_1)$  неисправности будут устранены до момента  $t_{н}$ , т. е. вероятность того, что

$$t_{в xp} \leq (t'_1, t_{н}) \text{ или } t_{в xp} \leq t_{рез}.$$

Рассмотрим особенности определения составных частей коэффициента  $K_{\Gamma}$  для средств второй группы.

Из условий использования средств второй группы следует, что положение момента  $t_1$  для них на оси времени является случайным. Это значит, что и интервал  $t_{xp}$  для этих средств также является случайной величиной, которая в каждом конкретном случае может иметь значение от 0 до  $T_{п}$ .

В ряде случаев может быть известен закон распределения указаний о приведении средств в готовность для

использования по назначению. Это обстоятельство дает возможность определить значение показателя  $P(t_{xp})$  для средств данной группы.

Ниже в качестве иллюстрации рассмотрен порядок определения показателя  $P(t_{xp})$  для одного из наиболее широко применяемых способов использования средств второй группы, когда моменты выдачи указаний о приведении их в готовность в интервале  $(0, t_{п})$  являются равновероятными. При этом будем считать, что для обеспечения высокого значения показателя  $P(t_{xp})$  проводятся профилактические проверки средств с периодом  $T_{п}$ , а обнаруженные при этом неисправности устраняются немедленно.

Будем также считать, что поток возникших неисправностей при хранении по своим свойствам близок к простейшему потоку случайных событий, т. е.

$$\lambda_{xp(t)} = \text{const.}$$

Исправное состояние средства в момент  $t_1$  может быть следствием одного из двух несовместных событий:

— в течение интервала  $(0, t_{п})$  в средстве при хранении неисправностей не возникнет; вероятность этого события равна  $e^{-\Lambda_{xp} T_{п}}$ ;

— в интервале  $(0, t_{п})$  неисправность может возникнуть в момент  $t_0$ , расположенный на оси времени правее точки  $t_1$ ; вероятность этого события обозначим через  $P_{вн}$ .

Очевидно, что для рассматриваемого случая показатель

$$P(t_{xp}) = e^{-\Lambda_{xp} T_{п}} + P_{вн}.$$

Показатель  $P_{вн}$  будет определяться следующим выражением:

$$P_{вн} = \frac{\Lambda_{xp}}{T_{п}} \int_0^{T_{п}} t_{xp} e^{-\Lambda_{xp} t_{xp}} dt_{xp}.$$

Произведя необходимые преобразования, можно показать, что вероятность  $P(t_{xp})$  для данного случая будет определяться следующим выражением:

$$P(t_{xp}) = \frac{1}{\Lambda_{xp} T_{п}} (1 - e^{-\Lambda_{xp} T_{п}}).$$

Если

$$\Lambda_{xp} = \text{const}, \text{ то } \frac{1}{\Lambda_{xp}} = T_{0xp}$$

и

$$P(t_{xp}) = \frac{T_{0xp}}{T_{\pi}} \left( 1 - e^{-\frac{T_{\pi}}{T_{0xp}}} \right). \quad (4.4.15)$$

Остановимся на особенностях определения показателя  $K'_{\Gamma}$  для средств второй группы. Согласно определению показатель  $K'_{\Gamma}$  представляет собой вероятность того, что  $t_{в xp} \leq t_{рез}$  или

$$K'_{\Gamma} = P(N_{0i} \bar{t}_{в} \leq t_{рез}).$$

Этот показатель удобно определять с помощью выражения (4.3.15). При этом значения входящих в (4.3.15) вероятностей  $q_{N_{0i}}$  целесообразно определять для среднего времени хранения средств перед использованием по назначению.

#### Определение показателя $P_{pi}$ для радиоэлектронных средств третьей группы

Напомним, что появление отказов во время использования по назначению средств третьей группы приводит к полному срыву стоящих перед ними задач в соответствующих операциях. Это значит, что показатели  $P''_{pi}$  и  $P'''_{pi}$  средств третьей группы равны нулю.

Таким образом, вероятность успешного выполнения радиоэлектронными средствами третьей группы стоящих задач в соответствующей операции будет определяться выражением

$$P_{pi} = K_{\Gamma} P(t_{брн}) P_{Ei}(t_{брн}) + (1 - K_{\Gamma}) P(t'_{бр}) P_{Ei}(t'_{бр}). \quad (4.4.16)$$

Порядок определения входящих в (4.4.16) показателей  $K_{\Gamma} P(t'_{бр})$  и  $P_{Ei}(t'_{бр})$  будет таким же, как и рассмотренный выше порядок определения аналогичных показателей для средств второй группы.

### Определение показателя $P_{pi}$ для радиоэлектронных средств четвертой группы

Из анализа особенностей средств третьей и четвертой групп следует, что они имеют между собой много общего в организации использования и в характере выполняемых задач. В этой связи показатель  $P_{pi}$  средств четвертой группы, как и средств третьей группы, будет определяться выражением (4.4.16).

При этом порядок определения показателей  $K_r$ ,  $P(t'_{бр})$  и  $P_{Ei}(t'_{бр})$  средств четвертой группы будет таким же, как и рассмотренный выше порядок определения аналогичных показателей средств первой группы.

В заключение отметим следующее. В данном параграфе были рассмотрены особенности определения показателя  $P_{pi}$  для радиоэлектронных средств, которые при эксплуатации могут находиться только в одном из двух состояний — полностью исправном или полностью неисправном.

Для средств, у которых указанные состояния не являются единственными, любое промежуточное состояние связано с появлением неполного отказа. В данном случае средство может использоваться по назначению, однако при этом значение его показателя  $P_{pi}$  будет меньше  $P_{Ei}(t_{брн})$ . Предположим, что подобное радиоэлектронное средство может иметь  $K$  дискретных состояний.

Значение показателя  $P_{pi}$  такого средства будет определяться следующим выражением:

$$P_{pi} = \sum_{i=1}^K P(H_i) P_{pi}/H_i, \quad (4.4.17)$$

где  $P(H_i)$  — вероятность  $i$ -го состояния средства;  $P_{pi}/H_i$  — значение показателя  $P_{pi}$  при условии, что средство находится в  $i$ -м состоянии.

## ОСОБЕННОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

### 5.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Функционирование радиоэлектронных средств связано с приемом, обработкой и измерением параметров различного вида сигналов. Искажение полезных и прием посторонних сигналов мешают указанным средствам качественно выполнять свои функции.

Мешающие сигналы (помехи) могут иметь как непреднамеренный характер (например, индустриальные и атмосферные помехи и т. д.), так и создаваться специально для нарушения нормальной работы радиоэлектронных средств.

Преднамеренные помехи могут создаваться средствами, использующим различные виды сигналов (радио-, гидроакустические, тепловые и т. п.). Принципы применения радио-, гидроакустического, теплового и других подобных видов противодействия соответствующим средствам имеют между собой много общего. В этой связи рассмотренные ниже особенности количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия могут быть использованы и при оценке эффективности средств, которым может создаваться гидроакустическое, тепловое и другие подобные виды противодействия.

Радиопротиводействие влияет на эффективность радиоэлектронных средств в основном путем снижения успешности выполнения стоящих перед ними задач. В этой

связи основным этапом оценки эффективности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия является определение значения показателя  $P_{rip}$ , представляющего собой вероятность успешного выполнения средством стоящих задач в соответствующей операции, осуществляемой в определенных условиях радиопротиводействия. Этот показатель используется в качестве частного критерия эффективности и как основная составная часть других показателей ( $W_{pi}$ ,  $W_p$ ,  $E_p$ ), которые также применяются в качестве критериев при решении задач, основанном на сравнительной оценке эффективности радиоэлектронных средств.

При определении показателя  $P_{rip}$  необходимо учитывать, что использование радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия представляет собой конфликтную ситуацию, в которой цели каждой из сторон прямо противоположны.

Для достижения наилучших результатов в указанной ситуации каждая сторона может выбирать в определенных пределах:

— значения технических характеристик применяемого средства;

— план его использования.

В этих условиях показатель, характеризующий успешность использования радиоэлектронного средства в соответствующей операции, зависит от результата его взаимодействия с используемыми против него средствами противодействия. Этот результат определяется совокупностью технических характеристик подавляемого средства и средств противодействия, планами и особенностями их использования. Таким образом, в общем случае, показатель

$$P_{rip} = P_{rip}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots, x_1, x_2, \dots, \alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \dots, \beta_{n_1}, \beta_{n_2}, \dots, x_{n_1}, x_{n_2}, \dots), \quad (5.1.1)$$

где  $\alpha_{n_1}, \alpha_{n_2}, \dots$  — комплекс технических характеристик средства радиопротиводействия;  $\beta_{n_1}, \beta_{n_2}, \dots$  — комплекс характеристик, описывающих план использования средства радиопротиводействия;  $x_{n_1}, x_{n_2}, \dots$  — комплекс характеристик, описывающих условия применения средств радиопротиводействия.

При оценке эффективности радиоэлектронных средств необходимо также учитывать, что:

— радиопротиводействие может влиять на радиоэлектронные средства только в моменты использования последних по назначению;

— для воздействия на определенные радиоэлектронные средства необходимы соответствующие средства радиопротиводействия.

В этой связи при проведении исследований, связанных с оценкой эффективности радиоэлектронных средств необходимо определить вероятность того, что при использовании по назначению в соответствующей операции они будут подвергаться воздействию помех. Эту вероятность обозначим через  $P_x$ .

Совершенно очевидно, что когда  $P_x=0$  (радиоэлектронное средство при использовании по назначению в соответствующей операции не подвергается воздействию помех), показатель  $P_{rip}$  успешности выполнения средством своих задач в операции будет равен  $P_{ri}$ . В данной главе символом  $P_{ri}$  будем обозначать показатель успешности выполнения средством стоящих задач в операции, осуществляемой в простых условиях. Если  $P_x=1$ , то радиоэлектронное средство будет выполнять свои функции в операции в условиях воздействия помех. Показатель успешности выполнения средством стоящих задач в операции в данных условиях обозначим через  $P_{ripu}$ .

Для определения связи между показателями  $P_{ri}$ ,  $P_{rip}$ ,  $P_x$  и  $P_{ripu}$  рассмотрим следующий наиболее общий пример.

Радиоэлектронное средство используется в условиях, когда в соответствующей операции на него с вероятностью  $P_x$  может воздействовать какое-либо средство радиопротиводействия. Следовательно, в каждой операции средства может иметь место одно из двух несовместных событий:

а) во время операции радиоэлектронное средство будет выполнять свои функции без воздействия помех. Очевидно, что вероятность этого события будет равна  $(1-P_x)$ , а показатель успешности выполнения средством стоящих задач в такой операции —  $P_{ri}$ ;

б) во время операции радиоэлектронное средство будет выполнять свои функции при воздействии помех.

Вероятность этого события равна  $P_x$ , а показатель успешности выполнения средством стоящих задач в такой операции —  $P_{piпу}$ .

При этом показатель успешности выполнения средством решаемой задачи для совокупности операций

$$P_{piп} = P_{pi} (1 - P_x) + P_{piпу} P_x. \quad (5.1.2)$$

Очевидно, что в тех случаях, когда  $P_x=1$ , показатель

$$P_{piп} = P_{piпу}.$$

Таким образом, для определения показателя  $P_{piп}$ , в общем случае, необходимо:

- определить значение показателя  $P_{pi}$ ;
- определить значение показателя  $P_x$ , представляющего собой вероятность того, что исследуемое средство будет выполнять свои функции в соответствующей операции при воздействии помех;
- определить значение показателя  $P_{piпу}$ , характеризующего успешность выполнения средством стоящих задач в операции, осуществляемой в условиях воздействия помех, обладающих определенными характеристиками.

Общие принципы определения показателей  $P_x$  и  $P_{piпу}$  рассмотрены соответственно в § 5.2 и 5.3.

К оценке эффективности средств в условиях радиопротиводействия по своему характеру близка задача оценки их помехозащищенности. Этим термином в литературе характеризуется способность радиоэлектронных средств сохранять свои свойства при использовании в условиях радиопротиводействия. Оценка помехозащищенности радиоэлектронных средств сводится в общем случае к сравнению уровней их свойств в простых и определенных условиях радиопротиводействия. Она осуществляется с помощью соответствующих показателей. Таким образом, для оценки помехозащищенности радиоэлектронного средства необходимо:

- выбрать показатели, которые характеризуют исследуемые свойства соответствующего средства;
- определить значения указанных показателей для простых, а также определенных условий радиопротиводействия и сравнить их между собой.

Если значение выбранного показателя для обычных

условий обозначить  $\Pi_0$ , а для соответствующих условий радиопротиводействия —  $\Pi_n$ , то показатель помехозащищенности может быть определен как

$$P_n = \Pi_n / \Pi_0. \quad (5.1.3)$$

Показатели, используемые для оценки помехозащищенности радиоэлектронных средств, должны отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечивать решение соответствующих задач;
- значения их должны определяться по возможности просто.

В качестве таких показателей могут использоваться любые тактические характеристики средств, каждая из которых описывает какое-либо их свойство.

В большинстве случаев при решении задач, связанных с оценкой помехозащищенности, требуется оценить степень изменения не части, а всей совокупности свойств соответствующих средств. Поскольку совокупность свойств любого средства наиболее полно выражается через его обобщенную характеристику — эффективность, то при решении указанных задач в качестве показателей  $\Pi$  могут использоваться критерии эффективности. Степень изменения эффективности наиболее полно характеризует помехозащищенность любого радиоэлектронного средства.

Из характера выражения (5.1.3) следует, что в качестве показателей  $\Pi$  могут быть использованы как основной критерий эффективности, так и те его составные части, значения которых будут изменяться в заданных условиях радиопротиводействия. Возможность использования в качестве показателей  $\Pi$  составных частей основного критерия эффективности основана на том, что в условиях радиопротиводействия время существования, технический ресурс, число обеспечиваемых операций и стоимость средств практически не меняются.

Кроме указанных соображений при определении вида зависимостей для оценки помехозащищенности соответствующих радиоэлектронных средств необходимо также учитывать их роль в общей системе технического оборудования. Нетрудно видеть, что для автономных радиоэлектронных средств показатель помехозащищенности

может быть определен с помощью следующего выражения:

$$P_{\Pi} = \frac{P_{P_{\Pi}}}{P_{E_{\Pi}}} \quad (5.1.4)$$

Показатель помехозащищенности радиоэлектронных средств, являющихся элементами комплексов и систем, с учетом зависимости (1.2.7) будет иметь следующий вид:

$$P_{\Pi} = \frac{E_{P_{\Pi}}}{E_P} = \frac{\frac{P_{P_{\Pi}}}{\frac{P_{P_{\Pi}}C_P}{K_P} + \frac{P_{(K-P)}iC_{(K-P)}}{K_K}} W_{\Pi}}{\frac{P_{P_i}}{\frac{P_{P_i}C_P}{K_P} + \frac{P_{(K-P)}iC_{(K-P)}}{K_K}} W_i} \quad (5.1.5)$$

В тех случаях, когда  $K_P = K_K$ , показатель

$$P_{\Pi} = \frac{\frac{P_{P_{\Pi}}}{P_{P_{\Pi}}C_P + P_{(K-P)}iC_{(K-P)}} W_{\Pi}}{\frac{P_{P_i}}{P_{P_i}C_P + P_{(K-P)}iC_{(K-P)}} W_i} \quad (5.1.6)$$

При оценке помехозащищенности средств в качестве показателей  $\Pi$  могут использоваться составные части показателя  $P_{P_{\Pi}}$ , значения которых изменяются в исследуемых условиях радиопротиводействия.

В соответствии с определением показателя, характеризующие успешность выполнения средствами стоящих задач в соответствующих операциях, осуществляемых в простых и определенных условиях радиопротиводействия, можно записать в следующем виде:

$$P_{P_i} = P_{\Pi} P_{E_i},$$

$$P_{P_{\Pi}} = P_{\Pi} P_{E_{\Pi}},$$

где  $P_{E_{\Pi}}$  — показатель успешности выполнения стоящих задач в операции, осуществляемой в определенных условиях радиопротиводействия, средством, обладающим абсолютной надежностью. В этой связи наиболее важный показатель помехозащищенности автономных радиоэлектронных средств может быть определен как

$$P_{\Pi} = \frac{P_{E_{\Pi}}}{P_{E_i}} \quad (5.1.7)$$

Итак, оценка помехозащищенности радиоэлектронных средств связана в первую очередь с определением показателей  $P_{\text{Еип}}$  и  $P_{\text{Еi}}$ .

Из анализа выражений (5.1.4) и (5.1.5) следует, что помехозащищенными можно считать средства, у которых показатель  $P_{\text{рип}} = P_{\text{pi}}$ . Это может быть в следующих случаях:

— против радиоэлектронного средства радиопротиводействие не может быть применено. Это может иметь место по целому ряду причин, одна из которых состоит в том, что радиоэлектронное средство имеет такой принцип работы, что при данном уровне науки и техники создание помех его работе невозможно;

— радиоэлектронные средства и средства радиопротиводействия имеют такие параметры, что их совместное использование не ведет к снижению эффективности подавляемых средств. В данном случае средства радиопротиводействия будут неэффективными, а радиоэлектронные средства — устойчивыми против таких помех.

Из выражений (5.1.1) и (5.1.4) также следует, что определенный уровень помехозащищенности радиоэлектронного средства будет иметь место лишь для соответствующих условий радиопротиводействия. При использовании этого же средства в других условиях радиопротиводействия (при совместной работе с другими средствами радиопротиводействия или с теми же средствами, но используемыми по другому плану) его показатель помехозащищенности может быть иным.

## 5.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_x$

Согласно определению показатель  $P_x$  представляет собой вероятность того, что исследуемое радиоэлектронное средство будет выполнять свои функции в соответствующей операции при воздействии помех. Ниже приведены общие принципы определения показателя  $P_x$ , которые вытекают из общих закономерностей совместного использования радиоэлектронных средств и средств радиопротиводействия.

Для того чтобы радиоэлектронное средство в соответствующей операции подверглось воздействию помех, необходимо одновременное выполнение ряда условий, кото-

рые могут быть сформулированы следующим образом:  
— должны быть известны заранее или разведаны местоположение радиоэлектронных средств, подлежащих подавлению, а также те их характеристики, знание которых необходимо для организации противодействия. Важнейшей из числа указанных характеристик является рабочая частота (диапазон) подавляемого средства;

— должно быть применено соответствующее средство радиопротиводействия;

— применяемое средство радиопротиводействия должно обладать такими свойствами, которые обеспечивают попадание его сигналов в приемное устройство подавляемого радиоэлектронного средства во время выполнения последним соответствующей операции.

Названные условия являются необходимыми, но недостаточными для надежного подавления радиоэлектронного средства. Необходимо также, чтобы поступающая на вход приемного устройства помеха была эффективной, т. е. имела такие свойства, которые бы обеспечивали надежный срыв задач, выполняемых подавляемым средством в соответствующей операции.

Примем следующие обозначения:

$P_{\text{раз}}$  — вероятность успешности разведки местоположения и тех характеристик анализируемого радиоэлектронного средства, знание которых необходимо для организации ему противодействия. Значение показателя  $P_{\text{раз}}$  характеризует, с одной стороны, эффективность разведки, а с другой — скрытность соответствующих параметров радиоэлектронных средств;

$P_{\text{вкл}}$  — вероятность включения для подавления исследуемого радиоэлектронного средства станции помех или других средств радиопротиводействия, обладающих необходимыми свойствами;

$P_{\text{пр}}$  — вероятность того, что на вход приемного устройства исследуемого радиоэлектронного средства во время выполнения соответствующей операции будут проникать помехи, создаваемые средствами радиопротиводействия (при условии, что  $P_{\text{раз}} = P_{\text{вкл}} = 1$ ).

Нетрудно видеть, что вероятности  $P_{\text{раз}}$ ,  $P_{\text{вкл}}$ ,  $P_{\text{пр}}$  характеризуют различные стороны независимых условий, которые необходимы для эффективного применения средств радиопротиводействия, поэтому

$$P_x = P_{\text{раз}} P_{\text{вкл}} P_{\text{пр}} \quad (5.2.1)$$

Ниже приведены некоторые общие соображения, относящиеся к порядку определения входящих в (5. 2. 1) показателей.

### Определение показателя $P_{\text{раз}}$

Для организации радиопротиводействия любому радиоэлектронному средству необходимо знать  $K$  его независимых параметров. Если обозначить через  $P_{\text{раз } j}$  вероятность разведки  $j$ -го параметра радиоэлектронного средства, без анализа которого противодействие не может быть организовано, то показатель  $P_{\text{раз}}$  можно определить как

$$P_{\text{раз}} = \prod_{j=1} P_{\text{раз } j}. \quad (5.2.2)$$

Определение числа параметров, подлежащих разведке, а также установление порядка нахождения каждого из них, может быть произведено на основе анализа свойств и особенностей использования соответствующих радиоэлектронных средств и средств радиопротиводействия.

В целях иллюстрации высказанных положений рассмотрим следующий пример. Наземная РЛС непрерывно в течение времени  $t_{\text{брн}}$  ведет обнаружение воздушных целей в заданном секторе. Станция работает на фиксированной рабочей частоте  $f_{\text{рлс}}$ . Самолеты противника в качестве средств радиопротиводействия имеют станции шумовых помех с ненаправленной диаграммой излучения и средства радиоразведки. Нетрудно видеть, что в данном случае для организации противодействия РЛС обнаружения из всего комплекса ее параметров необходимо знать только рабочую частоту, следовательно, при этом показатель

$$P_{\text{раз}} = P_{\text{раз } f}, \quad (5.2.3)$$

где  $P_{\text{раз } f}$  — вероятность разведки рабочей частоты РЛС обнаружения.

Итак, для определения значения показателя  $P_{\text{раз}}$  необходимо:

— с учетом особенностей и организации использования исследуемого радиоэлектронного средства и применяемых против него средств радиопротиводействия определить вид зависимости (5.2.2), т. е. определить вид параметров радиоэлектронного средства, без знания которых невозможно организовать ему противодействие;

— путем сравнительного анализа характеристик и организации использования радиоэлектронного средства и системы радиопротиводействия определить вид зависимости и найти значение для каждой составляющей, входящей в выражение (5.2.2).

### Определение показателя $P_{\text{вкл}}$

По определению показатель  $P_{\text{вкл}}$  представляет собой вероятность использования для подавления исследуемого средства станции помех или другого средства радиопротиводействия, обладающего необходимыми свойствами. Совершенно очевидно, что против определенного радиоэлектронного средства может быть использовано отнюдь не любое средство радиопротиводействия. Для этого последнее должно обладать определенными свойствами. В то же время необходимо иметь в виду, что в ряде случаев одно средство радиопротиводействия может быть использовано для одновременного подавления нескольких радиоэлектронных средств. Средство радиопротиводействия может быть использовано против радиоэлектронного средства, если:

— его рабочий диапазон совпадает с рабочим диапазоном радиоэлектронного средства; вероятность этого события обозначим через  $P_{\text{вкл}f}$ ;

— его диаграмма направленности может быть направлена на подавляемое средство; вероятность этого события обозначим через  $P_{\text{вкл}\theta}$ .

Нетрудно убедиться, что

$$P_{\text{вкл}} = P_{\text{вкл}f} P_{\text{вкл}\theta}. \quad (5.2.4)$$

Значение показателя  $P_{\text{вкл}}$  зависит от соотношения числа имеющихся в определенном районе радиоэлектронных средств и могущих быть использованными про-

тив них средств радиопротиводействия, а также от их свойств. Так, при использовании против радиоэлектронных средств активных помех величина показателя  $P_{\text{вкл}}$  определяется:

— числом используемых в определенном районе радиоэлектронных средств и имеющихся в этом районе средств радиопротиводействия, работающих в диапазоне волн радиоэлектронных средств, подлежащих подавлению;

— параметрами радиоэлектронных средств и, в частности, числом используемых рабочих частот и величиной разноса между ними;

— видом помех, шириной диапазона и диаграммой направленности станций помех;

— организацией использования радиоэлектронных средств и средств радиопротиводействия.

В качестве примера рассмотрим порядок определения показателей  $P_{\text{вкл}_f}$  и  $P_{\text{вкл}_\theta}$  применительно к радиолокационным средствам, используемым в условиях воздействия активных помех. Как известно, активные помехи могут быть прицельными и заградительными по частоте и направлению.

#### *Определение показателя $P_{\text{вкл}_f}$ в условиях применения прицельных по частоте помех*

Прицельной по частоте называется помеха, имеющая сравнительно узкий спектр, способная воздействовать только на один канал многоканального средства или на одно из нескольких расположенных в одном районе одноканальных средств при условии, что частоты этих средств или их каналов разнесены друг от друга.

Если  $\Delta f_p$  — величина разноса рабочих частот двух радиоэлектронных средств (двух каналов одного средства), а  $\Delta f_{\text{п}}$  — ширина спектра станции помех, то помеху следует считать прицельной для тех радиоэлектронных средств, для которых будет выполняться условие  $\Delta f_p > \Delta f_{\text{п}}$ . В этом случае станция помех в один и тот же момент времени может воздействовать по частоте только на одно одноканальное радиоэлектронное средство или на один канал многоканального средства.

Порядок определения показателя  $P_{\text{вкл}_f}$  в случае применения прицельных по частоте помех в значительной

степени зависит от организации использования средств радиопротиводействия.

Средства радиопротиводействия в определенном районе могут использоваться централизованно или децентрализованно. Централизованное использование средств радиопротиводействия основано на оценке радиотехнической обстановки в определенном районе и состоит в централизованном распределении на основании указанной оценки имеющихся средств радиопротиводействия

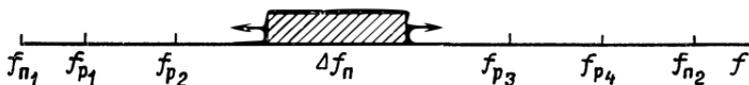


Рис. 5.2.1. К определению показателя  $P_{вкл}$ .

для подавления радиоэлектронных средств. При децентрализованном методе использования оператор каждой станции помех самостоятельно оценивает обстановку и выбирает для подавления одно из радиоэлектронных средств, рабочая частота которого находится в пределах диапазона частот станции помех.

Рассмотрим порядок определения показателя  $P_{вкл}$  в условиях применения прицельных по частоте помех при их централизованном использовании. Обозначим через  $N_{пп}$  число передатчиков прицельных помех, имеющих в данном районе и работающих в диапазоне рабочих частот радиоэлектронных средств, подлежащих подавлению, а через  $M_k$  — число одновременно работающих в диапазоне станций помех частотных каналов или число одноканальных радиоэлектронных средств, рабочие частоты которых отстоят друг от друга не менее чем на ширину спектра станции помех (рис. 5.2.1), который может перемещаться в диапазоне от  $f_{п1}$  до  $f_{п2}$ .

Из рис. 5.2.1 следует, что каналы с рабочими частотами  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$ ;  $f_{p3}$  и  $f_{p4}$  могут подавляться одной станцией прицельных помех, имеющей полосу  $\Delta f_n$ , а для подавления средств с рабочими частотами  $f_{p2}$  и  $f_{p3}$  требуются отдельные станции помех. Следовательно, в данном случае  $M_k = 2$ .

Если все радиоэлектронные средства являются одноканальными и при организации радиопротиводействия нет никаких оснований давать предпочтение любому из

них, то вероятность включения станции помех для подавления каждого средства

$$P_{\text{вкл}_f} = \frac{N_{\text{п п}}}{M_{\text{к}}} \text{ при } N_{\text{п п}} \leq M_{\text{к}}$$

и

$$P_{\text{вкл}_f} = 1 \text{ при } N_{\text{п п}} \geq M_{\text{к}}. \quad (5.2.5)$$

Если радиоэлектронное средство является многоканальным, то вероятность включения станций помех для подавления всех его каналов

$$P'_{\text{вкл}_f} = P_{\text{вкл}_f}^k, \quad (5.2.6)$$

где  $k$  — число каналов радиоэлектронного средства, удовлетворяющего условию  $\Delta f_p > \Delta f_{\text{п}}$ .

При децентрализованном методе управления каждое средство радиопротиводействия используется самостоятельно, независимо от порядка и результатов применения других аналогичных средств. Если при этом имеется  $N_{\text{п п}}$  передатчиков помех определенного диапазона, а подавлению подлежат  $M_{\text{к}}$  каналов или одноканальных средств, то вероятность включения хотя бы одной станции прицельных помех для подавления любого одноканального радиоэлектронного средства или любого канала многоканального средства (при условии, что каждая станция помех с одинаковой вероятностью может быть использована против любого из имеющихся  $M_{\text{к}}$  каналов или одноканальных средств)

$$P_{\text{д вкл}_f} = 1 - \left(1 - \frac{1}{M_{\text{к}}}\right)^{N_{\text{п п}}}. \quad (5.2.7)$$

В качестве иллюстрации порядка определения показателя  $P_{\text{вкл}_f}$  при различных методах использования прицельных по частоте помех рассмотрим следующий пример.

Группа из восьми торпедных катеров атакует соединение надводных кораблей противника. Каждый торпедный катер имеет радиолокационную станцию обнаружения надводных целей и управления торпедной стрельбой. Эти станции являются одноканальными, при этом их рабочие частоты разнесены между собой на величину, большую ширины спектра станций помех, имеющихся на кораблях противника. Атакованное соединение состо-

ит из четырех групп кораблей. Каждая группа кораблей имеет два передатчика прицельных помех в диапазоне радиолокационных станций торпедных катеров.

Если управление средствами радиопротиводействия на соединении атакованных кораблей будет централизованным, то в соответствии с (5.2.5)

$$P_{\text{вкл}_f} = 1.$$

Если же управление средствами радиопротиводействия на соединении атакованных кораблей является децентрализованным, то в соответствии с (5.2.7)

$$P_{\text{д вкл}_f} = 0,656.$$

*Определение показателя  $P_{\text{вкл}_f}$  в условиях применения заградительных по частоте и ретрансляционных помех*

Заградительной по частоте называется помеха, имеющая широкий спектр, способная воздействовать по частоте на два и более каналов многоканального средства или на два и более расположенных в одном районе одноканальных радиоэлектронных средства, рабочие частоты которых находятся в одном диапазоне, но разнесены между собой.

Если  $\Delta f_p$  — величина разноса рабочих частот двух радиоэлектронных средств (двух каналов), а  $\Delta f_n$  — ширина спектра помехи, то помеха будет заградительной для тех радиоэлектронных средств, для которых будет иметь место условие  $\Delta f_p < \Delta f_n$ . Ретрансляционной или ответной называется помеха, которая создается путем принятых сигналов радиоэлектронных средств. Сигналы переизлучения ретрансляционной помехи по многим параметрам (несущая частота, длительность импульса и т. д.) совпадают с сигналами радиоэлектронных средств.

Одной из важнейших характеристик станций ответных помех является полоса частот  $(f_{n_1} - f_{n_2})$ , на которой она может выдавать помехи. Если станция помех может выдавать ответные сигналы в полосе  $(f_{n_1} - f_{n_2}) = \Delta f_n > \Delta f_p$ , то она в этой части будет иметь свойства станции заградительных помех. Такие станции могут быть использованы для одновременного противодействия группе радио-

Электронных средств, расположенных в одном районе и в одном частотном диапазоне.

В случае применения заградительных и ретрансляционных помех определение показателя  $P_{\text{вкл}_f}$  сводится к сравнению диапазона используемых станций помех и радиоэлектронных средств с целью выявления тех радиоэлектронных средств, рабочие частоты которых находятся в диапазоне станций помех. Очевидно, что для радиоэлектронных средств с рабочими частотами, лежащими в пределах диапазона станции помех, показатель  $P_{\text{вкл}_f}$  будет равен единице, а для радиоэлектронных средств с рабочими частотами, лежащими вне диапазона станции помех, показатель  $P_{\text{вкл}_f}$  будет равен нулю.

### *Определение показателя $P_{\text{вкл}_\theta}$*

Напомним, что показатель  $P_{\text{вкл}_\theta}$  представляет собой вероятность того, что диаграмма направленности средства радиопротиводействия может быть направлена на приемное устройство исследуемого радиоэлектронного средства.

Если приемные устройства нескольких радиоэлектронных средств расположены в одном пункте (например, на одном корабле), то они могут быть одновременно накрыты диаграммой направленности одной станции помех. Если же радиоэлектронные средства расположены в различных местах, а ширина диаграммы станции помех достаточно узкая, то по этой причине для подавления каждого радиоэлектронного средства может потребоваться отдельная станция помех.

О средствах радиопротиводействия, диаграмма направленности которых может быть одновременно направлена на приемное устройство только одного из нескольких расположенных в одном районе радиоэлектронных средств, можно говорить как о прицельных по направлению. Когда ширина диаграммы направленности средства радиопротиводействия позволяет одновременно воздействовать на несколько радиоэлектронных средств, расположенных в одном районе, то о таких средствах можно говорить как о заградительных по направлению.

Значение показателя  $P_{\text{вкл}_\theta}$  определяется числом имею-

щихся в одном районе и взаимным расположением радиоэлектронных средств и средств радиопротиводействия, а также шириной диаграммы направленности последних.

Для установления порядка определения показателя  $P_{\text{вкл}\theta}$  рассмотрим рис. 5.2.2.

Пусть средство радиопротиводействия имеет ширину диаграммы направленности, равную  $\theta_{\text{п}}$  (по уровню, обеспечивающему эффективное воздействие на радиоэлек-

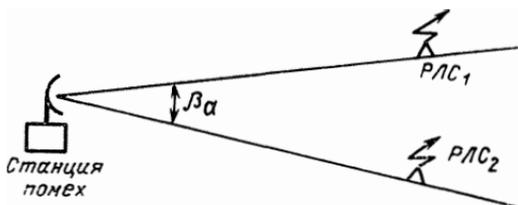


Рис. 5.2.2. К определению показателя  $P_{\text{вкл}\theta}$ .

тронное средство), а величина угла между радиоэлектронными средствами равна  $\beta_a$ . При этом возможны два случая:

а) угол  $\beta_a$  меньше ширины диаграммы направленности  $\theta_{\text{п}}$  станции помех. При этом приемные устройства всех радиоэлектронных средств могут одновременно находиться в диаграмме направленности одного средства радиопротиводействия. В данном случае показатель  $P_{\text{вкл}\theta}$  применительно к каждому радиоэлектронному средству следует считать равным единице;

б) угол  $\beta_a$  между любыми двумя радиоэлектронными средствами больше ширины диаграммы направленности  $\theta_{\text{п}}$  станции помех. Если диаграмма станции помех в этом случае будет направлена на любое радиоэлектронное средство, то приемные устройства других средств не будут накрыты диаграммой направленности этой станции помех. Очевидно, что в данном случае показатель  $P_{\text{вкл}\theta}$  для одного из радиоэлектронных средств будет равен единице, а для остальных — нулю. Если выбор средства, против которого будет использована такая станция помех, является случайным, то при наличии в районе одного такого средства радиопротиводействия

и  $M_K$  радиоэлектронных средств показатель  $P_{\text{вкл}_g}$  будет равен

$$P_{\text{вкл}_g} = \frac{1}{M_K}.$$

Если в районе находится не одно, а несколько таких средств радиопротиводействия, то для определения показателя  $P_{\text{вкл}_g}$  необходимо знать число направлений  $M_H$ , в которых расположены радиоэлектронные средства, удовлетворяющих условию  $\beta_a > \theta_H$ , а также число средств радиопротиводействия и организацию их использования. Величина  $M_H$  может быть определена из следующего выражения:

$$M_H = \frac{\beta_{0a}}{\theta_H}. \quad (5.2.8)$$

где  $\beta_{0a}$  — угол между крайними радиоэлектронными средствами.

При централизованном управлении средствами радиопротиводействия

$$P_{\text{вкл}_g} = \frac{N_{\text{п п}}}{M_H} \text{ при } N_{\text{п п}} \leq M_H$$

и

$$P_{\text{вкл}_g} = 1 \text{ при } N_{\text{п п}} \geq M_H. \quad (5.2.9)$$

При децентрализованном методе управления средствами радиопротиводействия вероятность того, что для воздействия на любое радиоэлектронное средство, находящееся в пределах угла  $\beta_{0a}$ , будет использовано хотя бы одно средство радиопротиводействия (при условии, что вероятность включения средств радиопротиводействия для подавления любого радиоэлектронного средства является одинаковой)

$$P_{\text{вкл}_g} = 1 - \left(1 - \frac{1}{M_H}\right)^{N_{\text{п п}}}. \quad (5.2.10)$$

В качестве иллюстрации порядка определения показателя  $P_{\text{вкл}_g}$  рассмотрим следующий пример.

Предположим, что торпедные катера четырьмя группами по восемь катеров атакуют соединение кораблей противника с четырех направлений. На каждом катере имеется радиолокационная станция, обеспечи-

вающая обнаружение надводных целей и управление торпедной стрельбой. Атакуемое соединение имеет четыре станции помех, имеющие такие характеристики, что при принятой организации атаки торпедных катеров будет иметь место условие  $\beta_a > \theta_p$ . Тогда для каждой радиолокационной станции при централизованном управлении средствами радиопротиводействия показатель  $P_{\text{вкл}_g} = 1$ , а при децентрализованном управлении этими средствами —  $P_{\text{вкл}_g} = 0,69$ .

В заключение заметим следующее. При рассмотрении путей определения показателя  $P_{\text{вкл}_g}$  предполагалось, что диаграммы станций помех и радиоэлектронных средств, подлежащих подавлению, расположены в одной плоскости. В ряде случаев это условие не будет выполняться, в связи с чем необходимо рассматривать совпадение диаграмм направленности станций помех и подавляемых средств в двух плоскостях — горизонтальной и вертикальной.

Указанное обстоятельство не вносит принципиальных особенностей при определении показателя  $P_{\text{вкл}_g}$ . В последнем случае показатель  $P_{\text{вкл}_g}$  будет состоять из двух сомножителей, порядок определения каждого из которых будет аналогичен рассмотренному выше.

### *Определение показателя $P_{\text{пр}}$*

Согласно определению показатель  $P_{\text{пр}}$  представляет собой условную вероятность ( $P_{\text{раз}} = P_{\text{вкл}} = 1$ ) попадания сигналов средства радиопротиводействия в приемное устройство подавляемого радиоэлектронного средства при выполнении последним соответствующей операции. Из анализа особенностей использования радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия следует, что значение показателя  $P_{\text{пр}}$  зависит от:

— точности настройки станции помех или другого применяемого средства радиопротиводействия на частоту радиоэлектронного средства, а также соотношения ширины спектра помех и полосы пропускания приемного устройства подавляемого средства;

— точности наведения (по направлению) диаграммы направленности средства радиопротиводействия на по-

давяемое радиоэлектронное средство, а также ширины этой диаграммы;

— быстродействия системы радиопротиводействия и продолжительности использования радиоэлектронного средства по назначению в соответствующей операции, а также времени нахождения радиоэлектронного средства в зоне действия используемых против него средств радиопротиводействия.

Обозначим через:

$P_{\text{пр}f}$  — вероятность того, что средство радиопротиводействия будет так настроено на рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства, что сигналы помехи попадут в полосу пропускания его приемного устройства;

$P_{\text{пр}g}$  — вероятность того, что средство радиопротиводействия будет так наведено по направлению на подавляемое радиоэлектронное средство, что приемное устройство последнего будет накрыто диаграммой направленности используемого против него средства радиопротиводействия. Если приемное устройство подавляемого средства не является всенаправленным, то показатель  $P_{\text{пр}g}$  будет представлять собой вероятность совпадения диаграмм направленности средства противодействия и подавляемого средства;

$P_{\text{пр}z}$  — вероятность того, что сигналы средства радиопротиводействия попадут в приемное устройство подавляемого радиоэлектронного средства во время выполнения последним соответствующей операции (при условии, что  $P_{\text{пр}f} = P_{\text{пр}g} = 1$ ).

Поскольку причины, влияющие на показатели  $P_{\text{пр}f}$ ,  $P_{\text{пр}g}$  и  $P_{\text{пр}z}$  независимы друг от друга, то

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}f} P_{\text{пр}g} P_{\text{пр}z}. \quad (5.2.11)$$

#### *Определение показателя $P_{\text{пр}f}$*

Значение показателя  $P_{\text{пр}f}$  определяется точностью настройки средства радиопротиводействия на рабочую частоту радиоэлектронного средства, а также соотношением ширины спектра помех и полосы пропускания приемного устройства подавляемого средства.

Точность настройки средства радиопротиводействия на рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства зависит от двух факторов:

— точности измерения рабочей частоты подавляемого радиоэлектронного средства. Эта точность может быть охарактеризована срединной ошибкой ( $E_{fp}$ ) измерения указанной рабочей частоты;

— точности настройки средства радиопротиводействия на измеренную рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства. Эта точность может быть охарактеризована срединной ошибкой ( $E_{fn}$ ) настройки.

Срединная суммарная ошибка настройки средства радиопротиводействия на рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства ( $E_{fc}$ ) зависит от величины  $E_{fp}$  и  $E_{fn}$ , а также вида их взаимосвязи. Если ошибки измерения рабочей частоты радиоэлектронного средства и настройки на измеренную частоту средства радиопротиводействия независимы друг от друга, то

$$E_{fc} = \sqrt{E_{fp}^2 + E_{fn}^2}. \quad (5.2.12)$$

Если суммарная ошибка наведения средства радиопротиводействия на рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства имеет нормальное распределение и систематические ошибки при наведении отсутствуют, то вероятность того, что сигналы помехи, имеющей ширину спектра  $(f_{n_1} - f_{n_2})$ , попадут в полосу пропускания  $(f_{p_1} - f_{p_2})$  приемного устройства подавляемого радиоэлектронного средства

$$P_{\text{пр}_f} = \hat{\Phi} \left[ \frac{(f_{p_1} - f_{p_2}) + (f_{n_1} - f_{n_2})}{2E_{fc}} \right]. \quad (5.2.13)$$

Для ретрансляционных помех, частота которых совпадает с частотой радиоэлектронных средств ( $E_{fc} = 0$ ), показатель  $P_{\text{пр}_f} = 1$ .

В случае применения заградительных по частоте помех, ширина полосы которых перекрывает возможную суммарную ошибку настройки средства радиопротиводействия на рабочую частоту подавляемого радиоэлектронного средства  $[(f_{n_1} - f_{n_2}) \gg E_{fc}]$ , величина показателя  $P_{\text{пр}_f}$  также будет равна единице.

## Определение показателя $P_{\text{пр}\theta}$

Рассмотрение путей определения показателя  $P_{\text{пр}\theta}$  проведем для случая, когда диаграмма приемного устройства подавляемого средства является всенаправленной и находится в одной плоскости с диаграммой направленности средства радиопротиводействия.

Величина показателя  $P_{\text{пр}\theta}$  в этом случае будет определяться точностью наведения диаграммы направленности средства радиопротиводействия на подавляемое радиоэлектронное средство, а также шириной этой диаграммы. Точность наведения диаграммы направленности средства радиопротиводействия на подавляемое радиоэлектронное средство при этом будет определяться двумя факторами:

— точностью определения направления на радиоэлектронное средство, подлежащее подавлению, которая может быть охарактеризована срединной ошибкой  $E_{\theta\text{р}}$ ;

— точностью наведения диаграммы направленности средства радиопротиводействия на определенное направление, которая может быть охарактеризована срединной ошибкой  $E_{\theta\text{н}}$ .

Срединная суммарная ошибка наведения диаграммы направленности средства радиопротиводействия на подавляемое радиоэлектронное средство ( $E_{\theta\text{с}}$ ) зависит от величин  $E_{\theta\text{р}}$  и  $E_{\theta\text{н}}$ , а также вида их взаимосвязи.

Если ошибки определения направления и наведения диаграммы направленности не зависимы друг от друга, то

$$E_{\theta\text{с}} = \sqrt{E_{\theta\text{р}}^2 + E_{\theta\text{н}}^2}. \quad (5.2.14)$$

Если суммарная ошибка наведения диаграммы направленности средства радиопротиводействия на подавляемое радиоэлектронное средство имеет нормальное распределение, диаграмма направленности средства радиопротиводействия имеет ширину, равную  $\theta_{\text{п}}$ , а систематические ошибки при наведении отсутствуют, то вероятность накрытия подавляемого радиоэлектронного средства диаграммой направленности средства радиопротиводействия

$$P_{\text{пр}\theta} = \hat{\Phi} \left( \frac{\theta_{\text{п}}}{2E_{\theta\text{с}}} \right). \quad (5.2.15)$$

В случае применения заградительных по направлению помех, ширина диаграммы которых перекрывает возможную ошибку наведения средства радиопротиводействия по направлению на подавляемое радиоэлектронное средство ( $\theta_n \geq 4E_{gc}$ ), величина показателя  $P_{пр0}$  практически будет равна единице. Это может иметь место, например, в случае применения ненаправленных средств радиопротиводействия.

Когда наведение диаграммы направленности средства радиопротиводействия на подавляемое радиоэлектронное средство необходимо осуществлять в двух плоскостях, выражение для определения показателя  $P_{пр0}$  будет состоять из произведения двух показателей типа (5.2.15). Каждый из этих сомножителей характеризует вероятность накрытия подавляемого радиоэлектронного средства диаграммой направленности средства радиопротиводействия в соответствующей плоскости.

#### *Определение показателя $P_{прt}$*

Показатель  $P_{прt}$  представляет собой условную вероятность попадания сигнала помехи на вход приемного устройства подавляемого радиоэлектронного средства во время выполнения последним соответствующей операции (при условии, что  $P_{прf} = P_{пр0} = 1$ ). Величина показателя  $P_{прt}$  определяется в первую очередь продолжительностью использования радиоэлектронных средств в соответствующих операциях и быстродействием применяемых против них средств радиопротиводействия. Кроме того, на значение показателя  $P_{прt}$  влияют те особенности использования названных средств, которые определяют продолжительность пребывания радиоэлектронных средств в зоне действия средств радиопротиводействия.

Как уже указывалось, любое радиоэлектронное средство в соответствующей операции используется вполне определенное время, которое в ряде случаев может быть достаточно малым. Вместе с тем каждая система радиопротиводействия имеет вполне определенное быстродействие, которое характеризуется интервалом времени от момента попадания сигналов радиоэлектронного средства в разведывательное устройство до момента выдачи

помехи. Величина этого интервала ( $t_{pн}$ ) зависит от технического уровня средств разведки и создания помех, а также от организации их использования.

Если  $P_{пг} = P_{пф} = 1$ , то помеха будет проникать в приемное устройство радиоэлектронного средства и иметь возможность влиять на успешность выполняемой им задачи лишь в том случае, когда будет иметь место следующее неравенство:

$$t_{брз} - t_{пн} > 0, \quad (5.2.16)$$

где  $t_{брз}$  — продолжительность нахождения радиоэлектронного средства при выполнении соответствующей операции в зоне действия системы радиопротиводействия.

Отличие времени  $t_{брз}$  от  $t_{пн}$  может иметь место из-за относительного перемещения средства радиопротиводействия и радиоэлектронного средства при выполнении последним соответствующей операции. В ряде случаев, например, когда взаимное расположение в пространстве средства радиопротиводействия и радиоэлектронного средства со временем не меняется, время  $t_{брз}$  может быть равно  $t_{пн}$ .

Вероятность проникновения помехи в приемное устройство радиоэлектронного средства при выполнении последним соответствующей операции при нормальном законе распределения случайной величины  $t_{пн}$  может быть определена с помощью следующего выражения:

$$P_{пг} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \hat{\Phi} \left( \frac{t_{брз} - \bar{t}_{пн}}{E_{t_{пн}}} \right) \right], \quad (5.2.17)$$

где  $\bar{t}_{пн}$  — среднее значение случайной величины  $t_{пн}$ ;  $E_{t_{пн}}$  — среднее отклонение случайной величины  $t_{пн}$ .

В ряде случаев радиоэлектронные средства действуют по целям, на которых расположены средства радиопротиводействия. Допустим, что относительное положение в пространстве такого радиоэлектронного средства и цели со временем изменяется. Предположим также, что работа радиоэлектронных средств по целям связана с использованием отраженных сигналов, а разведка работает с использованием последних. В этих условиях средства разведки имеют принципиальную возможность иметь

большую дальность обнаружения работы радиоэлектронных средств по сравнению с дальностью действия последних по целям, имеющим в своем составе средства разведки и противодействия. Примером такой ситуации может служить процесс обнаружения наземной РЛС самолетов, оборудованных средствами разведки и радиопротиводействия. В данном случае за счет возможной разности в дальности действия радиоэлектронного средства и средств разведки появляется дополнительное время на организацию радиопротиводействия.

Величина этого дополнительного времени

$$t_d = \frac{D_p - D_{об}}{V_{отн}},$$

где  $D_p$  — дальность разведки сигналов радиоэлектронного средства;  $D_{об}$  — дальность обнаружения радиоэлектронным средством цели, на которой расположены средства разведки и радиопротиводействия.

Наличие дополнительного времени эквивалентно увеличению продолжительности использования радиоэлектронного средства в соответствующей операции.

В этой связи для данного случая значение показателя

$$P_{пр_t} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{t_{брз} + t_d - \bar{t}_{пр}}{E_{t_{пр}}} \right) \right]. \quad (5.2.18)$$

### 5.3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ $P_{рипу}$

Определение значения показателя  $P_{рипу}$  является основным моментом при оценке эффективности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия, а также при оценке их помехозащищенности.

Необходимо отметить, что определение показателя  $P_{рипу}$  является также самым сложным этапом при оценке эффективности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия. Трудности определения показателя  $P_{рипу}$  связаны со следующими обстоятельствами.

Согласно определению показатель  $P_{рипу}$  представляет собой вероятность успешного выполнения средством стоящих задач в операции, осуществляемой в условиях, когда  $P_{раз} = P_{вкл} = P_{пр} = 1$ . Указанные условия означают только то, что радиоэлектронное средство при выполне-

нии своих функций будет подвергаться воздействию помех. Вместе с тем они не показывают, начиная с какого момента операции помеха будет воздействовать на радиоэлектронное средство, а также не раскрывают интенсивности и других характеристик этой помехи.

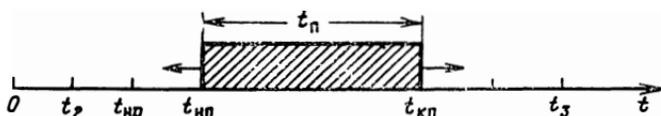


Рис. 5.3.1. К рассмотрению путей определения показателя  $P_{рпш}$ .

Отмеченное обстоятельство рассмотрим подробнее, для чего обратимся к рис. 5.3.1, на котором приняты следующие обозначения:

$t_2$  — момент начала использования средства по назначению в соответствующей операции;

$t_{np}$  — момент начала поступления сигналов радиоэлектронного средства в разведывательное устройство системы радиопротиводействия;

$t_{кп}$  — момент начала выдачи помех радиоэлектронному средству;

$t_{кп}$  — момент окончания выдачи помех радиоэлектронному средству;

$t_3$  — момент окончания использования средства в соответствующей операции.

Из рис. 5.3.1 следует, что в принципе возможны два случая расположения интервала  $(t_{np}, t_{кп})$  на отрезке  $(t_2, t_3)$ :

$$1) (t_{np}, t_{кп}) < (t_2, t_3).$$

При этом время выполнения радиоэлектронным средством соответствующей операции состоит из двух частей:

—  $(t_2, t_{np})$  и  $(t_{кп}, t_3)$ , в течение которой средство выполняет свои функции в простых условиях;

—  $(t_{np}, t_{кп})$ , в течение которой средство подвергается воздействию помех.

$$2) (t_{np}, t_{кп}) \geq (t_2, t_3) \text{ при этом } t_{np} \leq t_2 \text{ и } t_{кп} \geq t_3.$$

В данном случае радиоэлектронное средство в течение всего времени выполнения соответствующей операции подвергается воздействию помех. Если показатель  $P_{пр}$  равен единице, то это значит только то, что в соответствующей

операции на вход приемного устройства средства будет поступать сигнал помехи. Вместе с тем равенство показателя  $P_{\text{пр}_t}$  единице не дает ответа на вопрос, начиная с какого момента операции и в течение какой ее части помеха будет воздействовать на радиоэлектронное средство, а также какую интенсивность будет иметь помеха на входе приемного устройства этого средства.

По аналогии с изложенным равенство показателей  $P_{\text{пр}_f}$  и  $P_{\text{пр}_\theta}^i$  единице означает лишь то, что радиоэлектронное средство при обеспечении операции будет подвергаться воздействию помех по частоте и направлению. Вместе с тем равенство единице показателей  $P_{\text{пр}_f}$  и  $P_{\text{пр}_\theta}$  совершенно не дает ответа на вопрос, на какую часть полосы пропускания приемного устройства радиоэлектронного средства будут приходиться сигналы помехи (особенно при применении прицельных по частоте помех), или на каком уровне диаграмма направленности средства радиопротиводействия будет направлена на подавляемое радиоэлектронное средство (особенно при применении прицельных по направлению помех).

Другая основная трудность определения показателя  $P_{\text{рпту}}$  состоит в следующем. Во многих случаях в течение времени осуществления соответствующей операции условия радиопротиводействия для подавляемого средства могут изменяться, при этом подчас непрерывно. Это положение может иметь место, например, при изменении в ходе операции взаимного расположения в пространстве средства радиопротиводействия и подавляемого радиоэлектронного средства.

Для определения наиболее общих путей нахождения показателя  $P_{\text{рпту}}$  вернемся к рис. 5.3.1.

Обозначим:  $(t_2, t_{\text{нп}}) + (t_{\text{кп}}, t_3) = t_c$  и  $(t_{\text{нп}}, t_{\text{кп}}) = t_n$ . Очевидно, что  $t_c + t_n = (t_2, t_3) = t_{\text{брп}}$ .

Когда  $(t_{\text{нп}}, t_{\text{кп}}) < (t_2, t_3)$ , то показатель успешности выполнения радиоэлектронным средством стоящей задачи в операции можно записать в следующем виде:

$$P_{\text{рпту}} = P_{\text{рпту}}(t_{\text{брп}}),$$

где  $t_{\text{брп}} = t_c + t_n$ .

Когда  $(t_2, t_3) \leq (t_{нп}, t_{кп})$  и  $t_c = 0$ ,  $t_{п} = t_{брп}$ , то показатель успешности выполнения радиоэлектронным средством стоящей задачи в соответствующей операции можно записать как

$$P_{рiпу} = P_{рiпу}(t_{п}).$$

Приведенные соображения показывают, что для определения показателя  $P_{рiпу}$  в общем случае необходимо:

— определить соотношение интервалов времени  $t_c$  и  $t_{п}$  в соответствующей операции;

— определить характеристики сигналов помех на входе приемного устройства подавляемого радиоэлектронного средства. Если условия радиопротиводействия в ходе соответствующей операции изменяются, то указанные характеристики должны быть определены для каждого момента интервала  $t_{п}$ ;

— определить тактические характеристики радиоэлектронного средства в условиях поступления на его вход помехи с параметрами, определенными в предыдущем пункте. Значения указанных характеристик должны быть определены при необходимости для всех моментов времени соответствующей операции;

— используя найденные значения тактических характеристик, с помощью зависимости типа (1.1.14) определить показатель  $P_{рiпу}$ .

#### *Определение соотношения между интервалами времени $t_c$ и $t_{п}$*

Соотношение между интервалами  $t_c$  и  $t_{п}$  в операции, осуществляемой в условиях радиопротиводействия, зависит от:

— характера и продолжительности операции;

— взаимного положения радиоэлектронного средства и используемого против него средства радиопротиводействия, а также их относительного перемещения в ходе операции;

— принципа работы и характеристик радиоэлектронного средства;

— организации использования и характеристик системы радиопротиводействия.

Для установления соотношения между интервалами  $t_c$  и  $t_{п}$  необходимо определить на оси времени располо-

жение моментов  $t_{нр}$ ,  $t_{нп}$  и  $t_{кп}$  при осуществлении соответствующей операции.

Расположение моментов  $t_{нр}$ ,  $t_{нп}$  и  $t_{кп}$  на оси времени зависит от условий использования радиоэлектронных средств и системы радиопротиводействия и может быть установлено при анализе конкретной ситуации. Для иллюстрации этого положения рассмотрим следующий пример (см. рис. 5.3.1).

Допустим, корабль использует против корабля противника ракету с активной радиолокационной головкой самонаведения, которая включается в момент старта ( $t_2$ ). Продолжительность работы этой головки  $(t_2, t_3) = t_{брн}$  зависит от дальности стрельбы и скорости полета ракеты. Корабль противника для защиты от подобных ракет имеет систему радиопротиводействия, состоящую из средств разведки и станции помех. Летящая ракета будет обнаружена средствами разведки корабля противника в момент  $t_{нр}$ . Положение момента  $t_{нр}$  на оси времени зависит от траектории и скорости полета ракеты, а также соответствующих характеристик головки самонаведения и разведывательного устройства. В момент  $t_{нп}$  начинается выдача помехи головке самонаведения.

Для указанной головки самонаведения интервал

$$t_{п} = \frac{D_p}{V_{отн}} - t_{рп}, \quad (5.3.1)$$

где  $D_p$  — дальность разведки работы головки самонаведения.

Тогда интервал

$$t_c = t_{брн} - \left( \frac{D_p}{V_{отн}} - t_{рп} \right)$$

или

$$t_c = \frac{D_c - D_p}{V_{отн}} + t_{рп}, \quad (5.3.2)$$

где  $D_c$  — дальность стрельбы.

*Определение характеристик сигналов  
радиопротиводействия на входе приемного устройства  
подавляемого радиоэлектронного средства*

Не рассматривая этот вопрос специально, укажем, что описанные в литературе методы дают принципиальную возможность аналитически определить уровень и

другие характеристики сигналов радиопротиводействия на входе приемного устройства, если известны взаимное положение в пространстве подавляемого радиоэлектронного средства и источника помех, а также их необходимые характеристики (мощность излучения, диаграмма направленности, поляризация и т. д.).

### Определение значения показателя $P_{р\dot{i}пу}$

Вначале рассмотрим этот вопрос для случая, когда  $t_c = 0$  и  $t_{\pi} = t_{брн}$ , т. е. когда радиоэлектронное средство в течение всего времени выполнения операции находится под воздействием помех.

Любое радиоэлектронное средство, используемое по определенному плану и в определенных условиях, обладает комплексом тактических характеристик, часть из которых однозначно определяет показатель успешности выполнения стоящей перед ним задачи в операции. При использовании средства в условиях радиопротиводействия значения отдельных его тактических характеристик могут быть иными, чем в простых условиях. Если обозначить комплекс тактических характеристик средства, используемого в определенных условиях радиопротиводействия, через  $A_{\pi 1}, A_{\pi 2}, \dots, A_{\pi j}, \dots$ , то его показатель  $P_{р\dot{i}пу}$  при этом можно определить как

$$P_{р\dot{i}пу} = P_{р\dot{i}}(A_{\pi 1}, A_{\pi 2}, \dots, A_{\pi j}, \dots). \quad (5.3.3)$$

Следовательно, для определения показателя  $P_{р\dot{i}пу}$  радиоэлектронного средства, используемого в условиях радиопротиводействия (когда  $t_{\pi} = t_{брн}$ ), в первую очередь необходимо найти значения его соответствующих тактических характеристик в этих условиях. Здесь необходимо отметить, что современные методы анализа радиоэлектронных устройств [11 и др.] дают принципиальную возможность определить значения ряда тактических характеристик радиоэлектронного средства для заданных условий радиопротиводействия. Значения этих характеристик могут быть определены и путем проведения испытаний радиоэлектронных средств в заданных условиях радиопротиводействия.

Как уже указывалось в наиболее общем случае радиоэлектронное средство часть времени  $t_{брн}$  может выполнять свои функции в простых условиях, а другую

часть — при воздействии помех. В этом случае трудности определения показателя  $P_{\text{рп}}^{\text{пу}}$  значительно возрастают. Это связано с тем, что в моменты  $t_{\text{нп}}$  и  $t_{\text{кп}}$  тактические характеристики средства могут резко изменять свои значения, что может привести к резкому изменению характера функционирования средства. В данном случае для показателя  $P_{\text{рп}}^{\text{пу}}$  можно написать следующее общее выражение:

$$P_{\text{рп}}^{\text{пу}} = P_{\text{рп}}^{\text{п}}(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_{\text{п1}}, A_{\text{п2}}, \dots, A_{\text{пj}}) \Big|_{\substack{A_1, A_2, \dots \text{ в интервале } (t_{\text{нп}} - t_2), \\ A_{\text{п1}}, A_{\text{п2}}, \dots \text{ в интервале } (t_3 - t_{\text{нп}})}} \quad (5.3.4)$$

Вид выражения (5.3.4) и способ его вычисления для различных видов радиоэлектронных средств могут быть установлены при анализе особенностей и организации использования последних. Для иллюстрации приведем следующий пример. Радиолокационная станция управления стрельбой зенитной артиллерии сопровождает цель и выдает ее точные координаты в счетно-решающее устройство, начиная с дальности  $D_y$ .

Примем, что выдача помехи РЛС начинается через время  $t_{\text{нп}}$  после начала сопровождения ею цели и продолжается до прохождения целью станции. В этом случае показатель

$$P_{\text{рп}}^{\text{пу}} = P_{\text{рп}}^{\text{п}}(E_{\text{д}}, E_{\alpha}, E_{\epsilon}, E_{\text{пд}}, E_{\text{п}\alpha}, E_{\text{п}\epsilon}) \Big|_{\substack{E_{\text{д}}, E_{\alpha}, E_{\epsilon} \text{ в интервале } (t_{\text{нп}} - t_2), \\ E_{\text{пд}}, E_{\text{п}\alpha}, E_{\text{п}\epsilon} \text{ в интервале } (t_3 - t_{\text{нп}})}} \quad (5.3.5)$$

где  $E_{\text{д}}, E_{\alpha}, E_{\epsilon}, E_{\text{пд}}, E_{\text{п}\alpha}, E_{\text{п}\epsilon}$  — срединные ошибки сопровождения цели по дальности, азимуту, углу места в простых условиях и заданных условиях радиопротиводействия соответственно. Если выдаваемая помеха приводит радиолокационную станцию в полностью неработоспособное состояние, то в этом случае показатель

$$P_{\text{рп}}^{\text{пу}} = P_{\text{рп}}^{\text{п}}(E_{\text{д}}, E_{\alpha}, E_{\epsilon}, t_{\text{бр}}) \Big|_{t_{\text{бр}} = (t_{\text{нп}} - t_2)} \quad (5.3.6)$$

Приведенные соображения показывают, что нет никаких принципиальных причин, которые бы мешали определить показатель  $P_{\text{рп}}^{\text{пу}}$ , а следовательно, и количественно оценить эффективность радиоэлектронных

средств в условиях радиопротиводействия. Приведенные соображения также показывают, что определение показателя  $P_{piпу}$  в общем случае требует выполнения большого количества вычислений. Особенно усложняется определение этого показателя, когда условия радиопротиводействия изменяются в процессе соответствующей операции.

Показатель  $P_{piпу}$  сравнительно просто может быть определен только в редких случаях. Укажем один из них. Радиолокационная станция предназначается для обнаружения воздушных целей и определения их координат. Примем, что показатель успешности выполнения этой РЛС элементарной операции (обнаружения одиночной цели)

$$P_{pi} = \frac{D}{D_n} \text{ при } D \leq D_n$$

и

$$P_{pi} = 1 \text{ при } D \geq D_n.$$

Предположим, что для противодействия указанной РЛС применяются передатчики заградительных по частоте и направлению шумовых помех, установленные на целях. Примем также, что РЛС и средства радиопротиводействия имеют такие параметры и организацию использования, при которых  $t_c = 0$  и  $t_{п} = t_{брн}$ . В данном случае в течение всей операции РЛС будет выполнять свои функции при воздействии помех.

Известно, что воздействие шумовых помех может привести к снижению дальности действия РЛС. Дальность обнаружения цели в условиях шумовых помех ( $D_{пом}$ ) может быть определена аналитическим путем [11] или экспериментально. Тогда показатель  $P_{piпу}$  указанной РЛС в заданных условиях радиопротиводействия

$$P_{piпу} = \frac{D_{пом}}{D_n}.$$

Успешному выполнению сложных и громоздких вычислений, связанных с количественной оценкой эффективности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия, может способствовать применение современных электронно-вычислительных машин.

## НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБИТЕЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\alpha$  — азимут цели;
- $\alpha_i$  —  $i$ -я техническая характеристика средства;
- $A_j$  —  $j$ -я тактическая характеристика средства;
- $A_p$  — результат использования средства в единицу времени;
- $\lambda(t), \Lambda(t)$  — интенсивность отказов при работе;
- $\lambda_{xp}(t), \Lambda_{xp}(t)$  — интенсивность возникновения неисправностей при хранении;
- $\beta_i$  —  $i$ -й элемент плана или метода использования средства;
- $C$  — стоимость автономного средства (комплекса);
- $C_p$  — стоимость радиоэлектронного средства;
- $D$  — дальность действия средства;
- $D_{н}$  — необходимая дальность действия средства;
- $D_o$  — оптимальная дальность использования оружия;
- $D_c$  — дальность использования оружия (стрельбы);
- $\epsilon$  — угол места цели;
- $E_d, E_\alpha, E_\epsilon$  — срединные ошибки измерения дальности, азимута и угла места соответственно;
- $E$  — основной критерий эффективности автономного средства (комплекса);
- $E_p$  — основной критерий эффективности радиоэлектронного средства;
- $K_r$  — коэффициент готовности;
- $K_{и}$  — коэффициент использования средства по назначению;
- $K_k$  — количество операций, выполняемых комплексом или автономным средством;
- $K_p$  — количество операций, выполняемых радиоэлектронным средством;
- $M(X)$  — среднее значение (математическое ожидание) случайной величины  $X$ ;
- $P(A)$  — вероятность события (результата)  $A$ ;
- $P_{дi}$  — вероятность доставки снаряда в район цели с необходимой точностью;
- $P_{ji}$  — вероятность успешного выполнения  $j$ -м элементом стоящей задачи в операции;
- $P_{ki}$  — вероятность поражения цели комплексом оружия в операции;

- $P_{oi}$  — показатель успешности выполнения средством обнаружения стоящей задачи в операции;
- $P_{pi}$  — показатель успешности выполнения радиоэлектронным средством стоящей задачи в операции;
- $P_{yi}$  — показатель успешности выполнения системой управления стоящей задачи в операции;
- $P(t)$  — вероятность безотказной работы за время  $t$ ;
- $P(t_{xp})$  — вероятность сохранения исправного состояния средства за время  $t_{xp}$ ;
- $P_x$  — вероятность того, что соответствующая операция средством будет выполняться в условиях воздействия помех;
- $P_{ci}$  — показатель успешности выполнения средством целеуказания стоящей задачи в операции;
- $P_{Ei}$  — показатель потенциальной эффективности радиоэлектронного средства в операции;
- $t_{бр}$  — фактическое время приведения средства в состояние готовности для использования по назначению;
- $t_{брн}$  — максимально допустимое время приведения средства в состояние готовности для использования по назначению;
- $t_{бр}$  — фактическое время использования (боевой работы) средства в операции;
- $t_{брн}$  — необходимое время использования (боевой работы) средства в операции;
- $t_{вкл}$  — время включения исправной аппаратуры;
- $T_0$  — среднее время безотказной работы;
- $T_{охр}$  — среднее время безотказного хранения;
- $t_{пол}$  — время полета снаряда;
- $T_p$  — технический ресурс средства;
- $T_c$  — суммарная продолжительность использования средства по назначению;
- $t_{xp}$  — время хранения;
- $T_{xp}$  — суммарная продолжительность хранения;
- $V_{отн}$  — относительная скорость;
- $V_{ц}$  — скорость цели;
- $W$  — результат использования по назначению автономного средства (комплекса);

- $W_i$  — результат использования автономного средства (комплекса) в операции;
- $W_p$  — результат использования радиоэлектронного средства;
- $W_{pi}$  — результат использования радиоэлектронного средства в операции;
- $x_i$  —  $i$ -й элемент условий, в которых используется средство.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев А. А., Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения. Воениздат, 1964.
2. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. Изд-во «Советское радио», 1964.
3. Вентцель Е. С. Тесрия вероятностей. Изд. ФМЛ, 1962.
4. Волховер Х. Г. и др. Обобщенная эффективность как критерий сравнения работы сложных систем. «Вопросы радиоэлектроники», серия XII, вып. 12, 1965.
5. Гуткин Л. С. Принципы радиоуправления беспилотными объектами. Изд-во «Советское радио», 1959.
6. Кузнецов В. А. Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во «Энергия», 1965.
7. Ллойд Д., Липов М. Надежность. Изд-во «Советское радио», 1964.
8. Локк А. С. Управление снарядами. ГИТТЛ, 1957.
9. Мерилл Г. Исследование операций. Изд. иностранной литературы, 1959.
10. Морз Ф. М., Кимбелл Д. Е. Методы исследования операций. Изд-во «Советское радио», 1956.
11. Перов В. П. Расчет радиолокационных следящих систем с учетом случайных воздействий. Судпромгиз, 1961.
12. Сиверс А. П., Суслов Н. А. Основы радиолокации. Изд-во «Советское радио», 1956.
13. Типугин В. Н., Вейцель В. А. Радиоуправление. Изд-во «Советское радио», 1962.
14. Троуп А. Дж. Стратегическая надежность и ремонт. «Радиоэлектроника за рубежом», 1964.
15. Ушаков И. А. Оценка эффективности функционирования сложных систем. «Вопросы радиоэлектроники», серия XII, вып. 13, 1962.
16. Чувев Ю. В. и др. Основы исследования операций в военной технике. Изд-во «Советское радио», 1965.
17. Шор Я. Б. Основные понятия и пути решения проблемы повышения надежности промышленных изделий. Всесоюзное общество «Знание», М., 1965.
18. Щукин А. Н. Динамические и флюктуационные ошибки управляемых объектов. Изд-во «Советское радио», 1961.
19. «Надежность в технике». Термины, ГОСТ 13377-67.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Общие принципы оценки эффективности технических средств . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Критерии эффективности и особенности их применения . . . . .	5
1.2. Принципы определения и использования критериев эффективности средств, являющихся элементами комплексов и систем . . . . .	17
1.3. Особенности оценки эффективности средств военной техники . . . . .	30
<b>Глава 2. Особенности оценки эффективности радиоэлектронных средств . . . . .</b>	<b>39</b>
2.1. Основные особенности радиоэлектронных средств . . . . .	39
2.2. Критерии эффективности радиоэлектронных средств . . . . .	43
2.3. Содержание показателя $P_{pi}$ . . . . .	55
<b>Глава 3. Принципы определения показателя потенциальной эффективности в операции радиоэлектронных средств . . . . .</b>	<b>65</b>
3.1. Общие принципы определения показателя $P_{Ei}$ . . . . .	65
3.2. Определение $P_{Ei}$ радиоэлектронных средств обнаружения . . . . .	70
3.3. Определение показателя $P_{Ei}$ радиоэлектронных средств целеуказания . . . . .	82
3.4. Определение показателей $P_{Ei}$ систем управления стрельбой . . . . .	96
<b>Глава 4. Принципы оценки эффективности радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности . . . . .</b>	<b>120</b>
4.1. Исходные положения для оценки эффективности радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности . . . . .	120
4.2. Показатели надежности радиоэлектронных средств . . . . .	129
4.3. Принципы определения показателя $P_{pi}$ радиоэлектронных средств с учетом их реальной надежности . . . . .	135
4.4. Определение показателя $P_{pi}$ для некоторых видов радиоэлектронных средств . . . . .	150
<b>Глава 5. Особенности количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств, используемых в условиях радиопротиводействия . . . . .</b>	<b>167</b>
5.1. Общие принципы оценки эффективности и помехозащищенности радиоэлектронных средств в условиях радиопротиводействия . . . . .	167
5.2. Общие принципы определения показателя $P_x$ . . . . .	173
5.3. Общие принципы определения показателя $P_{pi}$ пу . . . . .	190
Наиболее употребительные обозначения . . . . .	198
Литература . . . . .	200

## ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
47	Формула (2.2.7)	$\frac{P_{\text{рт}}C_p}{K_p} \dots$	$\frac{P_{\text{рт}}C_p}{K_p} + \dots$
52	фл-а (2.2.15)	$(X_{\text{рм}}) + \dots$	$(X_{\text{рм}}) - \dots$
68	3—9 снизу	Выражения для $P_{\text{фсг}}$ и $P_{\text{исг}}$ и абзц над ними поменять местами	
100	6 и 7 снизу	(или временем полета)	(или времени полета)
115	17 и 18 снизу	переставить строки	
126	ф-ла (4.1.3)	$W = kK_{\text{н}}T_{\text{р}}\mathcal{E}$	$W = kK_{\text{н}}T_{\text{р}}$
180	11 снизу	принятых сигналов ...	переизлучения принятых сигналов, ...

63 коп.

«СОВЕТСКОЕ РАДИО»