

681.2.08  
С-19

Р. А. САПОЖНИКОВ, А. А. БЕССОНОВ,  
А. Г. ШОЛОМИЦКИЙ

# НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

*Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений*

28852

Р. С. С. С. Р.  
Башкирский филиал  
Уфимский институт  
Техническая библиотека



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»  
Москва — 1964

*Ростислав Алексеевич Сапожников,  
Александр Андреевич Бессонов  
Адриан Григорьевич Шоломицкий*

**Надежность автоматических  
управляющих систем**

Редактор *Н. И. Хрусталева*  
Художественный редактор *Н. К. Гудоров*  
Технический редактор *Р. К. Воронина*  
Корректор *А. И. Гурычева*

Переплет художника *Б. Школьника*

Сдано в набор 3/VIII-63 г. Подписано к печати 2/IV-64 г.  
Бумага 60 × 90<sup>1/16</sup>. 16,5 печ. л. + 1 вкл. = 0,37 печ. л. 15,83 уч.-изд. л.  
Тираж 15.000. Т — 04157. Изд. № от/26. Е-326. Цена 65 к. Переплет № 5  
Издательство «Въсшая школа», Москва, К-62, Подсосенский пер., 20  
Типография «Татполиграф» Управления по печати при Совете Министров. ТАССР.  
Казань, ул. Миславского, 9.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Выступая на Всесоюзном совещании научных работников 12 июня 1961 г., Президент Академии наук СССР акад. М. В. Келдыш сказал: «Достижение самого высокого уровня производительности труда является одним из важнейших условий победы нового общественного строя. Главным средством для достижения этой цели является широкое развитие автоматизации, в первую очередь процессов производства». И далее: «При все возрастающей важности функций, выполняемых электронными приборами и автоматическими системами, остро встает проблема обеспечения их надежности. Недопустимо, чтобы в устройствах, насчитывающих многие тысячи электронных и механических элементов, выход из строя одного или даже нескольких элементов вызывал нарушение процесса работы. Это ставит серьезные задачи по повышению надежности элементов. Но еще более важно создать такие методы построения сложных комплексов, которые обеспечивали бы надежную работу даже при выходе отдельных элементов, подобно тому, как отдельные повреждения в живом организме не нарушают его нормальной деятельности. В этих направлениях уже предложен ряд принципов, но стоит задача создания теоретических основ обеспечения надежности» [1].

Всякая автоматическая система состоит из двух основных частей: управляющей и управляемой. Управляемая часть может быть, например, технологическим объектом или транспортным средством. Управляющая часть является устройством, служащим для управления подобными объектами. Достаточно совершенные современные управляющие устройства представляют собой сложные автоматически действующие системы, называемые поэтому далее автоматическими управляющими системами (АУС). Обеспечение надежности требуется, конечно, как для управляемых объектов, так и для управляющих устройств. В этой книге рассмотрены только вопросы, относящиеся к надежности устройств, создание которых является задачей автоматики и кибернетики, — надежности АУС. И лишь изложенные далее общие положения

ния учения о надежности могут быть полезны также при проектировании, производстве и испытании различных объектов управления. Читателям должны быть известны основы теории вероятностей.

Развитие теории надежности, в области которой одни из первых работ были выполнены в СССР [2], началось недавно. Тем не менее, литература по надежности уже весьма обширна. Из этой литературы авторы заимствовали то, что представлялось им наиболее важным применительно к надежности АУС. Такому выбору материала соответствует приведенный в книге список литературы, отнюдь не представляющий собой полной библиографии вопроса. Некоторые задачи теории надежности решены и изложены здесь впервые. Авторы полагают, что первый опыт создания учебного пособия по надежности АУС не может быть свободен от недостатков и будут признательны за все критические замечания и указания.

Работа распределилась между авторами следующим образом: § 1.1—1.3, 2.1, 2.3—2.6, 5.1 и 7.5 написаны Р. А. Сапожниковым; § 1.4, 2.2 и 5.9 — Р. А. Сапожниковым и А. А. Бессоновым; § 3.1 и 4.1 — всеми авторами; § 3.2 — А. Г. Шоломицким и Р. А. Сапожниковым; § 3.3 и 7.3 — А. Г. Шоломицким и А. А. Бессоновым; § 4.2—4.7, 7.1, 7.4, 7.6, 7.7 и 7.8 — А. Г. Шоломицким; § 5.2—5.8, 5.10, глава шестая, § 7.2 и глава восьмая — А. А. Бессоновым. Общее редактирование книги осуществлено Р. А. Сапожниковым. Авторы признательны проф. Ф. Е. Темникову, проф. В. А. Тимофееву, В. Б. Свечинскому и А. З. Иванову за ценные указания, сделанные ими при рецензировании рукописи книги. Авторы благодарны студентам Ленинградского механического института В. П. Алексеевой, И. К. Желанкиной, Г. С. Смолкиной и Г. П. Сорокину, оказавшим авторам большую помощь в изготовлении рисунков.

*Авторы.*

## ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ

### § 1. 1. СУЩНОСТЬ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Понятия надежности и ненадежности разного рода сооружений, а также предметов различного оборудования и повседневного обихода давно и широко употребительны. Говорят, например, что ненадежен шаткий мост; называют надежным трос, находя его достаточно прочным для подвешенного на нем груза; признают ненадежным замок, который легко сломать или отомкнуть. Во всех этих случаях, как и во многих других, им подобных, надежность и ненадежность определяются чисто качественно, т. е. не получают никакого количественного выражения посредством меры и числа. Следует заметить, что в количественной оценке здесь и нет надобности, поскольку надежность или ненадежность определяется практически предельным несоответствием между свойствами и назначением рассматриваемого предмета. Мост ненадежен, поскольку он явно не выдержит груза, который через него надо перевезти. И если рядом находится другой мост, признаваемый также ненадежным, то не требуется количественного сравнения их ненадежности, так как ясно, что оба они прозаялятся. Нет надобности также численно выражать и сравнивать надежность двух тросов, когда ясно, что в условиях их применения ни тот, ни другой не разорвется.

Развитие техники привело к необходимости определения надежности различных устройств в тех случаях, когда свойства и назначение этих устройств далеки от предельного несоответствия. В таких случаях приобретает смысл вопрос о том, какой из объектов одного и того же назначения более надежен, а следовательно, возникает необходимость иметь количественный критерий надежности. В простейших устройствах этим критерием может служить какая-либо физическая или расчетная величина. Если, например, речь идет о надежности балок, рассчитанных на одну и ту же нагрузку, то более надежной будет та, при расчете которой принят больший коэффициент запаса. Задача усложняется, когда необходимо оценивать надежность устройств, состоящих из многочислен-

ных деталей с различными свойствами. Типичным примером подобного устройства является электронная вычислительная машина, в составе которой может быть несколько сотен тысяч элементов и деталей. Могут быть две машины, пригодные для решения одинаковых задач с одинаковой точностью, но имеющие разную конструкцию. Можно сравнивать такие машины в различных отношениях, но одним из важнейших будет сравнение их надежности. Какая машина более надежна? Положим, что та, которая будет дольше правильно действовать. Но как это заранее определить, учитывая сложную конструкцию обеих машин? Для этого, очевидно, необходимо знать меру надежности и метод ее вычисления.

Учение о надежности возникло в связи с появлением весьма сложных радиоэлектронных устройств, количество элементов которых исчислялось тысячами и миллионами. Эти устройства оказались малонадежными. Действительно, вероятность какого-либо нарушения в системе естественно возрастает с увеличением числа деталей, каждая из которых может вызвать это нарушение. Не удивительно поэтому, что надежность простой балки должна значительно превосходить надежность сложных радиоэлектронных систем. Отсюда и получило начало учение о надежности, содержащее методы определения и количественного выражения надежности сложных систем, а также методы проектирования таких систем, обладающих требуемой надежностью. Возникнув в связи с задачами радиоэлектроники, это учение получило применение и в других областях.

## § 1.2. НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ — УСЛОВИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

Для технического прогресса требуется механизация и автоматизация труда. Механизация увеличивает производительность труда, передавая машинам мускульную работу человека. Автоматизация увеличивает производительность труда, передавая машинам умственную работу человека. Машина, механизующая человеческий труд, производит значительно большую работу, чем может сделать управляющий ею человек. В этом выгода механизации. Автомат, управляющий машиной, производит логические и вычислительные операции, необходимые для управления, несравненно быстрее, чем это может делать контролирующий его человек. В этом выгода автоматизации. На высшей степени автоматизации, называемой комплексной, участие человека в процессе управления машинами предельно сокращается. За человеком остается лишь контроль над

действием построенной им автоматической управляющей системы (АУС), осуществляющей все умственные операции, требуемые процессом управления каким-либо объектом (управляемым объектом). К таким операциям относится учет опыта, отыскание наивыгоднейших решений, прогноз дальнейшего хода процесса и т. п.

Автоматические управляющие системы — весьма сложные устройства, состоящие из большого количества элементов и соединений. Сложность АУС увеличивается с усложнением их функций, так что наиболее совершенные системы, в наибольшей мере заменяющие человека в управлении, оказываются самыми сложными. Совершенство АУС будем оценивать по признаку ее способности заменять человека в течение некоторого времени, пока система исправна. Тогда, согласно сказанному ранее о ненадежности сложных устройств, наиболее совершенные АУС будут наименее надежными. Этот вывод следует из простого рассуждения: чем сложнее функции системы, тем больше должно быть элементов в ее конструкции; а чем больше элементов, тем больше вероятность возникновения тех или иных нарушений в действии системы. Таким образом, возникает противоречие совершенства и надежности автоматических управляющих систем. Это противоречие состоит в том, что требования высокого совершенства и высокой надежности по-видимому несовместимы.

Технические устройства, называемые автоматическими управляющими системами, являются лишь одним из видов существующих управляющих систем. Другой вид таких систем встречается в природе, так как управляющую систему имеет каждый живой организм. Для построения АУС, в особенности наиболее совершенных, необходимых для комплексной автоматизации, полезно, естественно, изучать органические управляющие системы (ОУС). Такое изучение осуществляется в кибернетике — науке об управляющих системах и процессах управления. Органические управляющие системы имеют сложное устройство, позволяющее им управлять весьма разнообразными сторонами деятельности живых организмов. Вместе с тем ОУС достаточно надежны: виды животных и растений, не обладающие надежными управляющими системами, не могли бы существовать. Следовательно, противоречие совершенства и надежности лишь кажущееся, оно разрешимо, и в этом — одна из важнейших задач учения о надежности.

Таким образом, создание надежных управляющих систем — непростая задача. На первый взгляд она неразрешима. Но в природе мы находим образцы ее решения для ОУС. Это убеждает нас в том, что при надлежащем научном подходе

могут быть созданы сколь угодно сложные и надежные АУС. Без этого, т. е. без создания надежных автоматических управляющих систем, не может быть, очевидно, комплексной автоматизации, требуемой техническим прогрессом, необходимым условием которого является, следовательно, надежность АУС [3].

### § 1.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ УЧЕНИЯ О НАДЕЖНОСТИ

Основным понятием науки о надежности является отказ. Это — полная или частичная утрата работоспособности [4], т. е. нарушение нормального функционирования рассматриваемой системы, вследствие которого ее характеристики перестанут удовлетворять предъявляемым к ней требованиям. Такое нарушение может возникнуть от разных причин и иметь различный характер. Может быть внезапный отказ, например повреждение какой-либо детали, и может быть постепенный отказ, возникающий вследствие постепенного изменения тех или иных характеристик или параметров. Зависимый отказ возникает в результате другого отказа, независимый — по любой другой причине. Полный отказ исключает всякую возможность применения систем до его устранения, частичный — позволяющую пользоваться по назначению с теми или иными ограничениями. Устойчивый отказ может быть устранен лишь с помощью специальных мер, восстанавливающих работоспособность системы, но бывают и самоустраняющиеся отказы. Кратковременный самоустраняющийся отказ, возникающий эпизодически, называют сбоем. Перемежающийся отказ — ряд кратковременных самоустраняющихся отказов, быстро следующих один за другим. Различают, наконец, отказы конструкционные, технологические и эксплуатационные, обусловленные, соответственно, неправильной конструкцией, технологией изготовления и эксплуатацией системы [4], а также отказы вследствие разрегулировки. Все эти понятия применимы и к отдельным элементам, из которых состоят автоматические системы.

Различными бывают, очевидно, и последствия отказов. Может произойти, например, поломка какой-либо части, вследствие чего система перестает действовать. Но возможно также, что из-за тех или иных изменений система станет действовать неправильно, с недопустимой погрешностью и т. п. Нарушения вследствие внезапных повреждений представляют собой преимущественный интерес при изучении надежности энергетических машин. Нарушения, при которых система продолжает работать, но неправильно, не менее



важны для машин информационных, к которым относятся АУС. Во всех таких случаях говорят, что имеет место отказ. Наличие отказа не означает, таким образом, что система перестала действовать, хотя это и может произойти в связи с тем, что некоторые параметры ее вышли из допустимых пределов. Отказ означает, что больше нет уверенности в бесперебойном и правильном действии системы, что она стала, следовательно, ненадежной.

Понятие отказа сразу приводит к необходимости вероятностного подхода ко всем задачам учения о надежности. Действительно, нельзя, очевидно, утверждать, что отказ непременно произойдет, можно говорить лишь о вероятности этого события. Если же отказ произошел, то нельзя утверждать, к каким последствиям это приведет. Может быть система перестанет действовать, может быть начнет работать неточно. Можно говорить лишь о вероятности тех или иных последствий отказа.

Вероятность отказов, как и вероятность их последствий, определяется на основании статистических данных о частоте отказов элементов системы. Изучение, обработка и использование этих данных — задачи учения о надежности, решаемые с помощью теории вероятностей, составляющей основной математический аппарат этого учения. Теория вероятностей служит основой и для построения ряда важнейших понятий учения о надежности, связанных с понятием отказа.

Надежность следует понимать [4] как свойство системы действовать безотказно (безотказность), оставаясь при этом приспособленной к обнаружению, устранению и предупреждению отказов (ремонтпригодность). Меры этого свойства, т. е. меры надежности, дают связанные с явлением отказа количественные характеристики, изучение которых составляет предмет теории надежности. Отказ — случайное событие, и эти характеристики получают из рассмотрения его вероятностей природы.

Количественные характеристики отказа могут быть построены двумя способами. *Первый способ* состоит в том, что вводится время отказа  $T$ , т. е. время, прошедшее от начала работы изучаемого устройства, до первого отказа. Тогда, рассматривая время  $t$ , прошедшее после включения устройства, нужно оценить вероятность того, что за это время отказа не будет. *Второй способ* состоит в том, чтобы оценить, с какой вероятностью за время  $t$  произойдет то или иное число отказов  $N$ . Таким образом, случайными величинами, подлежащими исследованию, являются время отказа  $T$  в первом способе и число отказов  $N$  во втором. Отсюда следует, что эти способы требуют

различного математического подхода, так как  $T$  — непрерывная величина, а  $N$  — дискретная. Однако решение задачи в обоих случаях сводится к построению функции распределения, определяющей зависимость искомой вероятности от изучаемой случайной величины.

Надежность неделимого элемента системы (например, электронной лампы) можно количественно характеризовать только по первому способу. Действительно, после первого же отказа такой элемент должен быть заменен другим, так что нет смысла говорить о числе его отказов. К системам же и их блокам, состоящим из ряда одинаковых или различных элементов, применимы оба способа оценки надежности.

Заметим наконец, что считая отказ случайным событием, следует считать случайным событием и безотказную работу в течение того или иного времени.

#### § 1.4. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ К АУС

Общие понятия теории надежности должны быть правильно истолкованы применительно к каждому виду изучаемых объектов. Это относится прежде всего к основному понятию отказа. Отказ имеет различный характер в механизмах и в электронных устройствах. И это понятие необходимо конкретизировать в каждой области его применения, чтобы основанные на нем методы теории надежности давали правильные результаты.

Такая конкретизация понятия отказа должна быть сделана и для решения задач, относящихся к надежности автоматических управляющих систем. Сущность действия информационных машин, к которым принадлежат АУС, состоит в передаче и преобразовании информации, переносимой сигналами, распространяющимися в системе. Рассматривая такую систему или какую-либо ее часть, всегда можно различать входной сигнал  $x$  (рис. 1.1), воздействующий на эту часть или на систему, и выходной сигнал  $y$ , вырабатываемый для воздействия на другую часть системы или на управляемый объект. Выходной сигнал возникает вследствие появления входного и должен находиться в определенной зависимости от входного сигнала, чтобы рассматриваемое устройство (система или ее часть) функционировало правильно. Отсюда следует, что отказ этого устройства будет означать то или иное искажение выходного сигнала по срав-



Рис. 1.1. Входной и выходной сигналы

мый для воздействия на другую часть системы или на управляемый объект. Выходной сигнал возникает вследствие появления входного и должен находиться в определенной зависимости от входного сигнала, чтобы рассматриваемое устройство (система или ее часть) функционировало правильно. Отсюда следует, что отказ этого устройства будет означать то или иное искажение выходного сигнала по срав-

нению с тем, каким он должен быть при наличии некоторого сигнала на входе. В частности же отказ может состоять в том, что выходной сигнал отсутствует при любом входном — рассматриваемое устройство повреждено и не работает.

Из изложенного следует, что надежность АУС зависит от способа соединения элементов, из которых состоит система и по которым происходит передача сигналов. В зависимости от способа соединения, отказ системы может иметь место при отказе того или иного количества ее элементов. Если, например, соединение таково, что сигнал обязательно должен проходить через некоторый элемент, то отказ этого единственного элемента всегда будет означать отказ системы. Если же соединение обеспечивает возможность передачи сигнала по нескольким параллельным путям, то в системе нет такого элемента, отказ которого приводит к ее отказу. Она будет работать безотказно, несмотря на отказ ряда элементов, лишь бы действовали безотказно элементы, образующие какой-либо один из параллельных путей передачи сигналов. Систему, безотказно работающую при отказе того или иного числа ее элементов, называют избыточной [5, 6]. Такие системы подобны статически неопределимым системам строительной механики, в которых разрушительные стержней, «лишних» по сравнению с системами статически определимыми, не влечет за собой разрушения всего сооружения.

Зависимость надежности системы от схемы соединения элементов, образующих эту систему, — существенная особенность АУС. Эта особенность встречается и в других областях техники, но существуют устройства, которым она не присуща. Например, надежность осветительной установки не зависит от схемы включения ламп: здесь отказ определяется падением общего светового потока ламп ниже заданного значения [7].

В связи со сказанным следует различать два главных соединения элементов АУС: в первом из них, которое будем называть основным, отказ системы происходит при отказе любого из составляющих ее элементов; во втором, называемом резервным, каждый элемент может заменить любой отказавший, так что отказ системы происходит лишь в случае отказа всех ее элементов. Очевидно, что резервное соединение всегда образует избыточную систему.

Рассмотрим схемы простейших систем, представляющие собой основное и резервное соединения. На рис. 1.2 показана схема обратной связи, охватывающей элемент 1, который замкнут через элемент 2. Отказ такой системы будет, очевидно, иметь место при отказе любого из ее элементов, а следовательно, соединение элементов 1 и 2 в ней

является основным. На рис. 1.3 показано последовательное соединение элементов, при котором выходной сигнал каждого элемента является входным для соединенного с ним элемента, следующего по пути прохождения сигнала. Другими словами, вход каждого элемента соединяется при этом с выходом предыдущего, а выход — с входом последующего. Соединенные таким образом элементы

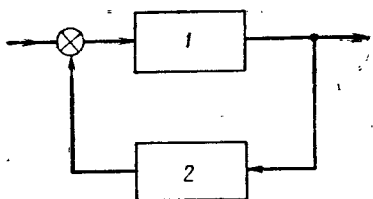


Рис. 1.2. Схема обратной связи



Рис. 1.3. Последовательное соединение

образуют цепочку, звенья которой последовательно проходит сигнал, поданный на ее вход. В зависимости от конструкции, свойств и назначения элементов цепочки она может представлять собой как основное, так и резервное соединение. Действительно, если сигнал должен подвергаться последовательным преобразованиям, происходящим в каждом элементе цепочки, то здесь имеет место основное соединение. Но может быть и такой случай, когда требуется лишь прохождение сигнала не менее, чем через один элемент, но безразлично, через какое большее количество элементов он проходит. Если, например, рассматриваемые элементы — электрические реле, то их контакты могут быть соединены последовательно для получения более надежной, избыточной системы. В таком случае цепочка является резервным соединением при отказах вследствие короткого замыкания, когда система откажет лишь при отказе всех реле. Но та же цепочка будет, очевидно, основным соединением при отказах из-за обрыва цепи [8].

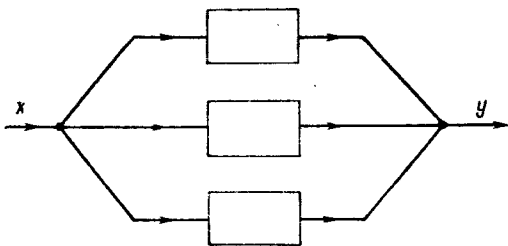


Рис. 1.4. Параллельное соединение

Параллельным соединением называют такое, при котором как входы всех элементов, так и выходы, соединены вместе (рис. 1.4). При этом входной сигнал  $x$  поступает на входы

всех элементов. Если выходной сигнал  $u$  является функцией выходных сигналов всех элементов, то отказ соединения будет иметь место при отказе хотя бы одного элемента. В этом случае параллельное соединение будет, как и последовательное, основным. В частности, выходной сигнал  $u$  может быть суммой выходных сигналов параллельно соединенных элементов. Тогда название соединения «параллельным» имеет тот же смысл, что и в теории автоматического регулирования. В других случаях на выходе параллельного соединения достаточно иметь сигнал от одного из соединенных элементов, остальные же элементы должны быть включены для повышения надежности. Тогда параллельное соединение оказывается резервным. Параллельное соединение, как и последовательное, может быть основным или резервным также в зависимости от вида образующих его элементов. При параллельном включении электрических реле, например, соединение будет основным в случаях отказов из-за короткого замыкания, но то же соединение становится резервным для отказов, вызываемых обрывом цепи [8].

Отказ АУС имеет место, когда ошибка (или погрешность)  $\Delta u$  выходного сигнала превышает допустимое значение. Эта ошибка определяется, с одной стороны, ошибкой самой системы (инструментальной ошибкой), а с другой — ошибками входных сигналов. Разница  $\Delta u$  между заданным и выработанным значениями выходного сигнала в устройствах непрерывного и дискретного действия имеет соответственно непрерывный и дискретный характер. Поэтому в устройствах дискретного действия ошибки входных сигналов, если они находятся в некоторых пределах, не вызывают ошибок на выходе, так как сигналы на входах таких устройств приводят только к замене одного устойчивого состояния устройства другим или выводят его из устойчивого состояния. В устройствах непрерывного действия всякая ошибка на входе вызывает ошибки на выходе.

Оставаясь в пределах соответствующих допусков, ошибки, возникающие одновременно в отдельных блоках АУС, могут приводить к отказу системы.

Расширение диапазона условий, в которых АУС работают безотказно, является одним из преимуществ самонастраивающихся и самоорганизующихся систем.

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

### § 2.1. ВРЕМЯ ОТКАЗА

Время отказа  $T$ , рассмотренное в § 1.3, определяет продолжительность исправной работы, т. е. промежуток времени от начала работы рассматриваемого устройства до возникновения отказа. Если вести отсчет времени  $t$  от начала работы изучаемого устройства, полагая, что в этот момент  $t=0$ , то отказ происходит при

$$t = T.$$

В связи с этим условием отсчета времени отрицательные значения  $t$  не представляют интереса, и в дальнейшем принято, что

$$t \geq 0. \quad (2.1)$$

Вследствие случайного характера отказа время  $T$  является случайной величиной, подчиненной условию

$$0 < T \leq \infty.$$

Поэтому можно рассматривать вероятность  $P(t)$ , с которой

$$T \geq t. \quad (2.2)$$

Функция  $P(t)$  выражает вероятность того, что в течение времени  $t$  не будет отказа; поэтому ее называют вероятностью безотказной работы. Вероятность, с которой

$$T < t, \quad (2.3)$$

найдем как

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (2.4)$$

Это — вероятность того, что отказ произойдет в течение времени  $t$ . Поэтому функцию  $Q(t)$  называют вероятностью отказа.

Вероятность  $P(t)$  является непрерывной функцией времени, вид которой зависит от условий эксплуатации рассматриваемого устройства. Принимают, что

$$\left. \begin{aligned} P(0) &= 1 \\ P(T) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Как видно из выражения (2.4), отказ исключен лишь при  $t=0$ , когда  $P(t)=1$  и  $Q(t)=0$ . Отказ может иметь место при всех значениях  $t>0$ , хотя при малых  $t$  вероятность его и мала.

Функцией  $Q(t)$  можно пользоваться, очевидно, как и функцией  $P(t)$ , характеризуя надежность либо вероятностью безотказной работы, либо вероятностью отказа. Обе эти величины служат мерой надежности, позволяющей оценивать надежность количественно. Вероятность  $P(t)$  иногда называют надежностью, а вероятность  $Q(t)$  — ненадежностью. Однако здесь будем придерживаться уже принятого (§ 1.3) понимания надежности как свойства, мерой (или критерием) которого могут служить как обе эти вероятности, так и ряд связанных с ними величин, иногда отождествляемых с понятием надежности<sup>1</sup>. Примерный вид зависимости  $P(t)$  представлен на рис. 2.1. Уменьшение вероятности безотказной работы со временем означает уменьшение ресурса надежности, количественным выражением которого является эта вероятность.

Время отказа, как и всякая случайная величина непрерывного типа, характеризуется функцией, называемой плотностью вероятности. Имея в виду, что время отказа есть продолжительность исправной работы, составим эту функцию так, чтобы она определяла вероятность выполнения условия (2.2), и обозначим ее через  $f(t)$ . Возьмем два значения времени:  $t$  и  $t + \Delta t$  (рис. 2.2). Тогда вероятность того, что время отказа  $T$  имеет значение, лежащее в интервале  $t, t + \Delta t$ , будет определяться площадью, ограниченной осью абс-



Рис. 2.1. Зависимость вероятности безотказной работы от времени

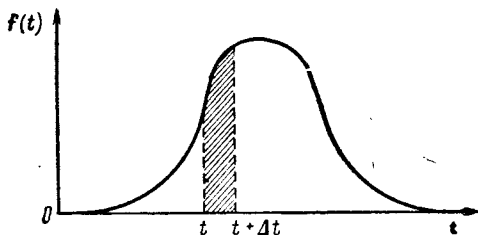


Рис. 2.2. Определение вероятности того, что время отказа находится в интервале  $t, t + \Delta t$

<sup>1</sup> См., например, сводку определений надежности, предложенных разными авторами, в [9].

цисс, ординатами, соответствующими абсциссам  $t$  и  $t + \Delta t$ , и кривой  $f(t)$ . Плотность вероятности нормируется так, чтобы

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1, \quad (2.6)$$

так как, в силу условия (2.1), всякое значение  $T$  всегда должно находиться в указанных здесь пределах интегрирования. При этом вероятность безотказной работы в течение времени  $t$ , т. е. вероятность выполнения условия (2.2),

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (2.7)$$

Вероятность отказа, т. е. вероятность выполнения условия (2.3),

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (2.8)$$

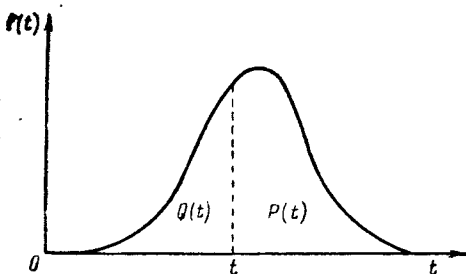


Рис. 2.3. Определение вероятностей отказа и безотказной работы по кривой  $f(t)$

Легко видеть, что выражения (2.7) и (2.8) удовлетворяют уравнению (2.4). На рис. 2.3 площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой  $f(t)$ , разделена на две части ординатой, соответствующей абсциссе  $t$ ; левая часть этой площади численно равна вероятности  $Q(t)$ , а правая — вероятности  $P(t)$ .

Из равенства (2.8) находим, что

$$\frac{d}{dt} Q(t) = f(t). \quad (2.9)$$

Далее из выражений (2.4) и (2.9) имеем:

$$\frac{d}{dt} Q(t) = - \frac{d}{dt} P(t) \quad (2.10)$$

и

$$f(t) = - \frac{d}{dt} P(t). \quad (2.11)$$

Рассмотрим теперь среднее время отказа (или среднюю продолжительность исправной работы). Это — математическое ожидание величины  $T$ , т. е. среднее из значений, которые она получает в серии включений изу-



чаемого устройства. Как математическое ожидание или момент первого порядка, при условии (2.1), среднее значение выражается через плотность вероятности:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (2.12)$$

Подставляя сюда выражение (2.11), получаем

$$\bar{T} = - \int_0^{\infty} t \frac{d}{dt} P(t) dt = \int_0^1 t dP(t).$$

Далее, интегрируя по частям, имеем:

$$\bar{T} = tP(t) \Big|_{P=0}^1 + \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Здесь по условиям (2.5) первое слагаемое равно нулю. Следовательно,

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (2.13)$$

т. е. математическое ожидание времени отказа равно площади, ограниченной кривой вероятности безотказной работы (рис. 2.1).

Среднее значение квадрата времени отказа при условии (2.1) выражается через плотность вероятности как момент второго порядка:

$$T^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) можно преобразовать подобно выражению момента (2.12). А именно,

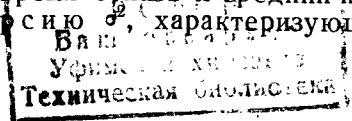
$$\bar{T}^2 = \int_0^1 t^2 dP(t) = t^2 P(t) \Big|_{P=0}^1 + 2 \int_0^{\infty} tP(t) dt,$$

откуда

$$\bar{T}^2 = 2 \int_0^{\infty} tP(t) dt. \quad (2.15)$$

Средний квадрат времени отказа можно найти графически: на основании формулы (2.14), если известен график плотности вероятности, или на основании формулы (2.15), если известен график вероятности безотказной работы.

Зная среднее время отказа и средний квадрат его, найдем наконец, дисперсию  $\sigma^2$ , характеризующую разброс слу-



чайных значений времени отъезда вокруг его среднего значения. Дисперсия

$$\sigma^2 = \bar{T}^2 - (\bar{T})^2, \quad (2.16)$$

т. е. равна разности среднего квадрата и квадрата среднего времени отъезда. Это — среднее значение квадрата отклонения времени отъезда от его среднего значения. Извлекая квадратный корень из дисперсии, получаем величину  $\sigma$ , называемую средним квадратическим отклонением, или стандартом времени отъезда. По (2.16) и (2.14) дисперсия

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - (\bar{T})^2. \quad (2.17)$$

## § 2.2. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Согласно § 1.3, вероятность безотказной работы  $P(t)$ , вероятность отъезда  $Q(t)$  и время отъезда  $T$ , рассмотренные в предыдущем параграфе, характеризуют надежность неделимых элементов АУС, а также систем в целом и их блоков, состоящих из различных или одинаковых неделимых элементов. Численные значения этих величин, относящиеся к неделимым элементам, определяются экспериментально (гл. III). Что же касается блоков и систем, то характеристики их надежности, которые для готовых изделий могут быть получены испытанием, нужно также рассчитывать по характеристикам их элементов. Такой расчет необходим при проектировании АУС.

Рассмотрим расчет вероятности безотказной работы соединений каких-либо блоков, предполагая, что для каждого блока такая вероятность известна. В простейшем случае имеются только два блока. Пусть  $P_1(t)$  — вероятность безотказной работы одного из них, а  $P_2(t)$  — другого. Будем рассматривать основное и резервное соединения этих блоков.

Предположим, что отъезды обоих блоков — независимые случайные события. Вообще говоря, это не всегда так, но при основном соединении всегда можно делать такое предположение, так как важен лишь отъезд первого из отказавших блоков, означающий отъезд всего соединения. Тогда вероятность безотказной работы основного соединения

$$P(t) = P_1(t) P_2(t), \quad (2.18)$$

так как безотказную работу того и другого блока также можно считать независимыми случайными событиями (§ 1.3). При резервном соединении, если сделанное предположение

для него справедливо, вероятность отказа

$$Q(t) = Q_1(t) Q_2(t), \quad (2.19)$$

а вероятность безотказной работы, по (2.4),

$$P(t) = 1 - Q_1(t) Q_2(t), \quad (2.20)$$

где

$$Q_{1,2}(t) = 1 - P_{1,2}(t).$$

Формулы (2.18) и (2.19) легко обобщить для случая основного и резервного соединения любого числа  $k$  блоков. Вероятность безотказной работы основного соединения

$$P(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t), \quad (2.21)$$

а вероятность отказа резервного соединения

$$Q(t) = \prod_{i=1}^k Q_i(t), \quad (2.22)$$

где  $P_i(t)$  и  $Q_i(t)$  — вероятности безотказной работы и отказа блоков, входящих в состав рассматриваемых соединений. Формулы (2.21) и (2.22) применимы, конечно, и к расчету соответственных вероятностей для блоков, состоящих из  $k$  неделимых элементов, соединенных последовательно и резервно.

Из (2.21) и (2.4) следует, что при малых  $Q_i$ , когда можно пренебречь произведениями этих величин, для основного соединения

$$Q(t) \approx \sum_{i=1}^k Q_i(t). \quad (2.23)$$

Выражения (2.18) и (2.20) позволяют рассчитывать вероятность безотказной работы более сложных комбинированных систем, состоящих из основных и резервных соединений. Пример одной из таких систем приведен на рис. 2.4. Здесь имеется параллельное соединение блоков, характеризуемых вероятностями  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ , и такое же соединение блоков, характеризуемых вероятностями  $P_3(t)$ ,  $P_4(t)$ . Эти параллельные соединения в свою очередь соединены последовательно.

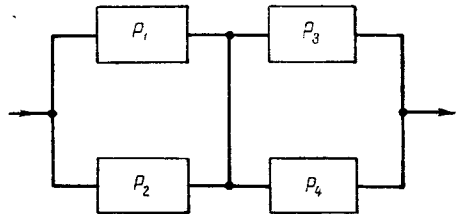


Рис. 2.4. Комбинированное соединение четырех блоков

Если параллельные соединения являются резервными, а

последовательные — основными, то вероятность безотказной работы всей схемы  $P(t)$  легко найти, введя вероятности отказа  $Q_1(t)$ ,  $Q_2(t)$ ,  $Q_3(t)$  и  $Q_4(t)$  всех четырех блоков:

$$P(t) = [1 - Q_1(t) Q_2(t)] [1 - Q_3(t) Q_4(t)]. \quad (2.24)$$

Если же основными являются параллельные соединения, а резервными — последовательные, то вероятность отказа схемы

$$Q(t) = [1 - P_1(t) P_2(t)] [1 - P_3(t) P_4(t)]. \quad (2.25)$$

Однако непосредственно применять формулы (2.18) и (2.20) становится труднее по мере усложнения схемы. Но можно пользоваться более общим приемом, легко применимым к схемам любой сложности. Рассмотрим систему, в которой сигнал, поданный на вход, может быть правильно передан на выход несколькими путями, на каждом из которых в его передаче участвуют те или иные блоки. Очевидно, что наличие нескольких путей передачи сигнала способствует повышению надежности системы. Обычно это является следствием того, что при конструировании системы были предусмотрены специальные меры увеличения ее надежности. Когда этого нет и имеется лишь один путь передачи сигналов, система будет частным случаем рассматриваемой. Обращаясь поэтому к общему случаю наличия нескольких путей передачи сигнала, рассмотрим систему, в которой пути, образуемые основным соединением блоков, соединены резервно. Заметим, что для безотказного действия такой системы достаточно безотказной работы блоков, образующих какой-либо один из путей передачи сигналов; именно этот путь окажется использованным, если при передаче сигнала по другим путям система откажет вследствие отказа всех образующих их блоков. Вероятность такого случая равна произведению вероятностей безотказной работы блоков данного пути, умноженному на произведение вероятностей отказа остальных блоков системы. Но тот же путь передачи сигнала может быть осуществлен и в случаях безотказной работы одного, двух и т. д. из остальных блоков вплоть до случая безотказной работы всех блоков системы. Вероятность каждого из таких случаев равна произведению вероятностей безотказной работы блоков, работающих исправно, умноженному на произведение вероятностей отказа остальных блоков. Вероятность же передачи сигнала по рассматриваемому пути равна сумме вероятностей всех случаев использования этого пути.

Рассмотрим систему, состоящую из  $k$  блоков, образующих  $m$  путей передачи сигналов со входа на выход. Пусть  $j$  — номер пути, на котором находятся  $n$  блоков. На основании предыдущих рассуждений вероятность  $P_c(t)$  безотказной

работы такой системы, равная сумме вероятностей прохождения сигнала по  $m$  путям, должна иметь следующее выражение:

$$P_c(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{l=0}^{k-n} a_{ij} \prod_{i=1}^{n+l} P_i(t) \cdot \prod_{i=n+l+1}^k Q_i(t). \quad (2.26)$$

Здесь  $l$  — число безотказно работающих блоков, не находящихся на пути, для которого вычисляются произведения вероятностей, т. е. члены внутренней суммы. Каждый блок имеет переменный номер  $i$ . При вычислении каждого из членов внешней суммы нумерация блоков изменяется, чтобы блоки, образующие соответственный путь, имели номера от 1 до  $n$ . Номера этих  $n$  блоков не изменяются в пределах внутренней суммы, но при вычислении каждого ее члена изменяется нумерация остальных  $k-n$  блоков, чтобы число  $l$  блоков при каждом значении этого числа последовательно составлялось из всех  $k-n$  блоков. Таким образом, число членов внутренней суммы, соответствующих каждому значению  $l$ , равно числу сочетаний из  $k-n$  элементов по  $l$ , а всего внутренняя сумма имеет число членов, равное

$$\sum_{l=0}^{k-n} \frac{(k-n)!}{l!(k-n-l)!}.$$

Вообще же номер  $i$  изменяется от 1 до  $k$ . При  $l = k - n - 1^2$

$$\prod_{i=n+l+1}^k Q_i(t) = \prod_{i=k}^k Q_i(t) = Q_k(t);$$

при  $l = k - n$  это произведение равно единице. Коэффициент  $a_{ij}$  равен единице или нулю:  $a_{ij} = 1$  для  $j = 1$ , т. е. при суммировании по первому рассматриваемому пути; при суммировании по остальным путям следует полагать  $a_{ij} = 0$  для всех слагаемых, которые уже встречались на предыдущих путях. Так, при  $l = k - n$

$$a_{1j} \prod_{i=1}^{n+l} P_i(t) \prod_{i=n+l+1}^k Q_i(t) = a_{1j} \prod_{i=1}^k P_i(t)$$

для всех путей. И полагая при этом для одного пути  $a_{1j} = 1$ , для всех других необходимо считать  $a_{1j} = 0$ .

Применим формулу (2.26) к уже рассмотренному примеру соединения четырех блоков ( $k=4$ ) по схеме, изображенной на рис. 2.4, считая последовательное соединение основным, а параллельное — резервным. Введем сокращенные обозначения:

$$\left. \begin{aligned} P_i(t) &= P_i \\ Q_i(t) &= Q_i \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

и будем обозначать блоки вероятностями их безотказной работы, как показано на рисунке. Схема допускает четыре пути передачи сигнала от входа на выход:

- $j=1$  — через блоки  $P_1$  и  $P_3$ ,
- $j=2$  — через блоки  $P_2$  и  $P_4$ ,
- $j=3$  — через блоки  $P_2$  и  $P_3$ ,
- $j=4$  — через блоки  $P_1$  и  $P_4$ .

Таким образом,  $m=4$ ,  $n=2$ ,  $l=0 \div 2$ .

Рассмотрим передачу сигнала по первому пути. В этом случае обязательно должны работать безотказно блоки  $P_1$  и  $P_3$ , но могут безотказно работать также блоки  $P_2$  и  $P_4$  — один из них или оба. Вычислим члены внутренней суммы (2.26), полагая  $a_{ij}=1$ , так как  $j=1$ , т. е. рассматриваемый путь — первый. Они имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} P_1 P_3 Q_2 Q_4 & \text{ при } l=0, \\ P_1 P_3 P_2 Q_4 \\ P_1 P_3 P_4 Q_2 & \end{aligned} \right\} \text{ при } l=1,$$

$$P_1 P_3 P_2 P_4 \text{ при } l=2.$$

Подобным же образом при  $j=2$  находим сумму членов, для которых  $a_{ij}=1$ , так как их не было при  $j=1$ :

$$P_2 P_4 Q_1 Q_3 + P_2 P_4 P_1 Q_3 + P_2 P_4 P_3 Q_1.$$

Для повторяющегося на этом пути члена  $P_1 P_2 P_3 P_4$  следует принять  $a_{ij}=0$ . Легко убедиться, что при  $j=3$  и при  $j=4$  имеется лишь по одному члену с коэффициентом  $a_{ij}=1$ ; это — члены

$$P_2 P_3 Q_1 Q_4$$

и

$$P_1 P_4 Q_2 Q_3.$$

Итак, в рассматриваемом случае применение формулы (2.26) приводит к выражению

$$P_c(t) = P_1 P_3 (Q_2 Q_4 + P_2 Q_4 + P_4 Q_2 + P_2 P_4) + P_2 P_4 (Q_1 Q_3 + P_1 Q_3 + P_3 Q_1) + P_2 P_3 Q_1 Q_4 + P_1 Q_4 Q_2 Q_3.$$

После подстановки

$$P_i = 1 - Q_i \tag{2.28}$$

и элементарных преобразований это выражение приводится к виду (2.24).

Формула (2.26) применима, конечно, и к вычислению вероятности безотказной работы блока, состоящего из недедиминых элементов, характеризуемых вероятностями  $P_i(t)$  и  $Q_i(t)$ . Если в составе блока имеются элементы, отказы которых нельзя считать независимыми, то такие элементы следует рассматривать как единую часть блока, для которой должны

быть заданы вероятности  $P$  и  $Q$ . Когда зависимых элементов немного, то и в этом случае для надежности системы можно получить простую и хорошую оценку. Предположим, что при отказе одних элементов надежность других или не меняется, или уменьшается. Если считать, что отказы одних элементов не меняют надежности других, то тем самым надежность всей системы будет завышена. Наоборот, если считать, что отказы одних элементов вызывают отказы зависимых от них элементов, то тем самым надежность всей системы будет занижена. В обоих крайних случаях легко подсчитать вероятность безотказной работы системы. Пусть  $P_1$  — эта вероятность в первом случае,  $P_2$  — во втором. Тогда истинная вероятность безотказной работы  $P$  оценивается неравенством

$$P_2 < P < P_1.$$

Если приближенно положить, что  $P = P_2$ , то ошибка этого приближения будет меньше разности  $P_1 - P_2$ .

При наличии блоков, отказы которых нельзя считать независимыми, можно рассматривать такие блоки как единую часть системы, для которой, как и для других блоков, должны быть заданы вероятности  $P_i(t)$  и  $Q_i(t)$ , после чего можно пользоваться формулой (2.26) для вычисления вероятности безотказной работы [98].

Применим формулу (2.26) к блоку, состоящему из одинаковых элементов. В этом случае вероятности  $P_i$  и  $Q_i$  не зависят от номера элемента и могут быть обозначены через  $P_9$  и  $Q_9$ . Тогда, вводя общее число безотказно работающих элементов

$$h = n + l,$$

имеем из (2.26)

$$P_c(t) = \sum_{h=1}^k A_n P_9^h Q_9^{k-h}, \quad (2.29)$$

где  $A_n$  — возможное число путей передачи сигналов, когда  $h$  элементов действуют безотказно.

Вероятность отказа системы

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t); \quad (2.30)$$

она может быть вычислена с помощью формул (2.26) или (2.29). Можно, однако, получить другие выражения вероятности отказа. Для этого будем рассматривать условия, при которых та же система не пропускает сигнала вследствие отказа некоторого количества блоков из общего числа их  $k$ . Пусть в системе имеется  $r$  групп блоков, причем группы образуют основное соединение, а блоки каждой группы соединены резервно. Каждая группа вызывает отказ системы

при отказе всех  $s$  блоков, образующих эту группу. Тогда вероятность  $Q$  отказа системы равна сумме вероятностей отказа каждой из  $r$  групп. Обозначая через  $j$  номер группы, а через  $y$  — число отказавших блоков, не принадлежащих этой группе, будем иметь

$$Q_c(t) = \sum_{j=1}^r \sum_{y=0}^{k-s} b_{yj} \prod_{i=1}^{s+y} Q_i(t) \prod_{i=s+y+1}^k P_i(t). \quad (2.31)$$

Здесь номер блока  $i$  изменяется при суммировании по группам для того, чтобы блоки, образующие каждую группу, имели номера от 1 до  $s$ . Номера этих  $s$  блоков неизменны в пределах внутренней суммы, но при вычислении ее членов изменяются номера остальных  $k-s$  блоков, чтобы в переменное число блоков  $y$  последовательно входили все блоки из числа  $k-s$ . Коэффициент  $b_{yj}$  равен единице или нулю аналогично коэффициенту  $a_{ij}$  в (2.26). В остальном для формулы (2.31) не требуется пояснений, которые могли бы быть вполне аналогичными уже сделанным к формуле (2.26).

Применим формулу (2.31) к блоку, состоящему из одинаковых элементов, характеризуемых одинаковыми значениями вероятностей  $P_s$  и  $Q_s$ . В этом случае, введя общее число отказавших элементов

$$g = s + y,$$

из (2.31) получим

$$Q_c(t) = \sum_{g=1}^k B_g P_s^{k-g} Q_s^g, \quad (2.32)$$

где  $B_g$  — число групп, возможное при отказе  $g$  элементов; эти группы составлены из элементов, отказ которых вызывает отказ системы.

Выражения (2.29) и (2.32) представляют собой несколько видоизмененные формулы Мура и Шеннона [10], обобщением которых являются формулы (2.26) и (2.31). В формулах (2.29) и (2.32) некоторые члены иногда отсутствуют, так как при некоторых значениях  $h$  и  $g$  коэффициенты  $A_h$  и  $B_h$  могут быть равны нулю. Рассмотрим наименьшие значения  $h$  и  $g$ , при которых эти формулы имеют ненулевые члены. Пусть это будет  $h = L$  в формуле (2.29) и  $g = W$  в формуле (2.32). Число  $L$  определяет наименьшее количество элементов в пути, по которому сигнал может пройти через блок ( $A_L$  — число таких путей). Число же  $W$  определяет наименьшую по количеству группу элементов, при отказе которых сигнал не может пройти через блок (число таких групп равно  $B_W$ ). Число  $L$  называют длиной, а  $W$  — шириной схемы [10].



На рис. 2.5 приведен простейший пример схемы с указанием ее длины и ширины.

Применим формулу (2.29) к мостовой схеме, представленной на рис. 2.6, состоящей из пяти одинаковых элементов 1—5, последовательное соединение которых будем считать

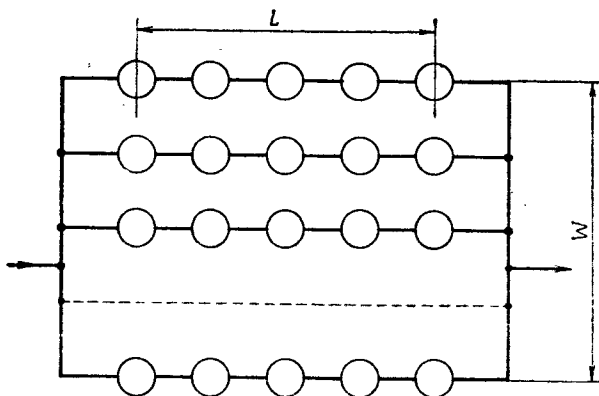


Рис. 2.5. Схема, имеющая длину  $L$  и ширину  $W$

основным. При безотказном действии лишь одного какого-либо элемента, т. е. при  $h=1$ , рассматриваемый блок действовать не может, поэтому  $A_1=0$ . Как видно из рис. 2.6, схема блока такова, что путь передачи сигнала должен содержать не менее двух элементов. При  $h=2$  возможны два пути: через элементы 1, 4 и через элементы 2, 5. Поэтому  $A_2=2$ . Каждый из этих путей будет действовать также при безотказной работе любого из трех остальных элементов блока, т. е. при безотказной работе элементов 1, 2, 4 или 1, 3, 4, или 1, 4, 5, или 1, 2, 5, или 2, 3, 5, или 2, 4, 5. Кроме того, возможны два пути передачи сигнала через три элемента: 1, 3, 5 и 2, 3, 4. Таким образом,  $A_3=8$ . Последние пути будут действовать также при безотказной работе элементов 2 или 4 в первом случае и элементов 1 или 5 — во втором, т. е. при безотказной работе элементов 1, 2, 3, 5 или 1, 3, 4, 5, или 1, 2, 3, 4, или 2, 3, 4, 5. А так как сигнал будет передан также при безотказной работе элементов 1, 2, 4, 5, то  $A_4=5$ . Очевидно, наконец, что  $A_5=1$

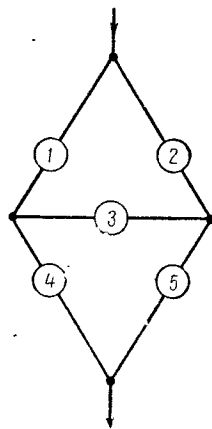


Рис. 2.6. Мостовая схема из пяти элементов

(случай безотказной работы всех пяти элементов). Пользуясь теперь формулой (2.29), имеем

$$P_c(t) = 2P_3^2 Q_3^3 + 8P_3^3 Q_3^2 + 5P_3^4 Q_3 + Q_3^5,$$

откуда после подстановки

$$Q_3 = 1 - P_3, \quad (2.33)$$

получаем выражение, указанное Муром и Шенноном [10]:

$$P_c(t) = 2P_3^2 + 2P_3^3 - 5P_3^4 + 2P_3^5. \quad (2.34)$$

Вероятность  $Q_c(t)$  можно найти также из формулы (2.26), а вероятность  $P_c(t)$  — из формулы (2.31). При конкретных численных значениях  $k$ ,  $m$  и  $n$  выражения  $P_c(t)$ , получаемые из (2.26) и совместным решением уравнений (2.30) и (2.31), приводятся к одинаковому виду с помощью уравнений

$$P_i(t)_i = 1 - Q_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

То же относится и к выражениям  $Q_c(t)$ ; их находим из (2.31) и совместным решением уравнений (2.26) и (2.30).

В частных случаях выражения (2.26) и (2.31) приводятся к виду (2.21) и (2.22). Действительно, если отказ системы возникает при отказе любого ее блока, то возможен лишь один путь прохождения сигнала, т. е.  $m = 1$ ,  $n = k$ ,  $a_{ij} = 1$ . При этом может быть лишь одно значение  $l = 0$ , и

$$\prod_{i=n+l+1}^k Q_i = 1.$$

Подставляя все эти значения в (2.26), получим (2.21). Если же каждый блок резервируется любым из остальных, то в системе имеется лишь одна группа, отказ блоков которой вызывает отказ системы, т. е. в (2.31)  $r = 1$ ,  $s = k$ ,  $b_{ij} = 1$ . В этом случае возможно только одно значение  $l = 0$ , и

$$\prod_{i=s+y+1}^k P_i = 1.$$

Подстановка всех этих значений в (2.31) приводит к (2.22).

Если свойства основных и резервных соединений изменяются так, что основные становятся резервными и наоборот (это возможно при изменении характера отказов, § 1.4), то вероятности  $P$  и  $Q$  меняются местами, как это видно из формул (2.21) и (2.22); это также видно из примера соединения, представленного на рис. 2.4, для которого были получены выражения (2.24) и (2.25). Таким образом, в формулах (2.26), (2.29), (2.31) и (2.32), полученных в предположении, что пути передачи сигналов, представляющие собой основное соединение блоков или элементов, соединены резервно,

вероятности  $P$  и  $Q$  меняются местами, если пути являются резервным соединением, а соединение путей — основным. В этом случае формулы (2.26) и (2.29) будут выражать вероятность  $Q(t)$ , а формула (2.31) и (2.32) — вероятность  $P(t)$ , причем в правых частях всех этих выражений вероятности  $Q_i$  должны быть поставлены на место вероятностей  $P_i$  и наоборот.

Когда возможны отказы различного вида, в зависимости от которого одни и те же соединения блоков — последовательные и параллельные — оказываются то основными, то резервными (§ 1.4), необходимо вычислять вероятности  $P_c(t)$  и  $Q_c(t)$  в обоих случаях и выбирать схему, обеспечивающую в этих условиях наибольшую надежность системы [8].

Следует заметить, что в реальных условиях формулы (2.29) и (2.32) не могут быть верны при любом значении времени  $t$ . Если до некоторого времени вероятности  $P_i$  для всех блоков или элементов одинаковы, то в дальнейшем различный износ этих частей системы неизбежно приведет к тому, что вероятности станут различными при одном и том же значении  $t$ . Поэтому эти формулы, полезные при синтезе систем, применимы к расчету вероятности  $P_c(t)$  лишь как приближенные выражения в предположении, что износ еще не оказывает заметного влияния. В отличие от этого формулы (2.26) и (2.31) дают возможность учитывать влияние износа, производя расчет для ряда значений  $t$  и принимая во внимание изменение всех вероятностей  $P_i$  и  $Q_i$  во времени.

### § 2.3. ЧИСЛО ОТКАЗОВ

Изучение числа отказов должно основываться, в отличие от изучения времени отказа, на функциях распределения случайных величин дискретного типа. При некоторых предположениях, ограничительных, но достаточно широких для практического применения, эти функции получают хорошо известные простые выражения.

При условии, что каждый отказ устраняется каким-либо способом, можно говорить о числе отказов, происходящих в рассматриваемом устройстве в течение некоторого промежутка времени  $t$ , а также о среднем времени между отказами  $\bar{t}$ , называемом еще наработкой на отказ. Если значение  $\bar{t}$  определено по данным, относящимся к существенно превосходящему его периоду работы рассматриваемого устройства, то математическое ожидание числа отказов за время  $t$

$$\bar{n} = \frac{t}{\bar{t}}. \quad (2.35)$$

Работу изучаемого устройства в течение времени  $t$  можно также осуществить посредством его  $m$  включений на время  $t_1$ , если

$$m = \frac{t}{t_1}. \quad (2.36)$$

Пусть вероятность отказа при работе рассматриваемого устройства в течение времени  $t_1$  равна  $Q(t_1)$  и одинакова при всех  $m$  включениях (износ элементов устройства не оказывает, следовательно, заметного влияния в течение времени  $t$ ). Тогда рассматривая каждый из  $m$  промежутков длительностью  $t_1$  как испытание, при котором отказ имеет вероятность  $Q(t_1)$ , найдем, что математическое ожидание числа отказов за время  $t$

$$\bar{n} = mQ(t_1). \quad (2.37)$$

Из выражений (2.35) и (2.37) следует:

$$mQ(t_1) = \frac{t}{t}. \quad (2.38)$$

Какова вероятность  $Q(n)$  того, что за время  $t$  произойдет  $n$  отказов? Заметим, что в каждом промежутке времени  $t_1$  может произойти только два интересующих нас в этой задаче несовместимых явления: отказ или безотказная работа. Поэтому искомая вероятность определяется биномиальным распределением

$$Q(n) = C_m^n Q^n(t_1) P^{m-n}(t_1). \quad (2.39)$$

Здесь

$$P(t_1) = 1 - Q(t_1),$$

$C_m^n$  — число сочетаний из  $m$  по  $n$ :

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}.$$

При  $n = m = 1$  из формулы (2.39) находим

$$Q(n)|_{n=1} = Q(t_1)$$

— вероятность одного отказа при включении блока на время  $t_1$ . В случаях, когда

$$\left. \begin{aligned} m &\gg 1 \\ n &\ll m \\ Q(t_1) &\ll 1 \end{aligned} \right\}, \quad (2.40)$$

биномиальный закон (2.39) приближенно выражается формулой распределения Пуассона:

$$Q(n) \approx \frac{1}{n!} \left(\frac{t}{t_1}\right)^n \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right), \quad (2.41)$$

где  $t$  связано с  $m$  соотношением (2.38)<sup>1</sup>. Формула Пуассона

<sup>1</sup> Здесь и далее применяется обозначение экспоненциальной функции  $\exp = e^x$ .  
во всех случаях сложного вида показателей степени  $x$ .

удобнее биномиального распределения, так как для нее не требуются знания величин  $m$  и  $Q(t_1)$ .

Из формулы (2.41) следует, что

$$\sum_{n=0}^{\infty} Q(n) = 1, \quad (2.42)$$

как из формулы (2.39) —

$$\sum_{n=0}^m Q(n) = 1. \quad (2.43)$$

На рис. 2.7 построены зависимости вероятности  $Q(n)$  по (2.41) от отношения  $t/\bar{t}$  при различных значениях  $n$  [11].

При

$$t = \bar{t} \quad (2.44)$$

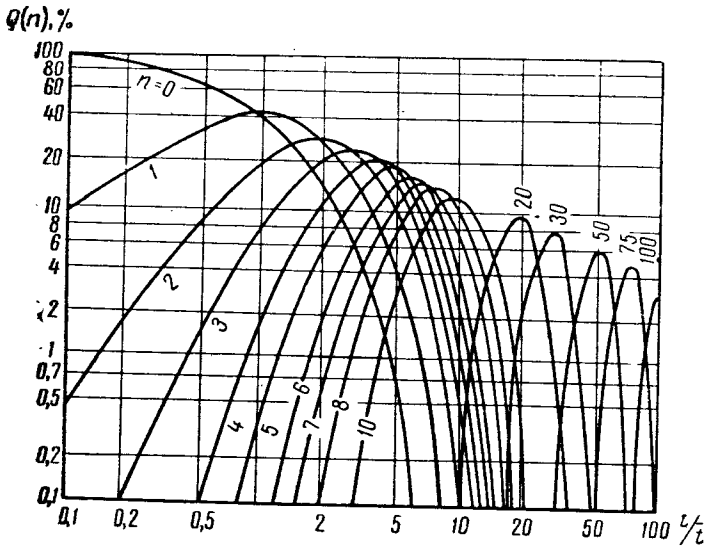


Рис. 2.7. Зависимость вероятности  $Q(n)$  от отношения  $t/\bar{t}$  при различных значениях  $n$

Формула (2.41) принимает вид

$$Q(n) = \frac{1}{en!}. \quad (2.45)$$

Отсюда получаются значения  $Q(n)$ , приведенные в табл. 2.1. Они представляют собой ординаты точек пересечения кривых рис. 2.7 с осью ординат.

Таблица 2.1

Вероятность числа отказов  $n$  за время  $t = \bar{t}$ 

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$Q(n), \%$	37	37	18	6	1,5	0,3	0,05

Когда происходит определенное число отказов, то очевидно, что в то же время произошло именно это, а не другое их число. Это значит, что для одного и того же  $t$  разные числа  $n$  представляют собой несовместимые события. Если произошло  $n$  отказов, то полное число отказов за то же время не равно ни нулю, ни единице и никакому другому числу, кроме  $n$ . Поэтому легко вычислить вероятность  $Q(N \leq n)$  того, что за время  $t$  произойдет  $n$  или менее (т. е. не более  $n$ ) отказов. Это — вероятность несовместимых событий, представляющих собой число отказов, равное нулю, единице, двум и т. д. до  $n$  включительно. Вероятность того, что произойдет какое-либо из рассматриваемых несовместимых событий равна сумме их вероятностей. Следовательно, по формуле (2.41)

$$Q(N \leq n) = \left[ 1 + \frac{t/\bar{t}}{1!} + \frac{(t/\bar{t})^2}{2!} + \dots + \frac{(t/\bar{t})^n}{n!} \right] \exp\left(-\frac{t}{\bar{t}}\right). \quad (2.46)$$

При  $n \rightarrow \infty$   $Q(N \leq n)$  имеет смысл вероятности того, что отказов не будет или же их будет сколько-нибудь. Очевидно, такая вероятность должна быть равна единице. Это и следует из формулы (2.46):

$$Q(N \leq \infty) = \exp\left(\frac{t}{\bar{t}}\right) \exp\left(-\frac{t}{\bar{t}}\right) = 1.$$

Зная вероятность того, что число отказов за время  $t$  не превышает  $n$ , легко найти и вероятность того, что оно не менее  $n + 1$ :

$$Q(N \geq n + 1) = 1 - Q(N \leq n). \quad (2.47)$$

На рис. 2.8 представлен график зависимостей вероятностей, находимых по формулам (2.46) и (2.47), от отношения  $t/\bar{t}$  при разных значениях  $n$  [11]. Абсциссы точек этого графика, соответствующие ординате  $t/\bar{t} = 1$ , легко получить по формуле (2.45). Например, при  $n = 1$

$$Q(N \leq n) = Q(0) + Q(1).$$

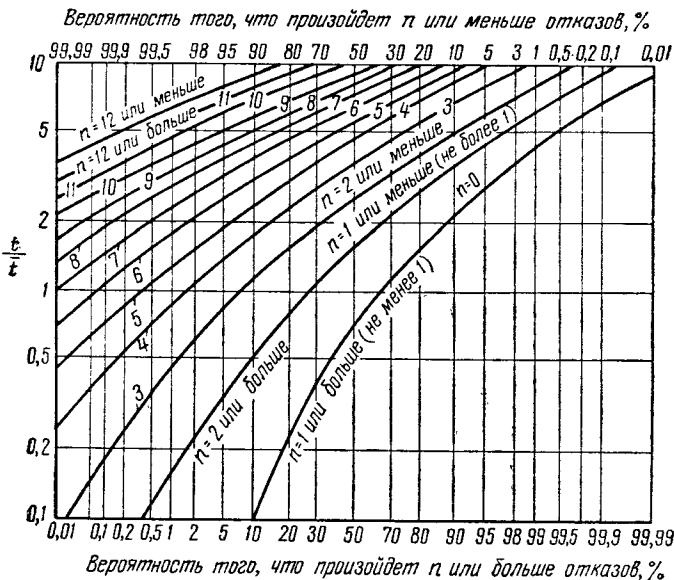


Рис. 2.8. График для определения вероятности числа отказов меньшего и большего  $n$

Пользуясь табл. 2.1, имеем:

$$Q(N \leq 1) = 37 + 37 = 74\%$$

и, согласно (2.47),

$$Q(N \geq 2) = 26\%.$$

#### § 2.4. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ЗАКОН НАДЕЖНОСТИ

Предположим, что в состав некоторого устройства входит группа однотипных элементов, число которых равно  $k$ , и что возникающие в этой группе отказы не устраняются. Пусть  $P(t)$  — вероятность безотказной работы, характеризующая элементы этого типа. По прошествии времени  $t$  после включения рассматриваемого устройства количество безотказно действующих элементов данной группы будет равно

$$kP(t),$$

а ко времени  $t + \Delta t$  —

$$kP(t + \Delta t).$$

Таким образом, количество элементов, отказавших за время от  $t$  до  $t + \Delta t$ , отнесенное к числу  $kP(t)$ , выразится разностью

$$1 - \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)}.$$

Деля относительное количество элементов, отказавших в интервале времени  $\Delta t$ , на этот интервал и переходя к пределу, получим интенсивность отказов элементов данного типа, называемую также опасностью отказов:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t) \Delta t}.$$

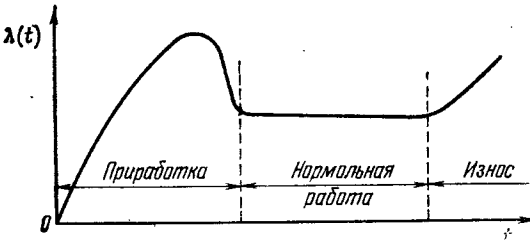
Отсюда имеем

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d}{dt} P(t) \quad (2.48)$$

и, по (2.11)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (2.49)$$

После включения рассматриваемого устройства обычно имеет место участок приработки, во время которого отказывают дефектные элементы. Затем наступает участок нормальной работы, сменяющийся участком износа, когда начинают отказывать износившиеся элементы. Интенсивность отказов приблизительно постоянна в течение времени работы группы элементов между участками их приработки и износа, когда, следовательно, имеют место лишь случайные отказы. Примерный вид зависимости интенсивности отказов от времени показан на рис. 2.9. Условие



$\lambda(t) = \text{const}$  (2.50) во время нормальной работы означает, что

Рис. 2.9. Зависимость интенсивности отказов от времени

в равные промежутки времени отказывает одинаковая доля работающих элементов.

Из выражения (2.48) следует, что

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln P(t),$$

откуда

$$P(t) = \exp \left[ -\int_0^t \lambda(t) dt \right] \quad (2.51)$$



— общее выражение экспоненциального закона надежности. При условии (2.50) это выражение принимает вид

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.52)$$

Отсюда следует, согласно (2.11), что в этом случае

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2.53)$$

т. е. имеет место — экспоненциальное распределение.

Соотношение (2.52) можно выразить также через среднее время отказа  $\bar{T}$ . Подставляя (2.52) в (2.13) находим, что

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.54)$$

Таким образом, при условии (2.50)  $\lambda$  имеет смысл средней частоты отказов. Подставляя (2.54) в (2.52), получаем

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{\bar{T}}\right). \quad (2.55)$$

Пользуясь формулой (2.17), вычислим дисперсию, имеющую место при соблюдении экспоненциального закона надежности:

$$\sigma^2 = \lambda \int_0^{\infty} t^2 e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \int_0^{\infty} (\lambda t)^2 e^{-\lambda t} d(\lambda t) - \frac{1}{\lambda^2},$$

откуда

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}, \quad (2.56)$$

т. е.

$$\sigma = \bar{T}. \quad (2.57)$$

При

$$t = \bar{T}$$

из выражения (2.55) следует:

$$P(t) = \frac{1}{e} = 0,37.$$

На этом основании среднее время отказа определяется как время, в течение которого вероятность безотказной работы уменьшается до 37%.

Выражения (2.51) и (2.52) определяют вероятность безотказной работы некоторого элемента через интенсивность отказов элементов того же типа. Рассмотрим теперь устройство, в состав которого входят  $k$  элементов, находящихся в основном соединении, в числе которых могут быть и элементы

разнотипные, характеризуемые интенсивностями отказов  $\lambda_i$  при  $i = 1, 2, \dots, k$  (если в числе  $k$  есть однотипные элементы, то значения  $\lambda_i$  для них, конечно, одинаковы). Пусть

$$\lambda_i = \text{const}, \quad (2.58)$$

т. е. все элементы работают нормально. Принимая во внимание, что при этом вероятность безотказной работы каждого элемента имеет выражение (2.52), найдем вероятность безотказной работы рассматриваемого устройства по формуле (2.21):

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^k \lambda_i t\right). \quad (2.59)$$

Величину

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (2.60)$$

называют интенсивностью отказов системы (или устройства, блока), состоящей из  $k$  элементов, находящихся в основном соединении. Среднее время отказа такой системы, по (2.54) и (2.60),

$$\bar{T}_c = \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{T_i}\right)^{-1}, \quad (2.61)$$

где  $\bar{T}_i$  — среднее время отказа  $i$ -го элемента.

Если условию (2.50) подчиняются все элементы рассматриваемой системы, то ему следует, очевидно, и интенсивность ее отказов  $\lambda_c$ . Рассматривая вероятность  $P_c(t)$  безотказной работы системы, легко получить для нее выражение, аналогичное (2.51), частным случаем которого при соблюдении условия (2.50) будет формула (2.59) или

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}.$$

При резервном соединении элементов систему также можно характеризовать некоторой интенсивностью отказов  $\lambda_c$ , но эта величина не может быть, конечно, получена по формуле (2.60).

Для системы  $k$  элементов, соединенных резервно, при условии (2.58) вероятность безотказной работы, находящаяся из формулы (2.22), после подстановки выражения (2.52):

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^k. \quad (2.62)$$

Подставляя последнее выражение в формулу (2.13), найдем среднее время отказа такой системы:

$$\bar{T}_c = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^k] dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^k (-1)^{j+1} \binom{k}{j} \frac{1}{j};$$

последнее выражение приводится [12] к виду

$$\bar{T}_c = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^k \frac{1}{j}. \quad (2.63)$$

Сложная система может подчиняться экспоненциальному закону надежности и в тех случаях, когда этому закону не следуют ее элементы, но отказавшие элементы восстанавливаются в процессе работы системы.

Интенсивность отказов системы

$$\lambda_c = \frac{1}{\bar{T}_c},$$

где  $\bar{T}_c$  — математическое ожидание времени первого отказа после включения системы. Это выражение легко получить подобно соотношению (2.54). С  $\bar{T}_c$  не совпадает среднее время между отказами  $\bar{t}$ ; среднее время характеризует последовательность отказов, начинающуюся с первого отказа после включения системы. Если допустить, что временем, необходимым для устранения отказа, можно пренебречь по сравнению с промежутком исправной работы или что это время равно нулю (автоматическое устранение отказа), то

$$\bar{t} = \bar{T}_c. \quad (2.64)$$

В этом случае экспоненциальный закон надежности следует из формулы Пуассона (2.41) при  $n=0$ , когда за время  $t$  не происходит ни одного отказа, вероятность чего равна вероятности безотказной работы:

$$Q(n)|_{n=0} = P(t).$$

После каждого отказа требуется некоторое время, называемое временем восстановления, чтобы найти отказавший элемент (гл. VIII), исправить его или заменить и, возможно, осуществить некоторые профилактические меры. Поэтому время между отказами складывается из времени восстановления и продолжительности исправной работы после ликвидации предыдущего отказа. Таким образом, предпосылки применения распределения Пуассона (§ 2.3) правильны, если временем восстановления после каждого отказа можно пренебречь по сравнению с продолжительностью исправной работы между отказами.

Вследствие приближенного характера экспоненциального закона надежности в некоторых случаях при обработке статистических данных оказывается точнее зависимость вида

$$P(t) = \exp[-(\lambda t)^a]. \quad (2.65)$$

Этой зависимости соответствует распределение Вейбулла [13]

$$f(t) = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} \exp[-(\lambda t)^\alpha]. \quad (2.66)$$

Численное значение  $\alpha$  определяется по данным испытаний. Экспоненциальный закон следует отсюда как частный случай при  $\alpha = 1$ . При  $\alpha = 2$  получаем закон, соответствующий распределению Релея

$$f(t) = 2\lambda^2 t \exp[-(\lambda t)^2]. \quad (2.67)$$

## § 2.5. ФУНКЦИЯ СОХРАННОСТИ

Рассматривая группу однотипных элементов и предполагая, что происходящие в ней отказы не устраняются, составим отношение количества элементов, отказывающихся за время от  $t$  до  $t + \Delta t$ , к числу элементов, отказавших ко времени  $t$ . Аналогично полученному при выводе формулы (2.48) запишем это отношение в виде

$$\frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{1 - P(t)}.$$

Деля это выражение на  $\Delta t$  и переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим функцию сохранности [5]

$$\mu(t) = -\frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{d}{dt} P(t). \quad (2.68)$$

Эта функция определяет количество отказывающихся элементов в долях от уже отказавших, тогда как интенсивность отказов определяет то же количество в долях от еще не отказавших элементов. При некотором значении  $\mu(t)$  количество отказывающихся элементов тем меньше, чем меньше элементов отказало ко времени  $t$ , т. е., чем сохраннее система.

Из (2.68) и (2.10) находим также, что

$$\mu(t) = \frac{d}{dt} \ln Q(t), \quad (2.69)$$

откуда получаем следующее выражение вероятности отказа, аналогичное экспоненциальному закону надежности:

$$Q(t) = \exp \int_0^t \mu(t) dt. \quad (2.70)$$

Функция сохранности дает возможность составить дополнительные зависимости между характеристиками надежности. Так, из выражения (2.11) следует, что

$$\mu(t) = \frac{f(t)}{Q(t)}. \quad (2.71)$$

По формулам (2.49) и (2.71)

$$P(t)\lambda(t) = Q(t)\mu(t). \quad (2.72)$$

Далее, исключая  $P(t)$  и  $Q(t)$  из тех же выражений с помощью соотношения (2.4), легко получить [5]:

$$f(t) = \frac{\mu(t)\lambda(t)}{\mu(t) + \lambda(t)}. \quad (2.73)$$

Таким образом, плотность вероятности исправной работы равна половине среднего гармонического между функцией сохранности и интенсивностью отказов<sup>1</sup>.

При соблюдении экспоненциального закона надежности функция сохранности, составляемая по (2.69), (2.52) и (2.4), имеет вид:

$$\mu(t) = \frac{\lambda}{e^{\lambda t} - 1}. \quad (2.74)$$

В этом случае при  $t \ll \bar{T}$ , принимая во внимание (2.54) и разлагая в ряд экспоненциальный член знаменателя, получаем

$$\mu(t) \approx \frac{1}{t}; \quad (2.75)$$

при  $t \gg \bar{T}$ , согласно (2.53) находим

$$\mu(t) \approx f(t). \quad (2.76)$$

## § 2.6. ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА

Экспоненциальный закон надежности, рассмотренный в § 2.4, применим в условиях, при которых имеют место лишь случайные отказы, но нет отказов вследствие износа (рис. 2.9). При этих условиях расчет характеристик надежности может быть основан, таким образом, на экспоненциальном законе распределения (2.53). В действительности отказы, обусловленные износом, происходят всегда и может быть лишь преобладание случайных отказов. В этом случае и применяется экспоненциальное распределение. Если же преобладают отказы, вызываемые износом, то следует пользоваться нормальным законом распределения. В промежуточных случаях, когда ни один из видов отказа не превалирует над другим, расчет надежности производят на основе гамма-распределения [5]. Функции распределения вероятностей величин дискретного типа, рассмотренные в § 2.3, относятся, как уже было отмечено, к условиям, в которых износ не

<sup>1</sup> Среднее гармоническое чисел  $a$  и  $b$  равно  $\frac{2ab}{a+b}$ .

оказывает заметного влияния, т. е. имеет место экспоненциальное распределение.

Нормальное распределение, часто называемое законом Гаусса, относится к случаям, в которых появление того или иного значения случайной величины зависит от большого числа случайных событий, каждое из которых оказывает на эту величину малое влияние, причем ни одно влияние не превалирует. Для времени отказа нормальное распределение имеет выражение

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t - \bar{T})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2.77)$$

если  $\sigma^2$  — дисперсия, а  $\bar{T}$  — среднее время отказа. При этом

$$Q(t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{t - \bar{T}}{\sigma \sqrt{2}} \right). \quad (2.78)$$

Действительно, подстановка (2.77) в (2.8) дает

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp \left[ -\frac{(t - \bar{T})^2}{2\sigma^2} \right] dt.$$

Отсюда, вводя новую переменную

$$x = \frac{t - \bar{T}}{\sigma},$$

находим, что при условии (2.1) вероятность отказа в интервале времени 0,  $t$

$$Q(t) = \Phi(x),$$

т. е. выражается интегралом Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Тогда, принимая во внимание связь этого интеграла с интегралом вероятности ошибки  $\operatorname{erf} x$ , т. е.

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{2}} \right),$$

получаем выражение (2.78), а следовательно,

$$P(t) = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{t - \bar{T}}{\sigma \sqrt{2}} \right). \quad (2.79)$$

В предельном случае, когда отказы возникают только от износа,  $P(t) = Q(t) = 1/2$ .

Гамма-распределение для рассматриваемых применений может быть взято в форме<sup>1</sup>:

$$f(t) = \frac{1}{\alpha! \beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha e^{-t/\beta}, \quad (2.80)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — положительные числа, причем  $\alpha$  — целое. При помощи параметров  $\alpha$  и  $\beta$  учитывают относительное влияние отказов по случайным причинам и вследствие износа.

Из формул (2.8) и (2.80) находим

$$Q(t) = \frac{1}{\alpha!} \int_0^x x^\alpha e^{-x} dx,$$

где

$$x = \frac{t}{\beta}, \quad (2.81)$$

или (в удобной для вычисления форме [5])

$$Q(t) = 1 - e^{-t/\beta} \sum_{j=0}^{\alpha} \frac{1}{j!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^j. \quad (2.82)$$

Из выражения (2.82) легко найти вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-t/\beta} \sum_{j=0}^{\alpha} \frac{1}{j!} \left(\frac{t}{\beta}\right)^j. \quad (2.83)$$

Среднее время отказа при наличии гамма-распределения вычислим по (2.12) с помощью подстановки (2.81):

$$\bar{T} = \frac{\beta}{\alpha!} \int_0^{\infty} x^{\alpha+1} e^{-x} dx.$$

откуда

$$\bar{T} = \beta(\alpha + 1). \quad (2.84)$$

При этом, по (2.17), дисперсия

$$\sigma^2 = \frac{\beta^2}{\alpha!} \int_0^{\infty} x^{\alpha+2} e^{-x} dx - \beta^2(\alpha + 1)^2,$$

т. е.

$$\sigma^2 = \beta^2(\alpha + 1). \quad (2.85)$$

<sup>1</sup> О гамма-распределении см. [14].

При  $\alpha = 0$  из последних выражений следует:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \beta, \\ \sigma^2 &= \bar{T}^2, \\ f(t) &= \frac{1}{\bar{T}} \exp\left(-\frac{t}{\bar{T}}\right),\end{aligned}$$

т. е. гамма-распределение превращается в экспоненциальное, соответствующее слабому влиянию износа. Таким образом, рост влияния износа выражается в увеличении параметра  $\alpha$ . Иначе говоря, износ не оказывает заметного влияния и, следовательно, действует экспоненциальный закон надежности, если, согласно (2.57),

$$\bar{T} \approx \sigma. \quad (2.86)$$

Когда экспериментально найденные значения дисперсии и среднего времени отказа не удовлетворяют условию (2.86), экспоненциальный закон применять нельзя, так как это указывает на существенное влияние износа (§ 4.1). Тогда следует пользоваться гамма-распределением, определив параметры  $\alpha$  и  $\beta$  по известным значениям  $\bar{T}$  и  $\sigma$ . Из уравнения (2.84) и (2.85) находим:

$$\alpha = \frac{\bar{T}^2}{\sigma^2} - 1, \quad (2.87)$$

$$\beta = \frac{\sigma^2}{\bar{T}}. \quad (2.88)$$

Но так как  $\alpha$  должно быть целым числом, то следует, округлив его до целого числа при вычислении по (2.88), найти затем  $\beta$  из (2.84) или (2.85):

$$\beta = \frac{\bar{T}}{\alpha + 1} = \frac{\sigma}{\sqrt{\alpha + 1}}. \quad (2.89)$$

Рассмотрим случай предельного нарушения условия (2.86), когда

$$\bar{T} \gg \sigma, \quad (2.90)$$

а следовательно, по (2.87),

$$\alpha \approx \frac{\bar{T}^2}{\sigma^2} \gg 1, \quad (2.91)$$

что означает преобладающее влияние износа. При условии (2.91) выражение гамма-распределения можно преобразовать, пользуясь формулой Стирлинга, согласно которой

$$\alpha! \approx \sqrt{2\pi} \alpha^{x+1/2} e^{-\alpha}.$$



Тогда это распределение принимает вид

$$f(t) = \frac{1}{\beta \sqrt{2\pi\alpha}} \left(\frac{t}{\alpha\beta}\right)^\alpha e^{-\frac{t}{\beta} + \alpha}.$$

Согласно (2.88), (2.89) и (2.91),

$$\beta \sqrt{\alpha} = \sqrt{\sigma}$$

и

$$\alpha\beta = \bar{T}.$$

Тогда

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left(\frac{t}{\bar{T}}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{t - \bar{T}}{\sigma^2} \bar{T}\right). \quad (2.92)$$

При  $t = \bar{T}$  из (2.92) следует, как и при нормальном распределении, что

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}.$$

Из этого выражения видно, что в рассматриваемых условиях, когда преобладают отказы вследствие износа, гамма-распределение приближается к нормальному.



## ИСПЫТАНИЕ НАДЕЖНОСТИ

### § 3.1. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АУС В ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

Автоматические управляющие системы (АУС) по своему назначению могут быть разделены на два класса: системы многократного действия и системы разового действия.

Системы обоих классов могут находиться либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Критерии и границы перехода из одного состояния в другое устанавливаются конкретно для каждого вида аппаратуры, исходя из определения отказа (§ 1.3). После каждого отказа система должна быть приведена в исправное состояние.

В эксплуатации количественной характеристикой надежности (эксплуатационной) может служить соотношение суммарной продолжительности исправной работы или суммарной наработки  $T_p$  и суммарного времени восстановления  $T_v$ .

Суммарная продолжительность исправной работы

$$T_p = T_{p_1} + T_{p_2} + \dots + T_{p_n};$$

суммарное время восстановления

$$T_v = T_{v_1} + T_{v_2} + \dots + T_{v_n},$$

где  $n$  — число отказов за рассматриваемый период работы системы;

$T_{p_1} — T_{p_n}$  — отрезки времени исправной работы между отказами;

$T_{v_1} — T_{v_n}$  — отрезки времени восстановления после каждого отказа.

$T_p$  и  $T_v$  — случайные величины, зависящие от разнообразных факторов. Заметим, что  $T_{p_1}$  есть время отказа  $T$  (§ 2.1) и что отношение  $T_v$  к  $T_{p_1}$  представляет собой вероятность состояния отказа.

Система разового действия, предназначенная для кратковременной работы, обычно не восстанавливается, т. е. для нее  $T_v = \infty$ , как и для всякой невосстанавливаемой системы.

Характеристикой эксплуатационной надежности может служить также вероятность безотказной работы  $P(t)$  (§ 1.3). Эта вероятность является основной характеристикой для систем разового действия. В основном на ее величину влияют количество и качество применяемых элементов, техническая обоснованность схемно-режимного применения элементов и конструкция системы. Кроме того, влияют условия, в которых работает система, стандартизация элементов и схем, технология изготовления системы, методика испытаний и проверки системы и ее частей, качество упаковки и т. п.

Другая характеристика эксплуатационной надежности — вероятность  $R(t)$  того, что в течение заданного времени любой отказ системы может быть устранен. Эта вероятность характеризует восстанавливаемость или ремонтпригодность системы. Вероятность  $R(t)$  зависит от доступности узлов и элементов для осмотра и ремонта, качества технической документации, наличия необходимой контрольно-измерительной аппаратуры и элементов автоматического обнаружения неисправностей, квалификации и опыта обслуживающего персонала, наличия необходимых запасных частей и материалов и т. п.

Наконец, характеристикой эксплуатационной надежности является вероятность исправного состояния  $S(t)$ , т. е. того, что система будет в исправном состоянии в любой момент времени  $t$  после включения. Эта вероятность определяется отношением числа исправных систем к их общему числу в момент времени  $t$ . Вероятность  $S(t)$  является обобщенным показателем эксплуатационной надежности системы, так как она зависит как от вероятности  $P(t)$ , так и от вероятности  $R(t)$ . До первого отказа  $S(t)$  совпадает с  $P(t)$ . В частности это имеет место для невосстанавливаемых систем.  $S(t)$  дает возможность оценить среднее число простаивающих систем и определить количество систем, необходимое для решения поставленной перед ними задачи управления.

Вероятности  $P(t)$ ,  $R(t)$  и  $S(t)$  достаточно полно и всесторонне характеризуют эксплуатационную надежность АУС, но их значения не определяются непосредственно в процессе эксплуатации или специальных испытаний, когда возможно достаточно точно с требуемой достоверностью оценить лишь некоторые критерии надежности, по которым можно определить доверительные области для этих вероятностей. К таким критериям относятся средняя суммар-

ная продолжительность исправной работы  $\bar{T}_p$  (математическое ожидание времени  $T_p$  для заданного времени эксплуатации), среднее суммарное время восстановления  $\bar{T}_v$  (математическое ожидание времени  $T_v$  для заданного времени эксплуатации) и коэффициент вынужденного простоя

$$k_n = \frac{\bar{T}_v}{\bar{T}_v + \bar{T}_p}. \quad (3.1)$$

Коэффициент готовности, характеризующий вероятность того, что система будет работоспособна в любой момент времени:

$$k_r = 1 - k_n.$$

Как показывает опыт (результаты обработки статистических данных), в режиме нормальной работы распределение суммарной продолжительности исправной работы является экспоненциальным (§ 2.4)

$$f(t) = \frac{1}{\bar{T}_p} e^{-\frac{t}{\bar{T}_p}},$$

а распределение суммарного времени восстановления может быть описано функцией вида

$$f(t) \approx \frac{4}{\bar{T}_v^2} t e^{-\frac{2t}{\bar{T}_v}}. \quad (3.2)$$

Распределение (3.2) является частным случаем гамма-распределения (2.74), из которого оно следует при  $\alpha=1$  и  $\beta=\bar{T}_v/2$ . Отсюда, по (2.7), вероятности  $P(t)$  и  $R(t)$  зависят от критериев  $\bar{T}_p$  и  $\bar{T}_v$ :

$$P(t) = e^{-\frac{t}{\bar{T}_p}}, \quad (3.3)$$

$$R(t) = 1 - \left(1 + \frac{2t}{\bar{T}_v}\right) e^{-\frac{2t}{\bar{T}_v}}. \quad (3.4)$$

В свою очередь, критерии  $\bar{T}_p$  и  $\bar{T}_v$  можно определить через  $P(t)$  и  $R(t)$  или соответственные функции  $f(t)$  на основании формул (2.12) и (2.13).

Опыт показывает также, что для значений  $t$ , значительно превосходящих среднее время отказа  $\bar{T}$ , вероятность

$$S(t) = 1 - k_n \left(1 - e^{-\frac{1}{k_n} \cdot \frac{t}{\bar{T}_p}}\right). \quad (3.5)$$

Представляет интерес рассмотреть выражение вероятности  $S(t)$  в некоторых частных случаях.

1. Случай автоматического резервирования,  $T_b = 0$ . При этом, очевидно,  $S(t) = 1$ , как и следует из (3.5) при  $k_n = 0$ , т. е. такая система будет всегда находиться в исправном состоянии, но вероятность безотказной работы  $P(t)$  при этом может быть любая (даже очень малая, если  $\bar{T}_p \ll t$ ).

2. Случай невозстанавливаемой системы,  $\bar{T}_b = \infty$ . Здесь, очевидно,

$$S(t) = P(t).$$

Действительно, подставив  $k_n = \infty$  в формулу (3.5), получим

$$S(t) = e^{-\frac{t}{\bar{T}_p}}.$$

3. В нормальном режиме работы существует время  $t = t_c$ , по истечении которого устанавливается практически стационарное, не зависящее от времени, значение вероятности  $S(t)$ :

$$S = \lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 1 - k_n. \quad (3.6)$$

Это следует из формулы (3.5) при  $t \rightarrow \infty$ .

Значение  $S$  увеличивается с увеличением вероятности  $P(t)$ , т. е. с увеличением средней суммарной продолжительности исправной работы  $\bar{T}_p$  и с уменьшением  $\bar{T}_b$ , когда увеличивается вероятность  $R(t)$ .

Число исправных систем  $N_n$  в момент времени  $t$ :

$$N_n(t) = N_0 S(t), \quad (3.7)$$

где  $N_0$  — общее количество таких систем, одновременно пущенных в ход. Если АУС предназначена для длительной работы, то целесообразнее воспользоваться стационарным значением вероятности  $S(t)$ . Тогда

$$N_n = N_0 S. \quad (3.8)$$

Определив  $N_n(t)$ , можно найти число простаивающих систем:

$$N_{пр}(t) = N_0 - N_n(t). \quad (3.9)$$

Поясним приведенные соотношения на примере. Пусть  $N_0 = 100$ . Среднее время исправной работы одной системы  $\bar{T}_p = 1000$  час. Среднее время восстановления  $\bar{T}_в = 100$  час. Необходимо определить вероятность безотказной работы за время  $t = 100$  час, восстанавливаемость за 24 час и число простаивающих систем  $N_{пр}$  при  $t = 100$  час.

По формуле (3.3) находим

$$P(t) = e^{-\frac{100}{1000}} \approx 0,90;$$

по формуле (3.4)

$$R(t) = 1 - \left(1 + \frac{2 \cdot 24}{100}\right) e^{-\frac{2 \cdot 24}{100}} \approx 0,08.$$

Далее по формуле (3.1) находим  $k_n = 0,09$ , а по формуле (3.6)

$$S = 1 - 0,09 = 0,91.$$

Отсюда число простаивающих систем по (3.9)

$$N_{пр} = 100(1 - 0,91) = 9.$$

Критерий надежности  $\bar{T}_p$  для АУС многократного действия определяется из ряда испытаний. Если число испытаний равно  $n$  и в  $i$ -испытании получено время безотказной работы  $T_{pi}$ , то

$$\bar{T}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{pi}. \quad (3.10)$$

Рассмотрим критерий надежности  $\bar{T}_p$  для невосстанавливаемых АУС. В этом случае  $\bar{T}_p$  определяется через вероятность  $P(t)$ . За рассматриваемое время  $t$  в каждой из таких систем либо произойдет отказ в момент  $t_i \leq t$ , либо система проработает время  $t$  исправно. При испытании  $N_0$  образцов в нормальном режиме работы, т. е. ранее прошедших период приработки, некоторая часть систем  $N_n$  проработает исправно, а часть  $N_0 - N_n$  откажет в различные моменты времени

$$t_1, t_2, \dots, t_N.$$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  может быть представлена как предел отношения суммарного времени  $t_n$  исправной работы всех  $N_0$  систем за время  $t$  к наибольшему возможному суммарному времени  $N_0 t$  безотказной работы тех же систем, когда число  $N_0$  стремится к бесконечности:

$$P(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{t_n}{N_0 t}. \quad (3.11)$$

При конечном значении  $N_0$  выражение

$$\overline{P(t)} = \frac{t_n}{N_0 t}, \quad (3.12)$$

имеющее смысл частоты безотказной работы рассматриваемых систем, может служить статистической оценкой вероятности  $P(t)$ .

Время  $t_n$  можно определить через значения  $t_1, t_2, \dots, t_N$  как

$$t_n = \sum_{i=1}^N t_i + (N_0 - N)t.$$

Тогда

$$\overline{P(t)} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i + (N_0 - N)t}{N_0 t}. \quad (3.13)$$

Если в нормальном режиме

$$\overline{P(t)} = e^{-\frac{t}{\overline{T}_p}}, \quad (3.14)$$

то значение  $\overline{T}_p$  легко определить как

$$\overline{T}_p = -\frac{t}{\ln \overline{P(t)}}. \quad (3.15)$$

Для времени восстановления  $\overline{T}_v$ , аналогично формуле (3.10), имеем:

$$\overline{T}_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{vi}. \quad (3.16)$$

Поясним на примере, как определяется среднее время между отказами. Пусть испытания прекращаются после определенного числа отказов  $n$ . В процессе испытаний отказавшие устройства могут заменяться или же не заменяться. Начальное число устройств, испытываемых на срок службы, равно  $N_0$ . Среднее время отказа (или исправной работы)

$$\overline{T} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i + (N_0 - n)T_n}{n}, \quad (3.17)$$

где  $T_i$  — время работы  $i$ -элемента до отказа. Это верно для случая, когда испытания прекращены после  $n$  отказов и элементы в процессе испытаний ее заменяются.

В случае замены каждого отказавшего элемента  $n$  неограничено, и тогда

$$\bar{T} = \frac{N_0 T_n}{n} \quad (3.18)$$

Разработаны методы определения доверительных интервалов по данным испытаний на среднее время между отказами и среднее время отказа [15, 16]. Доверительный интервал определяется вероятностью того, что в его границах находятся значения неизвестного параметра, найденные при испытаниях<sup>1</sup>.

### § 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ВЫБОРКИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

Одним из наиболее употребительных критериев надежности для заданных условий работы является интенсивность отказов  $\lambda$ , которая может быть определена по формуле

$$\lambda = \frac{n}{N\Delta t} \text{ 1/час}, \quad (3.19)$$

где  $N$  — среднее из количеств элементов исправно работавших в начале и в конце интервала  $\Delta t$ ;

$n$  — количество отказов за время  $\Delta t$ , в течение которого отказавшие элементы не восстанавливаются.

Интенсивность отказов определяется для периода нормальной работы элементов (§ 2.4).

Чтобы определить какое-либо общее свойство (в том числе  $\lambda$ ) однородных элементов, обладающих качественной общностью (генеральная совокупность), необходимо провести случайный отбор некоторой части  $M$  составляющих ее элементов, т. е. выборку. С помощью выборки можно определить интенсивность отказов  $\lambda$  генеральной совокупности только приближенно. Очевидно, что точность результата тем больше, чем больше будет  $M$ .

В реальных условиях возникает необходимость ограничить размер выборки. Этот размер подбирается таким, чтобы число отказов обеспечивало достаточную точность определения  $\lambda$ . Количество отказов в данной выборке в определенное время зависит как от свойств, присущих испытываемым эле-

<sup>1</sup> О доверительных интервалах или границах см., например, [17] и [99].



ментам, так и от условий испытаний. Для учета этих факторов при определении требуемого размера выборки следует задаться предполагаемым значением математического ожидания интенсивности отказов  $\bar{\lambda}$  в генеральной совокупности. В качестве  $\bar{\lambda}$  может быть принята средняя интенсивность отказов, определенная ранее в аналогичных испытаниях. Математическое ожидание

$$\bar{\lambda} \approx \frac{\bar{n}}{M \cdot t}, \quad (3.20)$$

где  $\bar{n}$  — математическое ожидание количества отказов в выборке  $M$  за время  $t$ .

Соотношение между математическим ожиданием  $\bar{n}$  и фактическим количеством отказов, полученным при испытании выборки  $M$  за время  $t$ , дает формула Пуассона. Из выражений (2.35) и (2.46) находим

$$Q(N \leq n) = e^{-\bar{n}} \sum_{j=0}^n \frac{\bar{n}^j}{j!}. \quad (3.21)$$

Это — вероятность того, что число отказов  $N$  будет не более  $n$ . Подставляя сюда выражение  $\bar{n}$  из (3.20), т. е.

$$\bar{n} = Mt\bar{\lambda}, \quad (3.22)$$

получим

$$Q(N \leq n) = e^{-Mt\bar{\lambda}} \sum_{j=0}^n \frac{(Mt\bar{\lambda})^j}{j!}. \quad (3.23)$$

Вероятность того, что число отказов будет не менее  $n + 1$ , определяется по формуле (2.47). В случае применения формул (3.23) и (2.47) можно пользоваться графиком, представленном на рис. 2.8, полагая согласно (2.35), что по оси ординат отложено математическое ожидание (3.22).

Для определения размера выборки при заданных значениях  $\bar{\lambda}$  (по данным предыдущих испытаний) и  $t$  (по условиям испытания) следует исходить из желательного числа  $n$  и достаточной вероятности  $Q(N \geq n)$ . Тогда по рис. 2.8 определяется  $n$ , а

$$M = \frac{\bar{n}}{t\bar{\lambda}}. \quad (3.24)$$

Рассмотрим пример, в котором  $\bar{\lambda} = 10^{-5} \text{ час}^{-1}$ ,  $t = 100 \text{ час}$ . Пусть  $n = 5$  при  $Q(N \geq n) = 0,95$ . По рис. 2.8 находим  $\bar{n} = 2$ . Следовательно,

$$M = \frac{2}{100 \cdot 10^{-5}} = 2000.$$

### § 3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Все большее усложнение АУС вызывает необходимость проведения все более подробных испытаний на надежность. При испытаниях приходится учитывать влияние следующих факторов и условий: характер изменения нагрузок и питающих напряжений, температуру, влажность, пыль, брызги, радиацию, соленый туман, возможность образования грибков, вибрации, тряску, удары и ускорения, а также возможность смены быстрозаменяемых элементов, герметичность, ветроустойчивость, а также свойства конструкции. Обычно испытывают аппаратуру при одновременном воздействии одного, двух или трех факторов. Это приводит к затяжке испытаний и не дает возможности проводить их в реальных условиях эксплуатации, в которых АУС может находиться под воздействием большого числа факторов.

Различные воздействия на аппаратуру в большинстве случаев изучены. При проектировании и эксплуатации могут быть приняты меры для предотвращения или ослабления их влияния. Это ни в коем случае не говорит о том, что соответственные испытания не нужны или что эти испытания не дадут ничего нового.

АУС состоят в основном из комплектующих элементов, параметры которых имеют разброс, снижающий точность проектных предположений. Возможно, конечно, при изготовлении АУС применить только прецизионные элементы, или производить специальный подбор их, но практически это допустимо лишь в особых случаях, так как приводит к резкому удорожанию систем и понижает ремонтпригодность.

Таким образом, испытания могут дать результаты не поддающиеся расчету, тем более, что совместное воздействие на АУС многих факторов практически мало изучено. Для получения объективной оценки работы системы недостаточно измерять только выходные параметры. Совершенно необходимы измерения и в промежуточных точках.

При испытании сложных АУС измерение большого числа параметров без автоматизации почти невозможно, тем более,

что в большинстве случаев требуется производить измерения ряда величин одновременно. В практике часто бывают случаи, когда система, испытанная на надежность и показавшая хорошие результаты, в эксплуатации дает резкое повышение интенсивности отказов. Обычно причину этого нужно искать в неполных и необъективных результатах испытаний, полученных без автоматической испытательной аппаратуры.

Работы по созданию автоматических испытательных установок начались около 10 лет тому назад, в частности в США, где стали создавать полуавтоматические испытательные устройства для радиолокационных станций и других сложных радиоэлектронных систем. В то же время были достигнуты большие успехи в создании электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ) и появилась возможность применять при разработке автоматических испытательных устройств принципы их действия. Это дало возможность перейти от разработки полуавтоматических испытательных устройств к автоматическим.

Представляет интерес проанализировать принципы построения и работу уже имеющихся полуавтоматических и автоматических испытательных установок и наметить основные требования к универсальным комплексным автоматическим устройствам для испытания систем и элементов на надежность.

Разработки автоматической испытательной установки (АИУ) для какой-либо конкретной АУС следует начинать одновременно с проектированием системы, которое надо вести с учетом возможности применения АИУ, обеспечивая возможность простого и быстрого доступа к соответственным точкам схемы.

Под АИУ будем понимать установки для всесторонних испытаний АУС в нормальных климатических условиях. В отличие от этого климатическими испытательными установками (КИУ) будем называть автоматические устройства для испытания АУС в условиях одновременного воздействия нескольких климатических и других факторов по определенной программе. Автоматический испытатель надежности (АИН) должен действовать в условиях, для которых предназначены АИУ и КИУ.

Наиболее совершенная АИУ (АИН) определяет неисправность целого блока и указывает метод, средства и время, необходимые для устранения неисправности.

Принцип действия КИУ поясняется примером его функциональной схемы, показанной на рис. 3.1. Эта схема содержит:

ПУ — пульт управления;  
 АПУ — автоматическое программирующее устройство;  
 ИУС — имитатор управляющих сигналов;  
 ИВ — источники климатических и других воздействий;  
 КИ — камеру испытаний;  
 Д — датчики климатических и других воздействий;  
 УИ — устройства индикации,  
 П — преобразователи;  
 К — компаратор;  
 А — анализатор.

Первая группа элементов (ПУ, АПУ, ИУС, ИВ) должна вырабатывать по определенной программе сигнальные воздействия, имитирующие реальные, вторая (Д, УИ) — осуществляет контроль условий, возникающих в КИ, и, наконец,

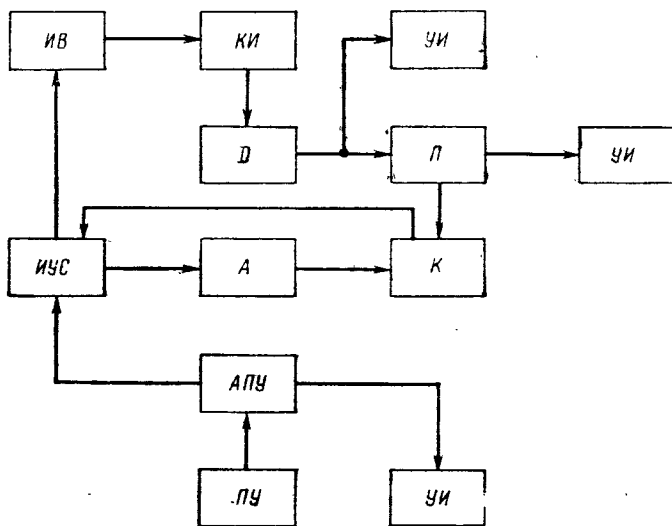


Рис. 3.1. Функциональная схема КИУ

третья группа (П, К, А) производит сравнение заданных и измеренных воздействий, анализирует полученные результаты и управляет ИУС по цепи обратной связи.

Принципы построения АИУ не отличаются от реализуемых в КИУ. Функциональная схема АИУ вместо КИ будет иметь испытуемую систему. Назначение каждого из элементов функциональной схемы АИУ, также как и его конструктивное исполнение, будут отличаться от назначения и исполнения аналогичного элемента функциональной схемы КИУ.

Эти отличия определяются также типом испытываемой посредством АИУ системы.

Одной из простейших автоматических испытательных установок является автоматический испытатель монтажа «Роботестер» [18].

Структура АИН включает в себя элементы АИУ и КИУ. Пульт управления и автоматическое программирующее устройство объединяются.

Быстрый метод испытаний состоит в том, что производится контроль данных одновременно в нескольких контрольных точках. Эти данные поступают в анализатор, который устанавливает необходимость контроля в дополнительных точках и определяет эти точки.

Необходимо, чтобы сложные АИН имели средства самопроверки.

---

## НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ АУС

### § 4.1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Надежность АУС может быть существенно повышена, если их элементы изготавливать из материалов, стойких по отношению механических, климатических, химических, электрических и других воздействий, которым они могут подвергнуться при изготовлении, хранении и эксплуатации, а также если конструирование и сборка элементов выполнены так, чтобы элементы лучшим образом соответствовали своему назначению.

Таблица 4.1

Относительное количество наиболее распространенных элементов АУС

Элементы	Относительное количество в системе, %
Сопротивления . . . . .	19,4÷26
Предохранители . . . . .	13,2÷20,9
Конденсаторы . . . . .	11,5÷14,3
Осветительные и индикаторные лампы . . . . .	7,6÷24,6
Полупроводниковые приборы . . . . .	4,1÷15,4
Трансформаторы и дроссели . . . . .	3÷5,7
Коммутационные элементы . . . . .	1÷5
Электровакуумные приборы . . . . .	0,9÷5,9
Сельсины, двигатели, преобразователи . . . . .	0,9÷3
Реле . . . . .	0,5÷1,9
Измерительные приборы . . . . .	0,2÷1
Катушки индуктивности, фильтры, линии задержки . . . . .	0,2÷0,6
Селеновые выпрямители . . . . .	0,1÷6,8

Среди элементов АУС наиболее распространены сопротивления, конденсаторы, осветительные и индикаторные лампы, полупроводниковые приборы, трансформаторы, электровакуумные приборы и другие элементы. Основные классы элементов АУС и их относительные количества приведены в табл. 4.1 [9].

## Классификация элементов

Уровень надежности элементов	Условное обозначение	Интенсивность отказов, в процентах на 1000 час работы	Примечания
Для широкого потребления	<i>O</i>	20	Элементы этого уровня применяются для изделий общего пользования, не требующих количественной оценки надежности
Низкий	<i>R</i>	1,5	К этому уровню относятся элементы для неответственных изделий, но требующих количественной оценки надежности
Стандартный	<i>S</i>	0,5	—
Облегченный	<i>DS</i>	0,15	Это элементы уровня <i>S</i> , надежность которых повышена за счет облегчения режимов работы
Стандартный	<i>T</i>	0,05	—
Верхний	<i>DT</i>	0,01	Это элементы уровня <i>T</i> , надежность которых повышена за счет облегчения режимов работы
Облегченный			
Верхний			
Высший	<i>U</i>	0,005	—

Надежность элементов будем характеризовать интенсивностью отказов  $\lambda$  (§ 2.4). Как правило, интенсивность отказов приводится в литературе или в процентах на 1000 или 100 час, или в виде дробного числа на 1 час работы. Поскольку принято считать (и этого нужно добиваться специальными мерами), что все элементы в аппаратуре используются в период нормальной работы, то значения интенсивности отказов даются в виде постоянной величины, так как периоды приработки и износа не рассматриваются (рис. 2.9).

Интенсивность отказов для различных типов элементов меняется в широких пределах. Удобно разбить все элементы в зависимости от их  $\lambda$  на несколько групп, как это сделано, например, в классификации элементов, приведенной в табл. 4.2 [19].

Одной из существенных причин отказов элементов в работе являются температурные воздействия на них при очень высокой или очень низкой температуре, а также быстрое ее изменение, которое действует особенно разрушительно. Изменения температуры и вызываемые ими изменения геометрических размеров элементов сказываются на их электрических параметрах (например, у конденсаторов и катушек

индуктивности, настраиваемых при помощи сердечников). Электрические параметры (например, параметры постоянных сопротивлений и конденсаторов, полупроводников, сегнетоэлектриков, ферритов и т. п.) также сильно меняются при изменении температуры, независимо от изменения размеров элементов. Резко меняется с температурой объемное и поверхностное сопротивления изоляционных материалов. Большое значение имеет также изменение механических характеристик некоторых материалов при предельных температурах, что часто приводит к разрушению этих материалов (например хрупкость резины при низких температурах), и изменение вязкости смазки механизмов и рабочих жидкостей гидравлических устройств.

Не менее важной причиной появления отказов элементов в работе является влажность. Высокая влажность приводит к коррозии металлов и быстрому распаду многих органических соединений. При этом резко снижается объемное и особенно поверхностное сопротивление изоляционных материалов. Это, а также скопление влаги на поверхности элементов, где эта влага очень быстро превращается в электролит, приводит к появлению коротких замыканий между точками с достаточной разностью потенциалов и к поверхностному разряду, который сопровождается опасностью взрыва, появлением науглероженных проводящих дорожек на поверхности изоляции, в особенности, если эта изоляция содержит фенольные смолы. Повышенная влажность способствует развитию грибковой плесени, которая в свою очередь вызывает разъедание участков поверхности элементов, в особенности оплеточных и некоторых других электроизоляционных материалов.

Следует заметить, что особенно опасно сочетание повышенной температуры и повышенной влажности.

Корродирующие среды (химически активные среды) встречаются достаточно часто при самых разнообразных условиях эксплуатации аппаратуры. К таким средам относится городской воздух с повышенным содержанием сернистых соединений и в особенности атмосфера, содержащая пары соленой воды. В некоторых условиях эксплуатации возможно наличие в воздухе паров кислот или других электролитов. Все эти факторы вызывают появление коррозии на поверхности металлических частей, а иногда и разъедание изоляционных материалов, в особенности пластмасс с феноловыми смолами.

Песок, пыль и другие твердые частицы, оказывающие абразивное действие, опасны для негерметизированных элементов, в особенности, если в этих элементах есть подвижные части или если элементы легко подвергаются механи-



ческим повреждениям. Это относится к переключателям, щеткам и коллекторам электрических машин, зубчатым передачам и подшипникам. Абразивные частицы повреждают, а иногда и снимают изоляционный (предохранительный) слой, например, эмаль, стекло и т. п., что вызывает коррозию внутренних слоев. Наличие пыли из абразивных частиц и вызываемые ими повреждения могут приводить к замыканиям между точками с высокими разностями потенциалов.

Пониженное барометрическое давление также оказывает отрицательное воздействие на надежность элементов, в частности, за счет обезвоживания материалов и удаления из них диффундированных газов, что резко изменяет их свойства (в особенности органических изоляционных материалов). Значительное понижение давления может также приводить к пробое вследствие образования другого разряда, исключенного при нормальном давлении.

Ускорения, вибрации и удары очень сильно влияют на надежность элементов, вызывая их механические повреждения и даже полное разрушение. При этом, чем меньше масса элемента, тем менее воздействует на него ускорение. Воздействия, оказываемые вибрацией, зависят от частоты собственных механических колебаний элемента.

Рассмотрим отказы вследствие износа (постепенные), внезапные отказы, вызываемые теми или иными повреждениями, и отказы вследствие разрегулировки.

Все элементы, как бы ни были они хорошо изготовлены, неизбежно подвержены износу. Износ может быть вызван разными причинами. Может быть износ использования — механическое истирание подвижных частей; изменение физических свойств элементов при прохождении через них электрического тока, а также в электрическом поле или в результате выделения тепла (изменение активного сопротивления, емкости, эмиссионной способности катода, сопротивления изоляции, появление хрупкости за счет постепенного высыхания и т. п.). Существует износ неиспользования, т. е. постепенное изменение параметров даже у неработающих элементов, происходящее вследствие воздействия внешних факторов. Из-за износа элементов в некоторых случаях приходится прибегать к принудительному или профилактическому резервированию, т. е. к замене элементов через определенные промежутки времени.

Отказы разного вида отличаются вероятностными характеристиками (§ 2.6). Разновидностью внезапных отказов являются неустойчивые отказы (то возникающая, то пропадающая неисправность). Для многих элементов изменение параметров во времени носит характер флуктуаций (например, для полупроводниковых элементов). Износ и ста-

рение для них имеют второстепенное значение. Кроме того, возмущения типа температурных и климатических, бросков питающих напряжений, наводок, эффекта «засыпания» полупроводниковых триодов, остаточной намагниченности магнитных материалов могут существенно нарушать монотонный характер изменения параметров во времени. Все эти возмущения вызывают при определенных условиях неустойчивые отказы, особенно характерные для дискретных вычислительных устройств, где они возникают в виде сбоев.

Разрегулировка, т. е. самопроизвольное изменение регулируемых параметров, — вид неисправности, возникающий в процессе эксплуатации в тех элементах, где есть органы регулировки. Это происходит вследствие механических смещений недостаточно зафиксированных органов регулировки или же изменений физических параметров цепи, в которой стоят эти органы.

Для каждой конструкции есть некоторый присущий ей предел повышения надежности. По мере приближения к этому пределу повышение надежности осуществляется с большей трудностью.

Интенсивность отказов любого элемента, блока, узла или системы в общем случае оказывается зависящей от ряда воздействий. Чем более точно известны эти зависимости, тем эффективнее могут быть применены элементы для получения заданной вероятности безотказной работы за время  $t$ . Поэтому для каждого конкретного случая работы необходимо определять интенсивность отказа элемента данного типа в заданном режиме и при данных условиях работы.

Для расчета интенсивности отказов  $\lambda$  какого-либо элемента в заданных условиях необходимо знать интенсивность отказов  $\lambda_0$  того же элемента, работающего в нормальных условиях под номинальной нагрузкой, а также зависимости интенсивности отказов от различных эксплуатационных воздействий. Принимают, что

$$\lambda = \lambda_0 a_1 a_2 a_3 a_4 \dots a_n. \quad (4.1)$$

Здесь  $a_1 - a_n$  — эксплуатационные коэффициенты:  $a_1$  зависит от напряжения накала;  $a_2$  — от электрической нагрузки;  $a_3$  — от температурных воздействий;  $a_4$  — от нагрузки и температурных воздействий и т. п.

Известные зависимости эксплуатационных коэффициентов интенсивности отказов для некоторых наиболее распространенных элементов АУС приведены на рис. 4.1—4.15 [20, 21, 22]. По этим зависимостям могут быть рассчитаны значения  $\lambda$  для указанных элементов. Так, для тиратронов, пентодов и тетродов, вакуумных диодов и триодов

$$\lambda = \lambda_0 a_1 a_4.$$

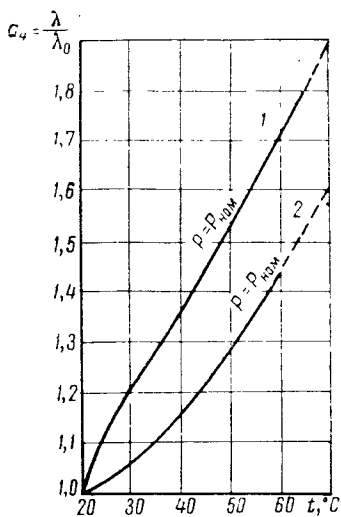


Рис. 4.1. Зависимости эксплуатационных коэффициентов магнетронов 2 и разрядников 1 от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке

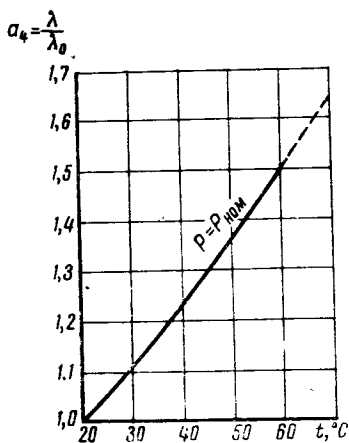


Рис. 4.2. Зависимость эксплуатационного коэффициента клистронов от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке

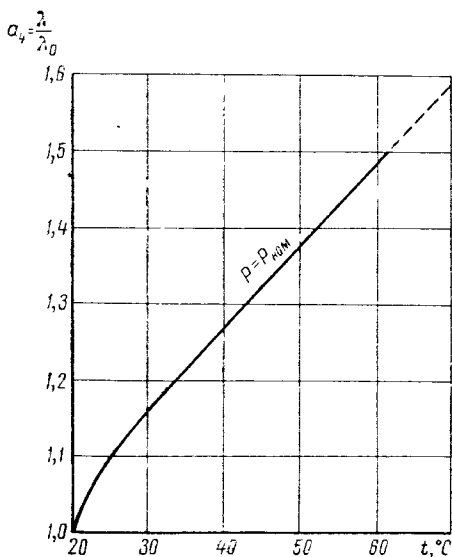


Рис. 4.3. Зависимость эксплуатационного коэффициента электронно-лучевых трубок от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке

Для полупроводниковых диодов, пленочных сопротивлений типа МЛТ, объемных сопротивлений типа ТВО, проволочных сопротивлений, конденсаторов с керамической изоляцией типа КТК и КДК, с посеребренной слюдяной изоляцией типа КСО, слюдяной изоляцией и прокладками из фольги (КСО), бумажных конденсаторов типа КБГ, накаливающих и анодных трансформаторов

$$\lambda = \lambda_0 a_4.$$

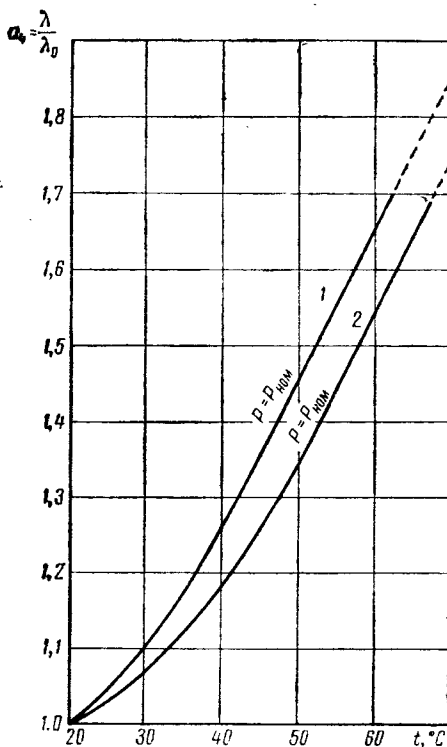


Рис. 4.4. Зависимости эксплуатационных коэффициентов тиратронов 2 и экранированных электронных ламп 1 (пентоды или тетроды) от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке

Значения  $\lambda_0$  для некоторых элементов приведены в следующих параграфах.

Для определения величин  $\lambda$  можно пользоваться приведенными зависимостями коэффициентов от различных воз-

действий, полученными для элементов неотечественного производства, так как технология производства этих элементов везде сходна. Ошибка от этого приближения, очевидно,

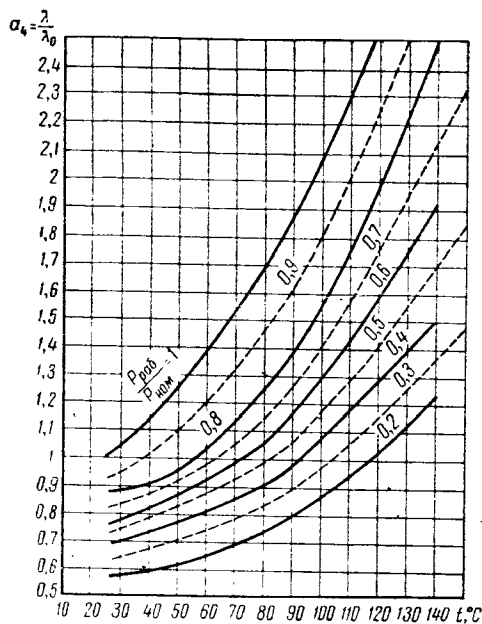


Рис. 4.5. Зависимости эксплуатационных коэффициентов вакуумных диодов и триодов от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

не должна превышать ошибки от неучета эксплуатационных воздействий на интенсивность отказов элементов.

В следующих параграфах приведены сведения о надежности некоторых элементов АУС. Численные данные, относящиеся к этим элементам, характеризуют изделия отечественной промышленности. Количественные характеристики надежности других элементов известны из литературы<sup>1</sup>.

## § 4.2. НАДЕЖНОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Спротивления являются одним из наиболее распространенных элементов АУС. Надежность сопротивлений по сравнению с надежностью других элементов относительно высока,

<sup>1</sup> См., например, [9], [100] и приложение.

но вследствие большого их числа (табл. 4.1) количество отказов аппаратуры, вызываемых отказом сопротивлений, все же велико.

В АУС применяются постоянные и переменные сопротивления трех основных типов: композиционные, пленочные и проволочные<sup>1</sup>.

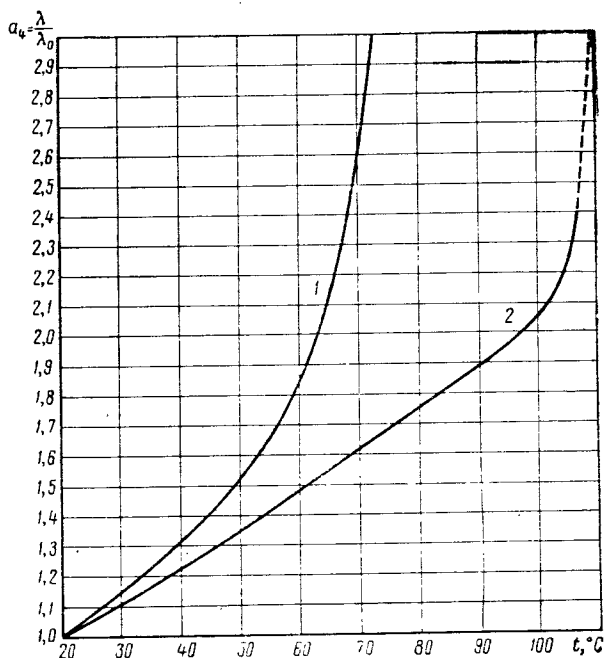


Рис. 4.6. Зависимость эксплуатационного коэффициента полупроводниковых диодов от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке:

1 — для германиевых полупроводниковых диодов  
2 — для кремниевых полупроводниковых диодов

Правильный выбор типа сопротивлений сам по себе уже способствует повышению надежности. Одним из факторов повышения надежности является унификация применяемых элементов. Иногда, чтобы избежать увеличения числа типов применяемых сопротивлений, выгоднее изменить схемы.

<sup>1</sup> Композиционные сопротивления прессуются из смеси материала, обладающего высоким удельным сопротивлением, и связующего вещества. Пленочные сопротивления получают путем нанесения пленки с высоким удельным сопротивлением на поверхность электроизоляционного материала.

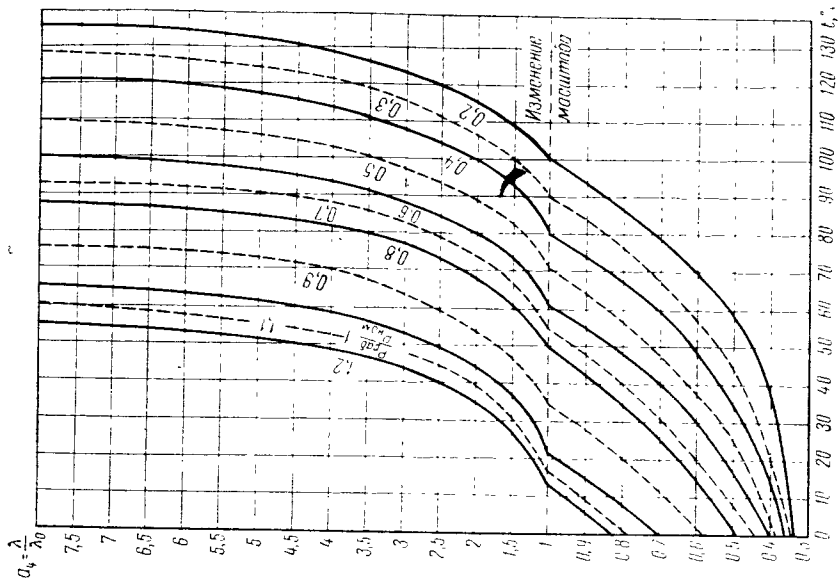


Рис. 4.8. Зависимость эксплуатационного коэффициента плеченых сопротивлений (типа МЛТ) от температуры окружающей среды и коэффициентов нагрузки

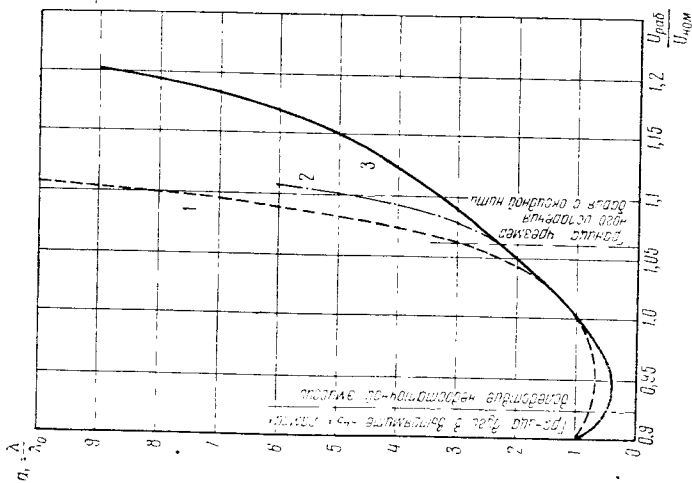


Рис. 4.7. Зависимости эксплуатационных коэффициентов электровакuumных приборов, имеющих различный тип катода, от напряжения накала при номинальной нагрузке остальных электродов:

1 — для торированного катода; 2 — для окисленного катода; 3 — для бариевого покрытия

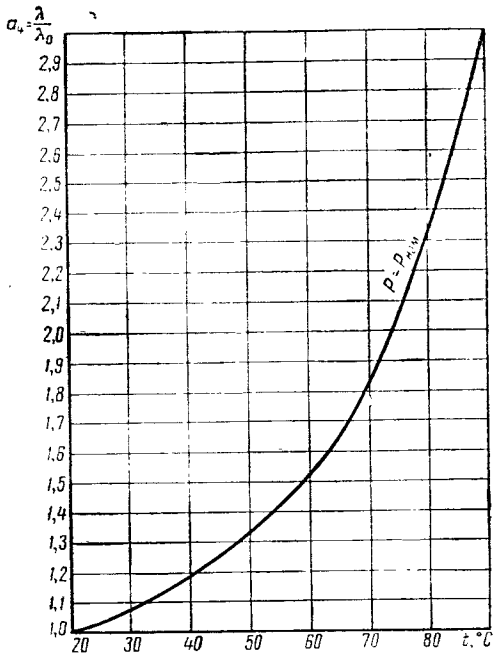


Рис. 4.9. Зависимость эксплуатационного коэффициента пленочных сопротивлений от температуры окружающей среды при номинальной нагрузке

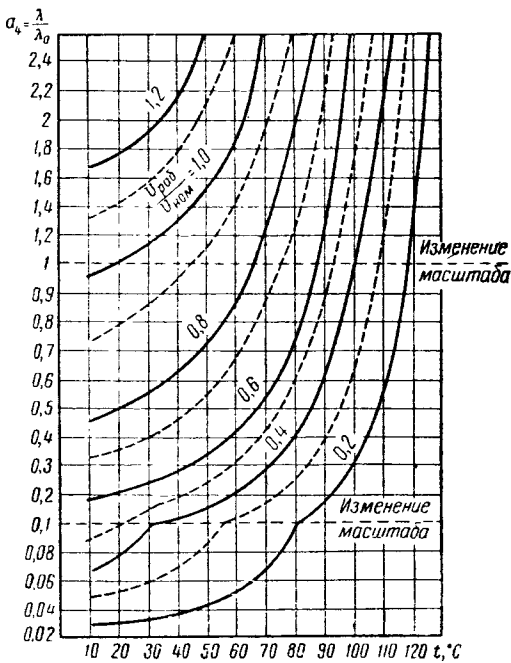


Рис. 4.10. Зависимость эксплуатационного коэффициента конденсаторов с керамической изоляцией (типа КТК и КДК) от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки



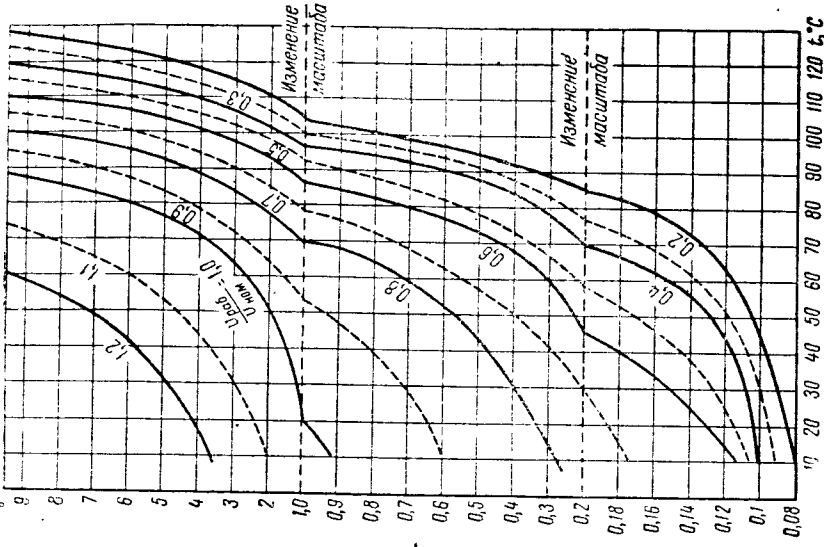
$\alpha_0 \cdot \lambda$ 

Рис. 4.12. Зависимость эксплуатационного коэффициента конденсаторов со слюдяной изоляцией и прокладками из фольги (типа КСО и ОКСО) от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

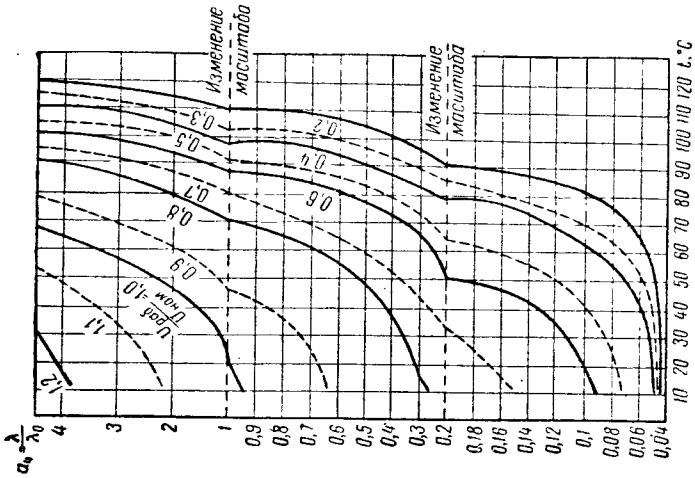


Рис. 4.11. Зависимость эксплуатационного коэффициента конденсаторов с посеребрянной слюдяной изоляцией (типа КСО-Г) от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

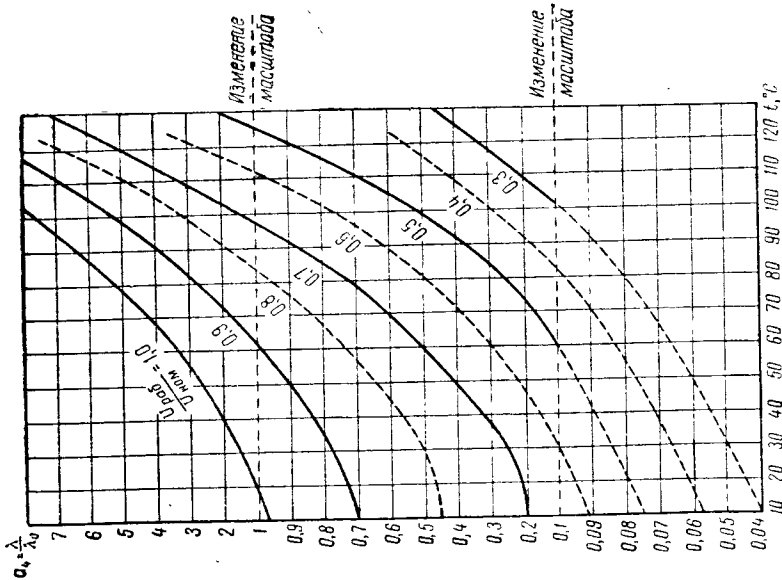


Рис. 4.13. Зависимость эксплуатационного коэффициента конденсаторов с бумажной изоляцией среды (типа КБГ) от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

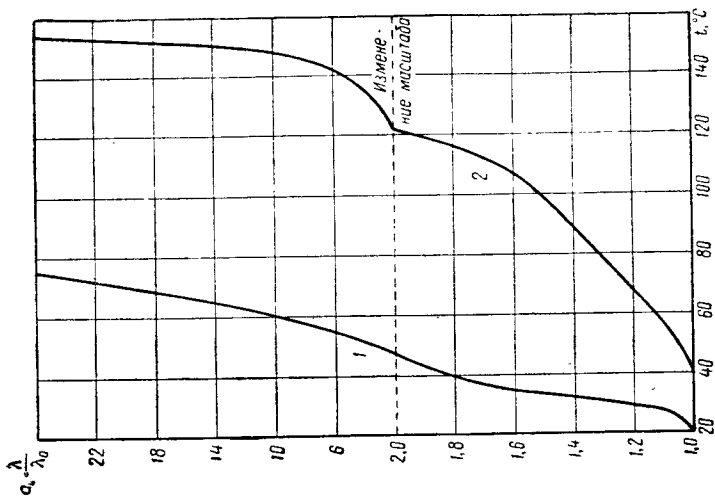


Рис. 4.14. Зависимость эксплуатационного коэффициента от температуры окружающей среды для анодов I и II индукционных 2 трансформаторов при номинальной нагрузке

Сопротивления, надежные для импульсного устройства, в котором допустимо изменение сопротивления на несколько процентов за несколько тысяч часов работы, будут ненадежными для схемы усилителя постоянного тока или функционального преобразователя, где величина сопротивления за это же время не должна меняться более, чем на доли процента.

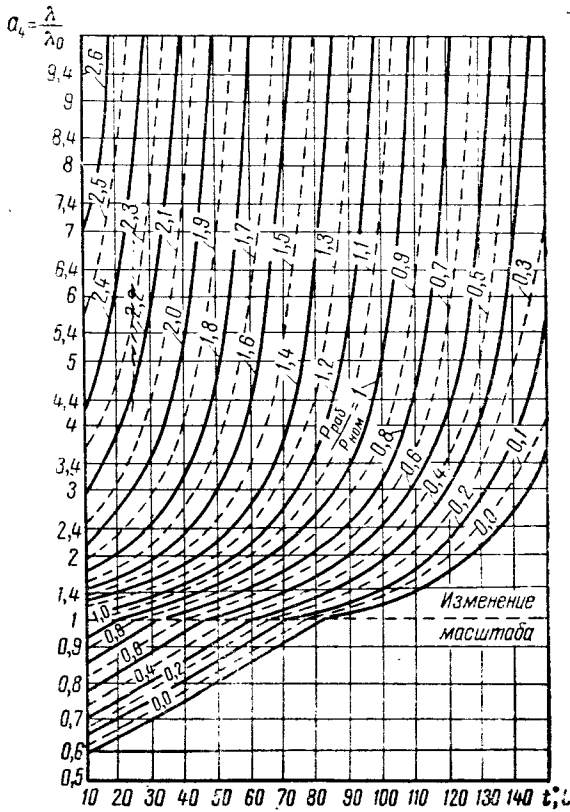


Рис. 4.15. Зависимость эксплуатационного коэффициента объемных сопротивлений (типа ТВО) от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

Каждый тип сопротивления изготавливается с определенной точностью и в связи с этим делится на несколько классов. Наиболее распространенное деление:

- I класс — допуск  $\pm 5\%$ ,
- II класс — допуск  $\pm 10\%$ ,
- III класс — допуск  $\pm 20\%$ .

Некоторые композиционные сопротивления, относящиеся к классу I в начале эксплуатации, через несколько лет могут перейти вследствие старения в класс III. Значительно более стабильны пленочные и проволочные сопротивления. Наиболее стабильны процезионные проволочные сопротивления, но они обладают заметной индуктивностью. Их надежность зависит также от диаметра проволоки.

Надежность непроволочных постоянных сопротивлений, чаще всего применяемых в АУС, зависит от физико-химических процессов, происходящих внутри проводящего слоя и на его поверхности. В связи с этим обеспечение надежности сопротивления во многом определяется выбором материалов, конструкцией и технологией его изготовления. Эксплуатационная надежность сопротивлений решающим образом зависит от правильности выбора режима их работы и от внешних условий. Скорость и характер физико-химических процессов зависят в первую очередь от температуры сопротивления и окружающей среды. Температура же зависит от мощности и от условий охлаждения сопротивления. Поэтому после выбора величины сопротивления важно установить номинальную рассеиваемую мощность. Эта величина устанавливается в соответствии с температурой, допустимой для сопротивления в наиболее нагретом месте.

Мощность, развиваемая в сопротивлении, должна быть всегда ниже номинальной рассеиваемой мощности. Номинальная же мощность выбирается исходя из допустимого превышения температуры сопротивления над температурой окружающей среды. Проще всего это делать с помощью зависимости снижения номинальной мощности от температуры окружающей среды. Для некоторых видов сопротивлений эти зависимости известны [23] и приведены на рис. 4.16 и 4.17.

Если сопротивление применяется в устройствах импульсного типа, то иногда можно допускать значения мощности, развиваемой в течение длительности одного импульса, превышающие номинальное. Однако и в этом случае средняя мощность, подводимая к сопротивлению, должна находиться в пределах его номинальной мощности рассеивания.

При определении мощности сопротивления необходимо учитывать также поглощение им тепла, излучаемого окружающими его элементами. Кроме того, необходимо иметь в виду влияние тепла, выделяемого сопротивлениями, на другие элементы схемы устройств.

Обычно теплоотдача от сопротивлений мощностью ниже 2 Вт происходит за счет излучения ( $\approx 10\%$ ), конвекцией ( $\approx 40\%$ ) и через теплопроводность выводов ( $\approx 50\%$ ). Сопротивления большей мощности имеют увеличенную площадь поверхно-

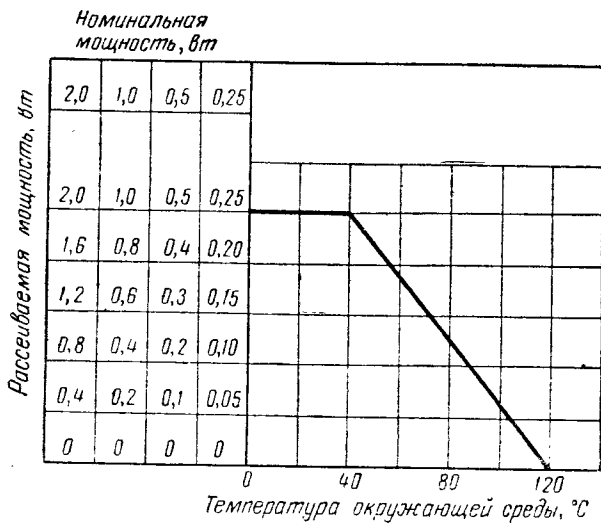


Рис. 4.16. Зависимость номинальной мощности плечных сопротивлений от температуры

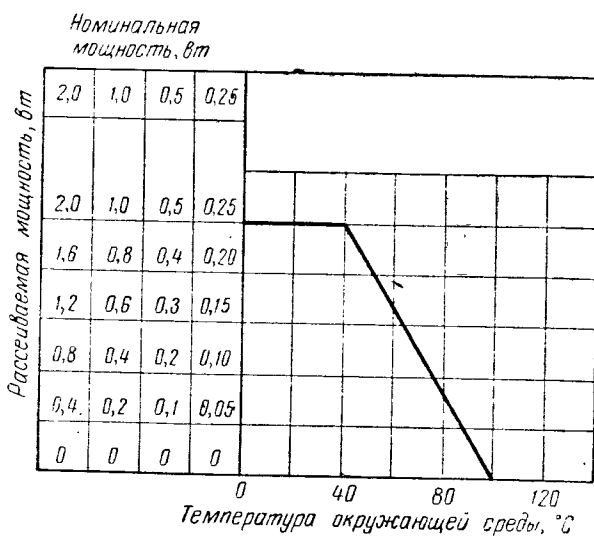


Рис. 4.17. Зависимость номинальной мощности композиционных сопротивлений от температуры

сти охлаждения; для них теплоотдача излучением составляет около 50%, конвекцией — 25% и через теплопроводность —  $\approx 25\%$ . В соответствии с этим выбираются расстояния между двумя сопротивлениями, применяются теплопоглотители в виде металлических поверхностей, естественная и принудительная вентиляция и пр. Зависимости интенсивности отказов от температуры окружающей среды и коэффициентов нагрузки, равных в данном случае отношению мощности, рассеиваемой в сопротивлении, к номинальной мощности, для некоторых типов сопротивлений приведены в [9].

Интенсивность отказов для разных типов сопротивлений, изготовленных в разное время и в разных странах, имеет самые разнообразные значения [9]. В табл. 4.3 приведены значения  $\lambda$  для некоторых сопротивлений отечественного производства.

Таблица 4.3

**Интенсивность отказов сопротивлений**

Наименование сопротивления	$\lambda$ , % на 1000 час
ВС	0,35
СП	0,69
Проволочные	1,25

**§ 4.3. НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ**

Конденсаторы являются одним из самых распространенных элементов в АУС (табл. 4.1). Поэтому, хотя их надежность относительно высока, количество отказов АУС из-за отказов конденсаторов достаточно велико.

Интенсивность отказов различных типов конденсаторов, изготовленных в разное время и в различных странах, колеблется в широких пределах. Данные, приведенные в табл. 4.4,

Таблица 4.4

**Интенсивность отказов конденсаторов [9]**

Тип конденсатора	$\lambda$ , % на 1000 час
КСО	0,14
КБГ	0,12 ÷ 0,16
КБМ	0,27 ÷ 0,35
МБГ	0,07
КТК и КДК	0,23
КЭГ	0,39
Конденсатор временной емкости с воздушным диэлектриком	1,86

относятся к отечественным конденсаторам, изготовленным до 1954 г.

Для особых целей разрабатываются конденсаторы повышенной надежности [24], например стеклянные.

Срок службы конденсаторов, а следовательно, и их надежность, зависит от температуры окружающей среды и напряжения. Повышенная температура портит изоляцию конденсаторов.

Зависимость интенсивности отказов конденсаторов от напряжения определяется [9] коэффициентом нагрузки, равным отношению рабочего напряжения, приложенного к конденсатору, к номинальному. Срок службы конденсаторов с понижением коэффициента загрузки резко возрастает.

Для повышения эксплуатационной надежности конденсаторов рекомендуется применять их в облегченном режиме при коэффициенте нагрузки  $k_n \approx 0,5$ , причем пиковые напряжения на конденсаторе ни в коем случае не должны превышать номинального.

Надежность конденсаторов можно значительно повысить за счет ряда специальных мер. Бумажные конденсаторы желательно изготавливать в герметичном металлическом кожухе и с трехслойной бумажной изоляцией, пропитанной либо минеральным маслом, либо углеводородной пропиткой (кроме воска); особенно рекомендуется для этой цели конденсаторный вазелин.

У конденсаторов наблюдается заметный износ, в частности износ неиспользования (§ 4.1). Емкость большинства конденсаторов при хранении в течение нескольких лет изменяется: у однослойных конденсаторов в пределах от  $-5,3$  до  $+3,7\%$ , а у многослойных — от  $-4,82$  до  $+2,97\%$  за 5 лет. Уменьшение емкости при хранении может быть следствием частичной распрессовки секций и увеличения расстояния между обкладками. Обычно многослойные конденсаторы оказываются более надежными, чем однослойные. Это можно объяснить тем, что в однослойных конденсаторах имеются более благоприятные условия для образования проводящих мостиков вследствие неравномерной толщины диэлектрика, наличия проводящих включений в бумаге и частичного проникновения металла при металлизации в поры бумаги.

#### § 4.4. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОНТАКТОРОВ И РЕЛЕ

Значительная часть существующих типов электрических машин обладает низкой эксплуатационной надежностью [25]. Большой процент отказов приходится на электрические машины малой мощности. Так, повреждения электрических

машин мощностью до 10 *квт* составляют около 60% всех повреждений, а повреждения машин мощностью свыше 250 *квт* — только 2%. Подавляющее большинство повреждений машин относится к обмоткам статоров и якорей (табл. 4.5).

Таблица 4.5

**Относительное количество отказов электрических машин  
в процентах**

Отказы	Бесколлекторные машины	Коллекторные машины
Обмотка статора . . . . .	91,0	16,3
Обмотка ротора . . . . .	6,7	64,0
Коллектор . . . . .	—	9,1
Подшипники . . . . .	1,3	1,2
Механические . . . . .	1,0	9,4

Из данных табл. 4.5 следует, что отказов больше в тех системах, где больше асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и где меньше их мощность [25].

Большое значение в АУС имеют электромагнитные контакторы и автоматические выключатели. Нормальная работа исполнительных механизмов АУС, и в том числе автоматизированного электропривода, при частых пусках и остановках невозможна, если надежность контакторов низка.

Причины отказа большинства типов контакторов состоят в том, что перегорают катушки (в особенности у контакторов переменного тока) и отваливаются контакты вследствие некачественного крепления. Менее распространены следующие причины отказов: прогар нетеплостойкой изоляции типа фенолопласта с органическим наполнителем, износ (перетира-ние) гибких и скользящих соединений, старение пружин. Возможны и другие причины отказов. Очень часто причиной неустойчивых отказов контакторов являются: обгорание контактов, в особенности блокировочных. Это вызывает нечеткое срабатывание (дребезжание) и часто самопроизвольное выключение после 1—5 *сек* работы.

По изложенным причинам надежность контакторов невелика. Интенсивность их отказов по американским данным около  $1,9 \cdot 10^{-6}$  % в час.

Реле является одним из основных источников неисправностей АУС, хотя их относительное количество невелико (табл. 4.1). Причины отказов реле в большинстве случаев следующие: сваривание контактов, окисление их, образование изолирующих пленок, механические повреждения пружин, поломки подвижных частей, повреждение катушек и т. п.

Для повышения надежности реле рекомендуется приме-



нять парные контакты. В случае запыления или обгорания одного из контактов второй обеспечивает надежное срабатывание. Целесообразно применять пылезащитные экраны (кожухи). Междуконтактные промежутки следует шунтировать искрогасящими цепями.

Интенсивность отказов реле определяется в зависимости от их конструкции, числа срабатываний в единицу времени, предельного числа срабатываний, плотности тока контакта и числа контактов [9, 26].

В [27] даются методы оценки надежности электромагнитных механизмов и их расчета на заданную надежность.

### § 4.5. НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

Основной причиной отказов трансформаторов, дросселей, катушек индуктивностей, соленоидов, электромагнитов и т. д. является разрушение изоляции, происходящее от влияния внешних факторов, — в первую очередь температуры и влажности.

Предохранение от влажности осуществляется с помощью пропиточных лаков и герметизацией. Снижение перегрева за счет внутреннего выделения тепла достигается совершенствованием конструкции (трансформаторы с разрезными сердечниками и с неполным заполнением окна) и уменьшением потерь посредством повышения качества магнитных материалов. Повышение стойкости при перегреве достигается применением новых сортов синтетической терлостойкой изоляции (например кремний — органическая изоляция).

Зависимость интенсивности отказов от температуры при изоляции различных классов показана на рис. 4.18 [22].

Значения  $\lambda$  для отечественных трансформаторов и катушек при работе в нормальных температурных условиях приведены в табл. 4.6 [9].

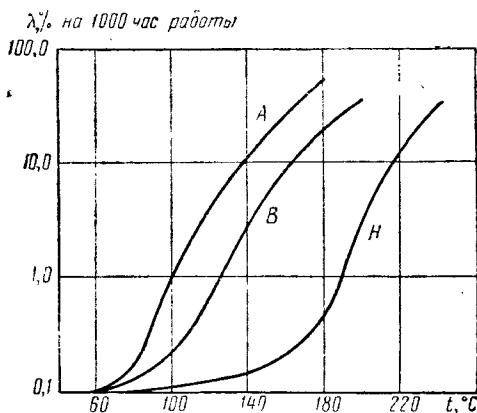


Рис. 4.18. Зависимости интенсивностей отказов трансформаторов и катушек от температуры окружающей среды при изоляции классов А, В, Н

Таблица 4.6  
Интенсивность отказов при нормальной температуре

Наименование элемента	λ, в ‰ на 1000 час
Трансформаторы . . . . .	0,4 ÷ 0,6
Катушки индуктивности . . . . .	0,1 ÷ 0,15

#### § 4.6. НАДЕЖНОСТЬ ПОДШИПНИКОВ

Эксплуатационная надежность машин и приборов, входящих в АУС, в которых происходят вращательные движения, существенно зависит от статической и динамической грузоподъемности и долговечности подшипников качения. Качество, в том числе и точность, подшипников качения оказывает существенное влияние на работу механизмов. Различные типы машин и приборов АУС предъявляют чрезвычайно разнообразные требования к подшипникам качения. Соблюдение этих требований является показателем надежности, которая в основном характеризуется долговечностью. Долговечность подшипников качения зависит от многочисленных факторов, составляющих три группы:

первая группа — конструктивные факторы: род материала, тип конструкции, соотношения между размерами деталей и внутренних зазоров подшипников;

вторая группа — технологические факторы: рациональное использование прочностных свойств металлов и других материалов, применяемых при изготовлении подшипников; точность изготовления тел качения; оптимальный выбор режимов механической и термической обработки материалов, а также методов получения заготовок. Большое значение имеют оптимальные режимы и способы окончательной обработки рабочих поверхностей подшипников;

третья группа — это факторы, связанные с применением подшипников. Очень важно правильно выбрать подшипники в соответствии с характером, в том числе направлением нагрузки, скоростью вращения и рабочей температурой. Не менее важно при конструировании и изготовлении машин и приборов обеспечить надлежащие посадки и соосности посадочных мест, смазку и уплотнение, в особенности при работе в тяжелых внешних условиях — повышенные или пониженные температуры, резкие перемены температур, наличие в окружающей среде повышенного содержания влаги, химически активных веществ или частиц с абразивным действием. Очень важно правильно монтировать подшипники, применяя специальные приспособления.

Подшипники качения принадлежат к группе элементов, у которых при правильном хранении аппаратуры очень мал износ неиспользования. Интенсивность внезапных отказов у подшипников качения очень невелика по сравнению с другими элементами. По данным статистики подшипники скольжения значительно более надежны, чем подшипники качения. Поэтому сейчас чаще используют подшипники скольжения во многих конструкциях приборов и машин, причем применяют втулки из специальных синтетических антифрикционных материалов, как, например, капрон и т. п.

Как и для всякого элемента для повышения эксплуатационной надежности подшипников качения следует применять в облегченные режимы работы, в первую очередь по нагрузкам. В настоящее время еще нет данных, позволяющих определить снижение нагрузки против номинальной для разных типов подшипников качения, однако по предварительным статистическим данным можно рекомендовать снижение нагрузки для подшипников качения (по условиям) до  $0,6 \div 0,9$  номинальной.

#### § 4.7. НАДЕЖНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДОВ

Обеспечение надежности полупроводниковых триодов достигается прежде всего применением автоматических линий для их изготовления, что существенно сужает разброс интенсивности отказов. Кроме того, имеет важное значение жесткий производственный контроль при их производстве. Сюда относится испытание на рассеяние мощности.

Полупроводниковые триоды очень часто оказывались причиной отказов АУС, хотя до установки в системы все они были исправными. До недавнего времени считалось, что единственной причиной отказа полупроводниковых триодов в процессе сборки и монтажа может быть только перегрев их во время пайки. Применение специальных теплоотводов несколько уменьшило появление неисправных триодов в смонтированных блоках, но не устранило полностью. В результате тщательных исследований [28] было выяснено, что, по-видимому, основной причиной выхода из строя полупроводниковых триодов в процессе монтажа (помимо уже упомянутого перегрева во время пайки) является пробой под действием электростатического заряда. Источником возникновения статического заряда при монтаже может быть много, но опасность отказа возникает только тогда, когда есть сколь-нибудь существенная емкость, способная накапливать этот статический заряд. Такой емкостью на линии сборки и монтажа оказалась емкость тела монтажника (рис. 4.19). Увеличению статического заряда тела монтажника способствуют лакированные деревянные сиденья, монтажные столы, покры-

тые хорошим диэлектриком и т. п. При натирании этих поверхностей таким непроводящим материалом, как одежда (в особенности из шерсти, искусственного шелка, нейлона, дакрона и т. п.), возникает статическое электричество. Пол в помещениях, где происходит монтаж, обычно также бывает покрыт диэлектрическими материалами (асфальт, линолеум, сухое дерево) и не обеспечивает достаточно хорошего

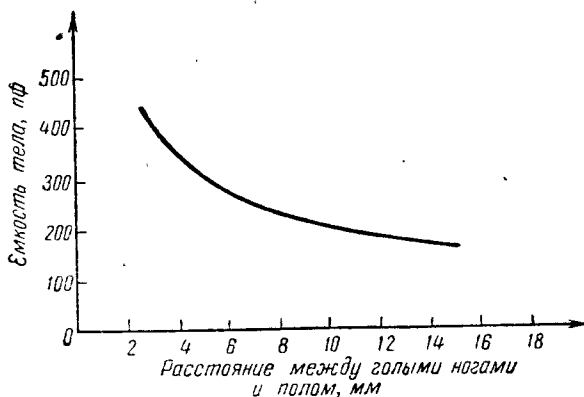


Рис. 4.19. Емкость человеческого тела относительно пола

заземления. Ходьба по такому полу может создавать электростатическое напряжение. Все эти явления не поддаются расчету, так как зависят от многих переменных величин, для которых нет точных значений. Как показывает опыт, в сухую погоду или в помещениях с низкой влажностью статические заряды на телах людей могут создавать потенциалы в несколько тысяч вольт.

Одной из операций, приводящих к наибольшей опасности пробоя, является следующая: монтажник, сидящий на лакированном стуле, берет триод, устанавливает его в схеме и поворачивается, чтобы поставить блок на место. В результате этого движения емкость его тела, приблизительно, равная 200 пф, зарядится до напряжения порядка 2000 в, что составляет энергию около 400 мкдж. При установке блока эта энергия и приводит во многих случаях к пробоям.

Можно рекомендовать ряд мер по предупреждению этого нежелательного явления:

- 1) периодическое измерение статических зарядов тела монтажников и различного оборудования;
- 2) установка в особо ответственных местах индикации (сигнализации) наличия статического заряда;

3) применение проводящих покрытий столов, стульев и пола (с сопротивлением не более 100 *Мом*);

4) применение мягкой спецодежды из хлопчатобумажных тканей, не накапливающих статические заряды;

5) применение обуви с проводящими подошвами или специальными заземляющими приспособлениями, обеспечивающими электрическую связь человека с полом (сопротивление не более 100 *Мом*);

6) обязательное электрическое соединение (хотя бы через сравнительно высокие сопротивления) всех предметов, находящихся на площади, где производится монтаж.

Следует отметить недопустимость пренебрежения перечисленными мерами, так как даже небольшие статические заряды, не способные вызвать пробой, могут приводить к большому проценту брака из-за снижения коэффициента усиления или сильных искажений линейности характеристик.

Как показывает опыт, на надежность мощных германиевых триодов оказывает влияние уровень влажности в корпусе прибора. Влажность более 40% значительно ухудшает характеристики триодов. В связи с этим в последнее время начинают применять специальные меры для уменьшения влажности воздуха внутри таких приборов. Гидраты специальных геттеров позволяют увеличить усиление по мощности ориентировочно с 3 до 4 *дб* и значительно снизить уровень насыщения для обратных токов при низких напряжениях. Значительно снижается при этом и интенсивность отказов  $\lambda$ .

Различные геттеры дают различный эффект. Так, поглощающие геттеры типа молекулярных сит, стекла и фильтров из бумажной фибры позволяют снизить парциальное давление водяного пара только до  $10^{-7}$  *ат*, что эквивалентно наличию в корпусе прибора, имеющего  $10^{12}$  молекул воды на 2 *см*<sup>3</sup>. Применение окиси бария снижает парциальное давление водяного пара до  $10^{-18}$  *ат* (80 молекул воды на 2 *см*<sup>3</sup>), но вместе с тем снижает усиление по мощности на 3 *дб* и повышает уровень насыщения обратного тока. Наиболее перспективной является, по-видимому, система  $\text{BaO} + \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ , которая дает увеличение усиления по мощности на 8 + 10 *дб* больше, чем в случае применения геттера, обеспечивающего предельно низкую влажность [28].

---

---

## ТЕОРИЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

## § 5.1. СИСТЕМЫ, БОЛЕЕ НАДЕЖНЫЕ, ЧЕМ ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

Хотя техника развивается в направлении получения все более надежных элементов АУС, нет элементов абсолютно надежных, т. е. таких, вероятность безотказной работы которых  $P(t)$  тождественно равна единице. В действительности, если даже исключены факторы, вызывающие внезапные повреждения, имеет место старение вследствие возрастания физической энтропии, обусловленного вторым законом термодинамики. Поэтому  $P(t)$  любого реального элемента — убывающая функция времени (рис. 2.1) и усилия, направленные к повышению надежности такого элемента или к замене его более надежным элементом другого типа, приводят лишь

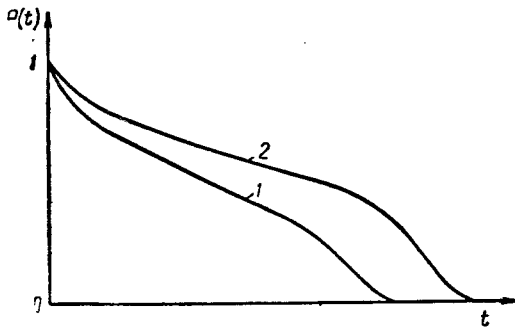


Рис. 5.1. Зависимости вероятности безотказной работы от времени для элементов различной надежности

к замедлению убывания вероятности  $P(t)$ , например, к изменению вероятности безотказной работы (рис. 5.1) по кривой 2 вместо кривой 1.

Таким образом, элементы всякой реальной АУС являются принципиально ненадежными элементами. Понятно, что не может быть абсолютно надежной и состоящая из них система. Важно, однако, чтобы вероятность безотказной ра-

боты системы была достаточно высокой. Каковы требования, которые здесь могут предъявляться, показывает следующий простой пример [29]. В электронной цифровой машине, работающей по двоичной системе, отказ какого-либо элемента может привести к ошибочному элементарному акту, вследствие которого нуль и единица поменяются местами.

Эта ошибка даст неверный результат и может привести к совершенно недопустимым последствиям, если, например, от такого результата зависит работа АУС. Чтобы исключить подобные последствия, нужно сделать вероятность ошибки достаточно малой. Так, если для получения требуемого результата рассматриваемая машина делает  $10^{16}$  элементарных актов, то вероятность ошибки должна быть меньше  $10^{-10}$ , чтобы можно было рассчитывать, что на протяжении этих элементарных актов не произойдет ни одной ошибки. И если достаточно малая вероятность ошибки на выходе машины может быть получена, несмотря на ненадежность ее элементов, то такая машина будет достаточно надежной системой, состоящей из малонадежных элементов.

Возможность создания высоконадежных систем из малонадежных элементов доказывает, как уже было отмечено в § 1.2, существование органических систем. В ОУС это достигается, по-видимому, взаимосвязанностью многочисленных элементов, резервированием и контролем, а также с помощью самонастройки и самоорганизации [101]. Сложность связей клеток центральной нервной системы общеизвестна. Резервирование наблюдается, в частности, в передаче функций одного полушария головного мозга другому. Общеизвестны контрольные мыслительные операции, посредством которых проверяются и исправляются принятые решения.

Те же способы повышают надежность технических систем. Контроль может быть осуществлен, например, параллельной работой двух или трех вычислительных машин с автоматической сверкой даваемых ими результатов. Вообще, по способу, который предложил фон Нейман [30], сигнал, поступающий на вход какого-либо устройства, может быть направлен не в один, а в целый ряд одинаковых блоков; при этом правильным будет считаться результат, получаемый на выходе большинства этих блоков (принцип выбора по большинству).

Резервировать возможно конструктивные части систем и пути передачи сигналов. Блочное резервирование осуществляется посредством автоматической или (в менее совершенных системах) неавтоматической замены отдельных элементов их групп, блоков или целых систем, выходящих из строя. Если резервные элементы, блоки или системы начинают действовать лишь после отказа резервируемых, то имеет место резервирование замещением. Упомянутый выше случай параллельной работы нескольких машин, каждая из которых дублирует любую другую, будучи в состоянии действовать и одна (лишь с меньшей надежностью), можно также рассматривать как особый вид резервирования, который называют постоянным. В этом случае резерв обеспечивает

работу системы при повреждении параллельно включенных частей.

От блочного резервирования отличается схемное резервирование. Схемное резервирование состоит в замене отдельного элемента совокупностью нескольких таких же элементов, соединенных резервно и функционирующих в системе так же, как заменяемый элемент. Такая совокупность элементов должна выполнять свое назначение при отказе по крайней мере одного из элементов, входящих в ее состав. Этот метод применим не всегда. Совокупность реле, например, может действовать как одно реле и продолжать исправно функционировать при отказе некоторых реле, входящих в ее состав. Но конденсаторная батарея, могущая заменять отдельный конденсатор, может оказаться непригодной в случае пробоя одного из ее конденсаторов, если емкость схемы при этом выйдет из пределов допуска. Для непрерывных устройств эти пределы всегда уже, чем для дискретных. К схемному резервированию относится, в частности, резервирование пути передачи сигнала: вместо одного пути через заменяемый элемент сигнал может быть при этом передан различными путями через заменяющие элементы. Некоторые из относящихся к такому резервированию схем были рассмотрены в § 2.2. Постоянное резервирование является, очевидно, частным случаем резервирования путей передачи сигналов. Таким образом, постоянный резерв осуществляет как резервирование путей передачи сигналов, так и блочное резервирование. Схемное резервирование приводит, очевидно, к созданию избыточных систем (§ 1.4). Вместе с тем при этом увеличивается количество связей между различными частями системы.

## § 5.2. ЗАВИСИМОСТЬ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ОТ СПОСОБА СОЕДИНЕНИЯ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Комбинированную систему, состоящую из основных и резервных соединений, удобно представлять матрицей независимых элементов,  $\|a_{ij}\|$ , т. е. таких элементов, надежность каждого из которых не зависит от надежности любого другого (§ 2.2). Индексы обозначения элемента матрицы указывают на то, что данный элемент находится на пересечении  $i$  строки и  $j$  столбца матрицы:

$$\|a_{ij}\| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & \dots & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}$$



Примем, что элементы каждой строки образуют основное соединение, а элементы каждого столбца — резервное.

Рассмотрим надежность основного соединения, состоящего из ряда элементов  $a_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), например последовательное соединение (см. рис. 5.2), и резервного соединения.

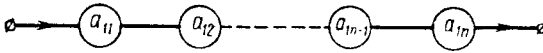


Рис. 5.2. Соединение, представляющее строку матрицы независимых элементов

состоящего из столбца элементов  $a_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), например параллельное соединение (см. рис. 5.3). По формуле (2.21) вероятность безотказной работы первого из них

$$P_{1n} = \prod_{i=1}^n P_{1j}. \quad (5.1)$$

Для соединения, показанного на рис. 5.3, по (2.22) вероятность отказа

$$Q_{m,1} = \prod_{i=1}^m Q_{i1}. \quad (5.2)$$

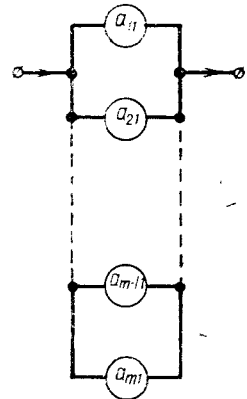


Рис. 5.3. Соединение, представляющее столбец матрицы независимых элементов

Надежность основного соединения не может быть выше надежности наименее надежного элемента. Так, например, при наличии в основном соединении  $10^4$  радиоламп и полупроводниковых элементов (число не слишком большое для встречающихся на практике систем), считая для простоты вероятность безотказной работы каждого из упомянутых элементов одинаковой и равной  $P_c$ , найдем, что вероятность безотказной работы системы, обусловленная только этими элементами, будет равна

$$P_c = P_c^{10^4}.$$

Для того чтобы представить порядок значения вероятности  $P_c$ , которую следовало бы потребовать от каждого элемента, чтобы получить  $P_c = 0,9$  (из десяти систем в среднем одна неисправная), выразим вероятность  $P_c$  через веро-

ятность отказа элемента  $Q_3$ , по (2.33). Для этого необходимо, чтобы

$$(1 - Q_3)^{10^4} = 0,9.$$

Разлагая в ряд выражение в скобках и пренебрегая, ввиду заведомой малости  $Q_3$ , всеми членами разложения, за исключением первых двух, найдем

$$1 - 10^4 Q_3 = 0,9 \text{ или } Q_3 = 10^{-5}.$$

Это значит, что от ламп и полупроводниковых элементов, входящих в систему, требуется такая надежность, чтобы на  $10^5$  в среднем приходилось не более одного неисправного элемента. Обеспечить такую надежность элементов, выпускаемых большими сериями, практически почти невозможно, особенно принимая во внимание известный риск их повреждения при установке в аппаратуру.

Даже если предположить существование высоконадежных элементов, попытки обеспечить высокую надежность сложных систем только за счет применения таких элементов реально не могут привести к успеху. Например, если считать, что все  $3 \cdot 10^5$  элементов системы управления американского баллистического снаряда [31] находятся в основном соединении, равнонадежны, независимы и имеют весьма малое значение вероятности  $Q_3 = 0,00001$ , то для самой системы вероятность отказа

$$Q_c = 1 - (1 - Q_3)^{3 \cdot 10^5} \approx 0,95,$$

т. е. система практически окажется ненадежной. Заметим, что вероятность выхода из строя сложной системы при учете взаимосвязи ее элементов будет еще больше.

Очевидно, что для обеспечения надежной работы сложных АУС необходимы иные меры, а не просто применение надежных элементов. Наиболее эффективным путем обеспечения приемлемой надежности современных сложных систем, элементы которых находятся в основном соединении, является периодическая проверка их нормального функционирования. При проверке, естественно, обнаруживаются и устраняются неисправные или ненормально функционирующие элементы.

При резервном соединении увеличение числа элементов увеличивает надежность системы. Если надежность такой системы задана, то увеличение числа элементов снижает требования к надежности отдельного элемента. Надежность резервного соединения больше надежности наиболее надежного элемента. Действительно, если вероятность отказа од-

ного элемента равна  $Q_9$ , то вероятность отказа этого элемента и его дублера по (5.2)

$$Q_{21} = Q_9^2.$$

Рассмотрим основное соединение двух работающих элементов  $a_{11}$ ,  $a_{21}$  и один элемент  $a_{31}$ , резервирующий каждый из них. В этой системе элемент  $a_{31}$  должен включаться при отказе либо элемента  $a_{11}$ , либо  $a_{21}$ . Вероятность  $Q_0$  события, состоящего в том, что откажет или первый, или второй работающий элемент, равна сумме вероятностей  $Q_{11}$  и  $Q_{21}$  отказов каждого из них:

$$Q_0 = Q_{11} + Q_{21}.$$

Тогда вероятность отказа всей системы

$$Q_{c\ 2,3} = (Q_{11} + Q_{21}) Q_{31}, \quad (5.3)$$

где  $Q_{31}$  — вероятность отказа резервного элемента.

Рассуждая аналогично, можно получить значения вероятности отказа системы со многими работающими и резервными элементами. Так, вероятность отказа системы, состоящей из двух работающих  $a_{11}$ ,  $a_{21}$  и двух резервных элементов  $a_{31}$ ,  $a_{41}$ , запишется в виде

$$Q_{c\ 2,2} = (Q_{11} + Q_{21}) Q_{31} Q_{41};$$

вероятность отказа системы, состоящей из трех работающих и трех резервных:

$$Q_{c\ 3,3} = (Q_{11} + Q_{21} + Q_{31}) Q_{41} Q_{51} Q_{61}.$$

В общем случае, когда система состоит из  $w$  работающих и  $m - w$  резервных элементов, вероятность ее отказа

$$Q_c = \prod_{i=w+1}^m Q_{p3\ i} \sum_{i=1}^w Q_{p6\ i}, \quad (5.4)$$

где  $Q_{p6}$  и  $Q_{p3}$  — вероятности, характеризующие работающие и резервные элементы.

Если все элементы системы равнонадежны, т. е.

$$\begin{aligned} \text{то} \quad Q_{p6} &= Q_{p3} = Q_9, \\ Q_c &= w Q_9^{m-w}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Отношение числа резервных элементов к числу работающих назовем кратностью резервирования и обозначим через

$$\chi = \frac{m - w}{w}. \quad (5.6)$$

Кратность  $\chi$  может быть целым числом (когда, например, резервируется один работающий элемент) и дробным (когда, например, два работающих элемента резервируются нечетным числом резервных).

Возвращаясь к рассмотренному выше примеру, найдем, что при

$$Q_3 = 10^{-5} \quad Q_{21} = 10^{-10}.$$

Следовательно, вероятность безотказной работы системы, содержащей  $10^4$  пар радиоламп и полупроводниковых элементов, при наличии автоматического включения элемента-дублера, заменяющего неисправный:

$$P_c = (1 - 10^{-10})^{10^4} \approx 1 - 10^{-6} = 0,999999.$$

Таким образом, система становится практически совершенно надежной, чего не было при отсутствии резервирующих элементов, когда  $P_c = 0,9$ .

### § 5.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЩЕГО И РАЗДЕЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Независимо от метода резервирования его результатом является избыточность системы (§ 5.1). Сравним эффективность двух видов блочного резервирования: общего, посредством применения дублирующих систем, и раздельного, посредством применения дублирующих элементов.

Рассмотрим простейший случай однократного резервирования (в котором кратность резервирования  $\chi = 1$ ) и предположим, что надежность всех элементов (работающих и резервных) одинакова, а вероятность безотказной работы переключающих устройств, автоматически вводящих резерв, равна единице, причем последовательное соединение является основным, а параллельное — резервным.

При числе последовательно соединенных работающих элементов в системе  $n$  она может быть разбита на некоторое число  $r$  групп по  $s = \frac{n}{r}$  работающих элементов в каждой группе. Параллельно к каждой из этих групп подключаются резервные. При отказе любого из  $s$  элементов  $k$ -группы ( $k = 1, 2, \dots, r$ ) вся группа заменяется резервной (рис. 5.4).

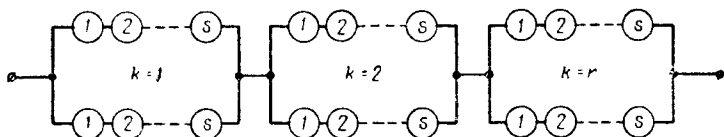


Рис. 5.4. Разделение системы на группы

Поэтому отказ резервированной  $k$ -й группы возможен лишь тогда, когда произойдет отказ работающего и одного резервного элемента. Так как вероятность безотказной работы  $s$  последовательно соединенных элементов равна  $P_s^s$ , то аналогично (2.20) находим вероятность безотказной работы любой из групп, как

$$P = 1 - (1 - P_s^s)^2.$$

Для всей системы с резервированием, которая состоит из последовательно соединенных групп, в соответствии с (5.1), получим

$$P_c = [1 - (1 - P_s^s)^2]^r, \quad (5.7)$$

где  $sr = m$ . Отсюда для общего резервирования ( $r = 1$ )

$$P_c = 1 - (1 - P_s^s)^2, \quad (5.8)$$

а для отдельного резервирования

$$P_c = [1 - (1 - P_s)^2]^n. \quad (5.9)$$

В случае, когда  $m$  основных систем, состоящая из  $n$  элементов каждая, находятся в резервном соединении, то

$$P_c = 1 - (1 - P_s^n)^m. \quad (5.10)$$

Если же каждый из  $n$  элементов основной системы резервируется такими же элементами, число которых равно  $m - 1$ , то

$$P_c = [1 - (1 - P_s)^m]^n. \quad (5.11)$$

Общее резервирование систем широко применяется в радиовещании и системах дальней связи, а в последнее время и в АУС. Необходимо однако отметить малую эффективность его по сравнению с отдельным резервированием.

Действительно, из формулы (5.10) видно, что  $P_c$  стремится к нулю, когда  $n \rightarrow \infty$ , при любом числе  $m$  резервных систем, даже бесконечно большом. И только при конечном числе  $n$  увеличение числа резервных систем дает в пределе, когда  $m \rightarrow \infty$ ,

$$P_c = 1.$$

Для отдельного же резервирования из формулы (5.11) следует, что  $P_c$  стремится к единице, когда  $m \rightarrow \infty$ , при любом числе  $n$  резервируемых элементов, даже бесконечно большом. И только при конечном  $m$ , но бесконечно большом  $n$  в пределе

$$P_c = 0.$$

Перепишем (5.10) в виде

$$P_c = 1 - [1 - (1 - Q_s)^n]^m, \quad (5.12)$$

а (5.11) — в виде

$$P_c = (1 - Q_s^m)^n. \quad (5.13)$$

Сравнивая (5.12) и (5.13), видим, что при  $m = 1$  значения  $P_c$  в случаях общего и отдельного резервирования совпадают, а при  $m > 1$  оказываются различными. Из формул (5.12) и (5.13) имеем:

$$Q_c = [1 - (1 - Q_s)^n]^m, \quad (5.14)$$

$$Q_c = 1 - (1 - Q_s^m)^n. \quad (5.15)$$

Предположим, что в течение рассматриваемого времени  $t$  вероятность отказа каждого элемента  $Q_s \ll 1$  (например, для современных усилительных электронных ламп за 500 час работы  $Q_s \leq 0,01$ ). Тогда в выражениях (5.14) и (5.15) можно произвести разложение в ряд по степеням  $n$  и при не слишком больших  $n$ , т. е. при соблюдении условия  $nQ_s \leq 1$ , пренебечь членами разложения с  $Q_s$  в степени выше первой. В результате найдем для общего резервирования

$$Q_c \approx (nQ_s)^m,$$

а для отдельного

$$Q_c \approx nQ_s^m.$$

Отсюда видно, что при одинаковом общем числе  $mn$  элементов вероятность отказа системы при общем резервировании в  $n^{m-1}$  раз больше, чем при отдельном. В том случае, когда вероятность  $Q_s$  близка к единице, отношение значений  $P_c$  при отдельном и общем резервировании, получаемое из (5.12) и (5.13), равно  $m^{n-1}$ . Таким образом, отдельное резервирование дает возможность получить значительно более надежную систему, чем общее, и при весьма малонадежных элементах. Например, при  $n = 50$  и  $P_s = 0,9$  для основной системы  $P_c = 0,9^{50} = 0,0052$ . Для той же системы при однократном общем резервировании, по (5.8),  $P_c = 0,0104$ , т. е. в два раза больше. При отдельном резервировании рассматриваемой системы, по (5.9), находим  $P_c = 0,6033$ .

Заметим, что для повышения надежности АУС, нет необходимости все элементы системы резервировать одинаковым числом элементов. До сих пор предполагалось, что для всех элементов значения  $P_s$  одинаковы. Практически надежности отдельных элементов системы будут всегда различаться, а в некоторых случаях и очень сильно. Так как надежность основной системы всегда ниже надежности самого ненадежного элемента, то, естественно, в первую очередь следует резервировать элементы с малым значением  $P_s$ , добываясь того, чтобы все  $r$  групп системы (в пределе  $r = n$ ) обладали

примерно равной надежностью или надежностью одного порядка. Пример такого резервирования показан на рис. 5.5, где принято, что основным является последовательное соединение, и предположено, что надежность резервируемых элементов  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{13}$  возрастает слева направо, соответственно чему изменяется кратность резервирования каждого из них.

Необходимое количество элементов  $m_k$  в каждой группе можно определить по известному значению  $P_g$  резервируемого элемента этой группы и требуемому значению вероятности безотказной работы  $P_k$  группы. Так, из (5.2) для случая группы  $m$  одинаковых элементов, из которых один работающий,

$$Q_c = Q_g^m,$$

откуда

$$m = \frac{\lg Q_c}{\lg Q_g}. \quad (5.16)$$

После того как будет достигнута примерно равная надежность всех групп, дальнейшее повышение надежности может производиться по общей схеме раздельного резервирования. Сравнительная эффективность методов резервирования показана на рис. 5.6, где изображена зависимость

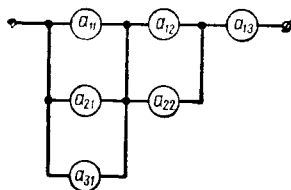


Рис. 5.5. Раздельное резервирование с разным числом резервирующих элементов по группам

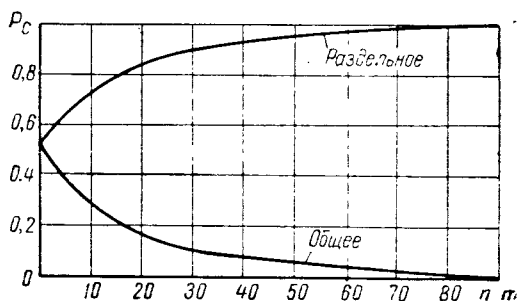


Рис. 5.6. Зависимость вероятности безотказной работы системы от общего числа элементов при  $P_g = 0,5$

вероятности безотказной работы системы от общего числа элементов  $n \cdot m$  при общем и раздельном резервировании в случае, когда для всех элементов  $P_g = 0,5$ .

Рассмотрим систему, представляющую собой основное соединение  $r$  групп. В каждой группе имеется основное соединение  $s$  элементов, зарезервированное такими же соеди-

нениями, число которых равно  $m - 1$ . Для такой системы аналогично (5.11),

$$P_c = [1 - (1 - P_0^s)^m]^r. \quad (5.17)$$

Соотношение (5.17) дает возможность определить необходимую кратность резервирования для обеспечения заданного значения  $P_c$  избыточной системы. Очевидно,

$$m = \frac{\lg(1 - P_c^{\frac{1}{r}})}{\lg(1 - P_0^s)}. \quad (5.18)$$

За искомое число  $m$  принимается ближайшее целое. Тогда кратность резервирования

$$\chi = m - 1.$$

Оценим, пользуясь формулой (5.18), экономическую эффективность раздельного резервирования элементов по сравнению с общим. Примем в первом приближении, что стоимость избыточной системы пропорциональна числу  $m$ . Тогда при  $P_0 = 0,9$  и  $n = 10$  раздельное резервирование, обеспечивающее  $P_c = 0,99$ , увеличит стоимость системы в 3 раза, а общее резервирование при тех же условиях — в 12 раз. Разница в стоимости указанных систем оказывается еще более разительной при  $n = 100$ : стоимость раздельно резервированной системы увеличивается только в 7 раз, а при общем резервировании — в  $2 \cdot 10^5$  раз. Выясним далее, как увеличивается стоимость избыточной системы при увеличении ее надежности от  $P_0$  до  $P_c$ . Обозначим стоимость резервируемой системы через  $C_0$ , а стоимость системы, полученной при общем резервировании, — через  $C$ . Пусть резервированная система будет иметь вероятность безотказной работы  $P_c$  при наличии  $m - 1$  резервирующих систем. Таким образом, для резервированной системы

$$Q_c = (1 - P_0)^m,$$

откуда

$$m = \frac{\lg(1 - P_c)}{\lg(1 - P_0)}. \quad (5.19)$$

Легко заметить, что формула (5.19) является частным случаем общей формулы (5.18) и может быть получена из нее подстановкой  $r = 1$ . По условию  $C = mC_0$ , следовательно,

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\lg(1 - P_c)}{\lg(1 - P_0)}. \quad (5.20)$$



Стоимость отдельно резервированной системы может быть получена также из уравнения (5.18). Действительно, полагая в нем  $r = n$ , имеем

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\lg(1 - P_c^n)}{\lg(1 - P_0^n)} \quad (5.21)$$

Графики зависимостей (5.20) и (5.21) для случая  $P_0 = 0,5$  приведены на рис. 5.7.

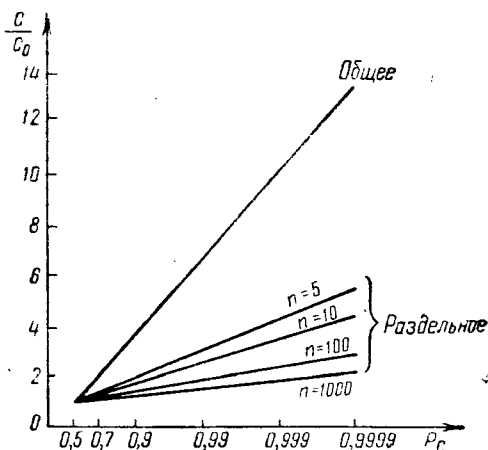


Рис. 5.7. Относительное увеличение стоимости системы ( $P_0 = 0,5$ ) при общем и раздельном резервировании

Учитывая преимущества раздельного резервирования, следует иметь в виду, что построение системы с резервируемыми элементами делает ее чрезвычайно громоздкой и значительно повышает ее стоимость. Поэтому практически резервирование элементов применяется только для наиболее ответственных и наименее надежных элементов или блоков.

#### § 5.4. ВЛИЯНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Все изложенные выше результаты получены в предположении, что автоматическое обнаружение отказавшего элемента или нарушения функционирования системы и включение резерва осуществляется идеальным переключателем, вероятность безотказной работы которого всегда

равна единице. У реального переключателя, как и у всякого другого элемента системы,  $P_{\pi}(t) < 1$ . Поэтому необходимо учитывать влияние такого переключателя на надежность системы [102, 103].

Рассмотрим систему, описываемую матрицей  $\|a_{ij}\|$  (§ 5.2). Допустим, что каждое из  $m-1$  соединений  $k$ -й группы имеет чувствительный и переключающий элемент, автоматически обнаруживающий отказ любого элемента, относящегося к работающему в данный момент соединению, и включающий резервное соединение (рис. 5.8, где  $m=2$ , а резервным

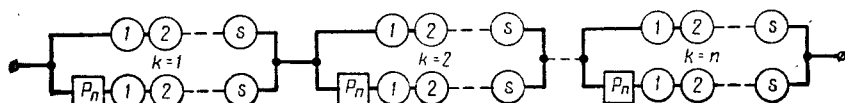


Рис. 5.8. Разделение системы с реальными переключателями на группы ( $m=2$ )

является параллельное соединение). При этом вероятность безотказной работы основного соединения  $k$ -й группы не изменится и будет равна  $P_2^s$ , а для резервного соединения уменьшится до значения, определяемого произведением  $P_{\pi} \times P_2^s$ . Если  $m=2$ , то в соответствии с (2.20) для  $k$ -й группы

$$P = 1 - (1 - P_2^s) (1 - P_{\pi} P_2^s),$$

а для всей системы

$$P_c = [1 - (1 - P_2^s) (1 - P_{\pi} P_2^s)]^r. \quad (5.22)$$

Рассуждая аналогичным образом, легко на основании (5.13) получить вероятность безотказной работы системы в общем случае резервирования при наличии реального переключателя. Напишем сначала такое выражение для системы, состоящей из одной группы. Пусть в этой группе имеется одно работающее последовательное соединение  $s$  элементов и  $m-1$  таких же резервирующих соединений. Каждое резервирующее соединение снабжено реальным переключателем. Для такой группы

$$P = \left[ 1 - \left( 1 - \prod_{j=1}^s P_{ij} \right) \right] \prod_{i=2}^m \left( 1 - P_{\pi i} \prod_{j=1}^s P_{ij} \right), \quad (5.23)$$

где  $P_{ij}$  — вероятность безотказной работы элемента  $a_{ij}$ , а  $P_{\pi i}$  — вероятность безотказной работы переключателя  $i$ -го соединения. Если система состоит из  $r$  подобных групп, то, вычислив вероятность  $P_k$  для каждой группы, аналогично

(5.23), где  $k=1$ , найдем вероятность безотказной работы системы

$$P_c = \prod_{k=1}^r P_k. \quad (5.24)$$

Если все элементы одинаковы ( $P_{ij} = P$ ) и все переключающие устройства ( $P_{пк} = P$ ), то при одинаковом числе элементов в каждой группе ( $s = n/r$ ) из (5.23) и (5.24) следует, что

$$P_c = [1 - (1 - P^r)(1 - P_n P^r)^{m-1}]^r. \quad (5.25)$$

Из (5.25) при  $r=1$ , т. е. в случае общего резервирования, получаем

$$P_c = 1 - (1 - P_n^m)(1 - P_n P_n^m)^{m-1}, \quad (5.26)$$

а при  $r=n$ , т. е. в случае отдельного резервирования,

$$P_c = [1 - (1 - P_n^m)(1 - P_n P_n^m)^{m-1}]^n. \quad (5.27)$$

При отдельном резервировании, когда каждый из  $n$  элементов имеет  $m-1$  избыточных, система содержит на  $n-1$  переключателей больше, чем при общем резервировании. Однако, несмотря на это, можно показать, что при одинаково надежных переключающих устройствах и любом числе  $n$  элементов отдельное резервирование всегда обеспечивает большую надежность, чем общее, какой бы ни была надежность переключающих устройств. Если даже предположить, что при общем резервировании применяется идеальный переключатель, а при отдельном — реальные переключающие устройства, то можно показать, что отдельное резервирование при определенных значениях  $P_n$  дает больший эффект.

Определим, какова же должна быть надежность переключающего устройства, обеспечивающего реализацию преимуществ отдельного резервирования. Для этого воспользуемся выражениями (5.26) и (5.27) и потребуем, чтобы вероятность  $P_c$ , находящаяся по последнему выражению, при одном и том же общем количестве элементов  $m \cdot n$  была больше.

При общем резервировании с идеальным переключающим устройством

$$P_c = 1 - Q_0^m, \quad (5.28)$$

где  $Q_0$  — вероятность отказа каждого из  $m$  резервно включенных соединений.

При раздельном резервировании с реальными переключающими устройствами поставленное условие будет выполнено, если

$$[(1 - Q_3) (1 - P_n P_3)^{n-1}]^n > 1 - Q_0^m,$$

где  $Q_3$  — вероятность отказа элемента.

Перепишем последнее неравенство в виде

$$Q_3 (1 - P_n P_3)^{n-1} > 1 - (1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}}. \quad (5.29)$$

Имея в виду, что

$$P_3 = 1 - Q_3 = (1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}},$$

из (5.29) найдем

$$P_n > \frac{1}{(1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}}} \left\{ 1 - \left[ \frac{1 - (1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}}}{1 - (1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}}} \right]^{\frac{1}{n-1}} \right\}. \quad (5.30)$$

При малом значении  $Q_0$  ( $Q_0 \ll 0,1$ ) можно воспользоваться приближением

$$(1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}} \approx 1 - \frac{Q_0^m}{n} \quad (5.31)$$

и получить из (5.30) неравенство

$$P_n > \frac{1}{(1 - Q_0^m)^{\frac{1}{n}}} [1 - (Q_0^{m-1})^{\frac{1}{n-1}}].$$

Отсюда

$$P_n > \frac{1 - Q_0}{(1 - Q_0)^{\frac{1}{n}}},$$

или

$$P_n > \frac{P_0}{P_3}. \quad (5.32)$$

В качестве примера рассмотрим систему, у которой  $n = m = 5$  и  $P_0 = 0,90$ . Следовательно,  $Q_0 = 1 - P_0 = 0,1$ ,  $P_3 = P_0^{\frac{1}{5}} = 0,9^{\frac{1}{5}} = 0,979$ . По формуле (5.32)

$$P_n = \frac{0,90}{0,979} = 0,92.$$

В частном случае, когда  $m_1^* = 2$ , неравенство (5.30) приводится к виду

$$P_n > \frac{(2 - P_0^n)^{\frac{1}{n}} - 1}{1 - P_0} \quad (5.33)$$

На рис. 5.9 представлены зависимости отношения  $\frac{P_n}{P_0}$  от  $P_0$  и  $n$ , рассчитанные по формуле

$$\frac{P_n}{P_0} = \frac{(2 - P_0)^{\frac{1}{n}} - 1}{P_0^n (1 - P_0^{\frac{1}{n}})} \quad (5.34)$$

получаемой из (5.33), если знак неравенства заменить знаком равенства. Для того чтобы рассматриваемая система ( $m = 2$ ) при раздельном резервировании была более надежна, чем при общем резервировании, соответствующие отношения  $P_n/P_0$ , полученные при заданных  $P_0$  и  $n$ , должны быть превышены. На рис. 5.10 приведены кривые зависимости вероятности  $P_c$  от  $n$  для случая раздельного резервирования основной системы,

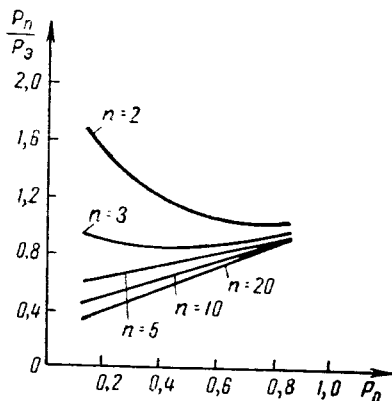


Рис. 5.9. Предельные значения отношения  $P_n/P_0$ , при котором раздельное резервирование эффективнее общего

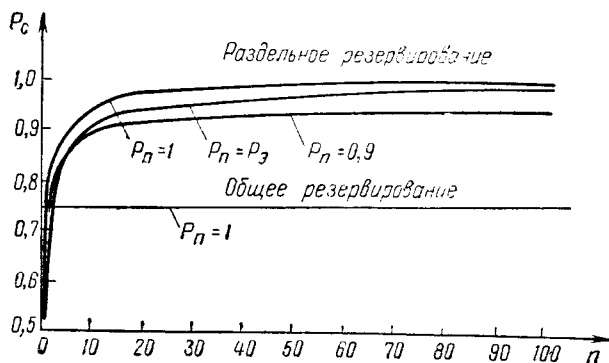


Рис. 5.10. Вероятность безотказной работы системы при однократном резервировании

у которой  $P_0 = 0,5$  при любом  $n$ . Кривые рассчитаны для трех значений  $P_n$  по формуле

$$P_c = [1 - (1 - P_0^n) (1 - P_n P_0^n)]^n,$$

полученной из (5.27) при  $m = 2$ . Из рис. 5.10 видно, что для повышения надежности системы целесообразно резервировать возможно большее число элементов, не превышающее, однако, некоторого предельного числа (порядка  $n \approx 20$ ). При тех же условиях вероятность безотказной работы системы для случая общего резервирования, рассчитанная по формуле (5.28), даже при наличии идеального переключателя,  $P_c = 0,75$  (рис. 5.10).

### § 5.5. СВЯЗЬ ЗАКОНОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ, ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Рассмотрим основную систему, состоящую из  $n$  элементов. Если экспоненциальный закон надежности имеет место для элементов, то ему подчиняется и система (§ 2.4). При этом, если элементы системы равнонадежны, т. е.  $P_{ij} = P_3$ , и среднее время отказа для них одинаково  $T_{ij} = T_3$ , то среднее время отказа системы по (2.61)

$$\bar{T}_c = \frac{\bar{T}_3}{n}. \quad (5.35)$$

Если для элементов справедливо распределение Релея (§ 2.4), то оно действительно и для основной системы. Среднее время отказа системы по (2.13)

$$\bar{T}_c = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^n \bar{T}_j^{-2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Если элементы одинаковы и имеют среднее время отказа  $\bar{T}$ , то в этом случае

$$\bar{T}_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \bar{T}. \quad (5.36)$$

В случаях применения нормального распределения для элементов (§ 2.6), оно не сохраняется для рассматриваемой системы. Среднее время отказа основной системы, состоящей из  $n$  равнонадежных элементов, при этом хорошо аппроксимируется формулой [12]

$$\bar{T}_c \approx \bar{T}_3 (1 + \lg n)^{\frac{1}{4}}. \quad (5.37)$$

Обратимся теперь к рассмотрению резервного соединения, состоящего из  $m$  одинаковых элементов, включаемых одновременно в момент  $t=0$  (постоянный резерв). Вероятность отказа такой системы определяется формулой (5.2).

В случае, когда для элементов системы применим экспоненциальный закон надежности, среднее время отказа выражается формулой (2.61), где  $k=m$ . Из этой формулы следует, что среднее время отказа рассматриваемой системы в случае экспоненциального закона надежности элементов растет гораздо медленнее, чем число элементов  $m$ . Так, при  $m=2$  имеем

$$\bar{T}_c = 1,5\bar{T}_s.$$

В случаях элементов, для которых имеют место распределения Релея и Гаусса, среднее время отказа системы растет с увеличением числа элементов еще медленнее [12].

В табл. 5.1 приведены асимптотические оценки отношения среднего времени отказа  $\bar{T}_{2,n}$  однократно резервированной основной системы и той же системы без резервирования  $\bar{T}_{1n}$  для трех распределений, характеризующих все  $n$  элементов системы, и двух методов резервирования [32]. Среднее время  $\bar{T}_{2,n}$  убывает по мере роста  $n$ . Характер убывания иллюстрируется асимптотическими оценками, приведенными в табл. 5.2. Из данных этой таблицы следует, что при заданном  $n$  время  $\bar{T}_c$  получает наибольшее значение для нормального и наименьшее — для экспоненциального распределения.

Таблица 5.1

Увеличение среднего времени отказа при однократном резервировании основной системы, состоящей из  $n$  элементов

Распределение	$\bar{T}_{2,n}/\bar{T}_{1,n}$	
	общее резервирование	раздельное резервирование
Экспоненциальное	1,5	$0,88 \sqrt{n}$
Релея	1,3	$1,11 \sqrt[3]{n}$
Нормальное	1,1	1,1

Полученные выше соотношения для резервированной системы справедливы для случая одновременного включения всех элементов группы при  $t=0$  (постоянный резерв). Однако этот способ включения не является ни единственным, ни оптимальным. Существенные преимущества обеспечивает

Среднее время отказа однократно резервированной основной системы, состоящей из  $n$  элементов, имеющих среднее время отказа  $\bar{T}_3$

Распределение	$\bar{T}_{2, n}$	
	общее резервирование	раздельное резервирование
Экспоненциальное	$\frac{1,5 \bar{T}_3}{n}$	$\frac{0,88 \bar{T}_3}{\sqrt{n}}$
Релея	$\frac{1,3 \bar{T}_3}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,13 \bar{T}_3}{\sqrt[4]{n}}$
Нормальное	$\frac{1,1 \bar{T}_3}{(1 + \lg n)^{\frac{1}{4}}}$	$\frac{1,1 \bar{T}_3}{(1 + \lg n)^{\frac{1}{4}}}$

способ резервирования замещением. Перейдем к его рассмотрению.

Пусть функция времени  $P_{ij}(t)$  есть вероятность безотказной работы элементы  $a_{ij}$  системы, включенной в момент  $t = 0$ . Вероятность отказа того же элемента  $a_{ij}$  обозначим через  $Q_{ij}(t)$ . При раздельном резервировании замещением, после отказа элемента  $a_{ij}$ , происходящего при  $t = T_{ij}$ , включается резервный элемент  $a_{i+1, j}$ . Поведение последнего определяется функцией  $P_{i+1, j}(t^*)$ , причем  $t^* = 0$ , когда  $t = T_{ij}$ . Подобным же образом обстоит дело с применением характеристики  $P(t)$  других резервных элементов. Но в случае резервирования замещением имеет смысл говорить лишь о среднем значении вероятности  $\bar{P}_{ij}(t)$  для элемента  $a_{ij}$ . Если  $\bar{T}_3$  — среднее время отказа, одинаковое для всех  $m$  элементов, которые подчиняются экспоненциальному закону надежности, то для их резервного соединения средняя вероятность безотказной работы элемента  $a_{i1}$  [12]

$$\bar{P}_{i,1}(t) = 1 - \frac{\Gamma\left(i, \frac{t^i}{\bar{T}_3^i}\right)}{\Gamma(i)}, \quad (5.38)$$

где  $\Gamma(i, y)$  — неполная гамма-функция. Эта функция подробно табулирована [33]. Для системы, состоящей из  $m$  элементов, соединенных резервно и включаемых замещением, вероятность безотказной работы

$$P_c(t) = \bar{P}_{m,1}(t). \quad (5.39)$$



Эта вероятность совпадает со средней вероятностью безотказной работы  $m$ -го элемента. Действительно, до момента включения  $m$ -го элемента обе вероятности равны единице, а затем система работает, как этот элемент. На рис. 5.11 приведены кривые, построенные по формуле (5.38). Среднее время отказа системы в этом случае

$$\bar{T}_c = m \bar{T}_s. \quad (5.40)$$

Рассмотрим далее систему комбинированного соединения, состоящего из  $n$  элементов. Система разбита на  $r$  основных групп по  $\frac{n}{r}$  элементов в каждой группе. Исследуем простейший случай однократного резервирования (рис. 5.4). Если  $P_{ij} = P_s$ , то для системы, согласно (5.17),

$$P_c = [1 - (1 - P_s)^{\frac{n}{r}}]^r.$$

Предположим, что применяется постоянное резервирование (все элементы включены при  $t=0$ ) и все элементы подчиняются экспоненциальному закону надежности.

При этом среднее время отказа системы [по формуле (2.13)]

$$\bar{T}_c = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\frac{nt}{r\bar{T}_s}})^2]^r dt = \frac{r\bar{T}_s}{n} \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^{2k} (-1)^{k+j} \binom{r}{k} \binom{2k}{j} \frac{1}{j},$$

или [12]

$$\bar{T}_c = \frac{\bar{T}_s}{n} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2^{2r-2} (r-1)! r!}{(2r-1)!} \right]. \quad (5.41)$$

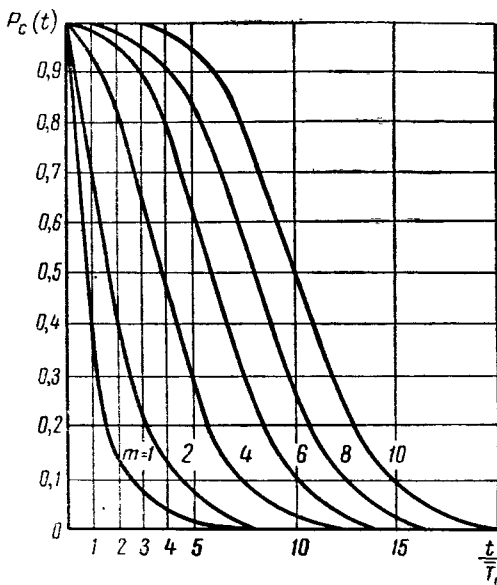


Рис. 5.11. Зависимость вероятности безотказной работы резервного соединения  $m$  элементов с средним временем отказа  $\bar{T}_s$  включаемых замещением, от времени

В предельных случаях при общем резервировании ( $r = 1$ )

$$\bar{T}_c = 1,5 \frac{\bar{T}_3}{n},$$

а при раздельном резервировании ( $r = n$ )

$$\bar{T}_c = \frac{\bar{T}_3}{n} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2^{2n-2} (n-1)! n!}{(2n-1)!} \right].$$

Предположим теперь, что в системе осуществлено резервирование замещением при идеальном переключающем устройстве. Тогда из (5.40)

$$\bar{T}_c = \frac{2r}{n} \bar{T}_3.$$

В предельных случаях при общем резервировании ( $r = 1$ )

$$\bar{T}_c = \frac{2\bar{T}_3}{n},$$

а при раздельном резервировании ( $r = n$ )

$$\bar{T}_c = 2\bar{T}_3.$$

До сих пор анализ надежности избыточных систем проводился в предположении, что замещение отказавшего элемента резервным осуществляется мгновенно. Это, конечно, является идеализацией. На практике даже самое быстродействующее переключающее устройство будет иметь конечное время срабатывания. Поэтому результаты анализа надежности будут существенно расширены, если учитывать время восстановления (§ 2.4), необходимое на замену отказавшего элемента [2]. Однако при автоматическом резервировании время восстановления можно считать пренебрежимо малым (§ 3.1). Таким образом, полученные результаты применимы для наиболее совершенных АУС.

### § 5.6. ПОСТОЯННОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Методы резервирования изучались до сих пор в основном отвлеченно от конкретных схем и элементов. Между тем не все устройства и элементы допускают, например, постоянное резервирование. Сюда относятся конденсаторы, катушки индуктивности, омические сопротивления, диоды и другие элементы, изменение числа которых при постоянном их включении изменяет параметры схемы. Это не относится, однако, к схемам устройств дискретного действия. Наоборот, элементы типа реле, не изменяющие параметров схемы, всегда допускают постоянное резервирование.

Главное достоинство постоянного резервирования заключается в известном упрощении системы, так как при его реализации не требуются элементы сигнализации отказа и переключения, понижающие общую надежность системы. Наличие переключателей неизбежно связано с прекращением функционирования системы на время восстановления (§ 2.4), что не во всякой системе допустимо. В таких системах постоянное резервирование оказывается единственно возможным.

Рассмотрим возможности резервирования неделимых элементов устройств цифровых вычислительных машин. Экспериментально изучено резервирование элементов триггерной ячейки электронной цифровой машины «Урал» [34]. На рис. 5.12

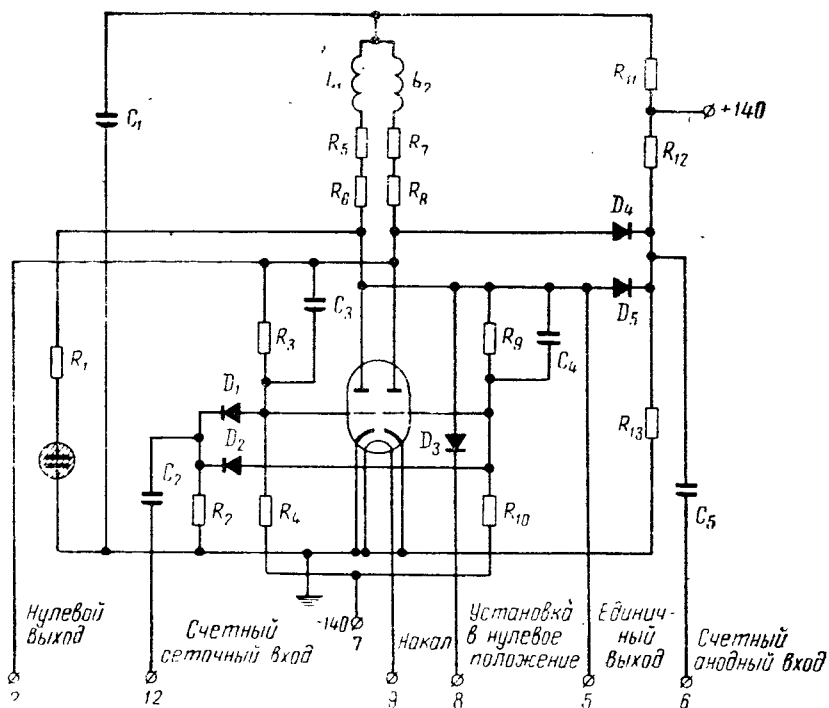


Рис. 5.12. Триггерная ячейка вычислительной машины «Урал»

приведена основная схема этой ячейки, а на рис. 5.13 — схема той же ячейки при постоянном резервировании всех ее неделимых элементов за исключением лампы. Оказалось, что в зависимости от рабочей частоты резервирование изме-

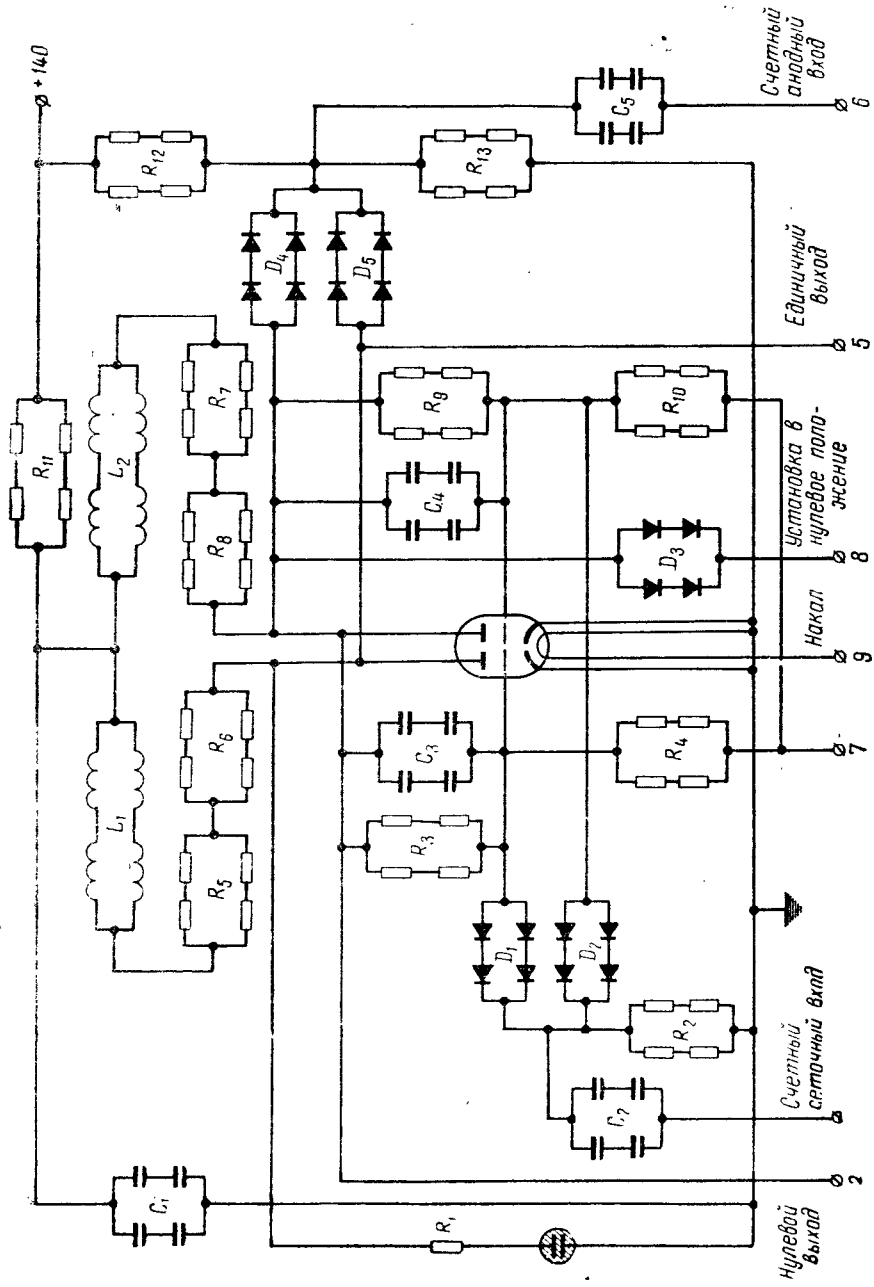


Рис. 5.13. Постоянное резервирование элементов триггерной ячейки вычислительной машины «Урал»

няет сеточные напряжения, обеспечивающие перебрасывание триггера под действием импульсов, поступающих на его входы в различных пределах. Результат резервирования тем лучше, чем ниже частота. Он зависит также от резервирования лампы, также влияет на эффективность резервирования.

Отказ любого элемента, в том числе пробой конденсатора  $C_1$ , приводит к отказу триггерной ячейки. Это означает, что нерезервированная схема ячейки представляет собой основное соединение. В табл. 5.3 приведены значения вероятности безотказной работы ячейки для  $t = 1000$  час в разных случаях резервирования при трех значениях частоты.

Таблица 5.3

**Вероятность безотказной работы триггерной ячейки  
вычислительной машины «Урал»**

Случай резервирования	Рабочая частота, кгц		
	150	220	300
Резервированы все элементы, кроме лампы	0,893÷0,844	0,889÷0,841	0,881÷0,825
Резервированы все элементы, в том числе и лампа	0,960÷0,842	0,937÷0,811	Триггерная ячейка не работает
Резервирована только лампа	0,927÷0,798	0,927÷0,798	Триггерная ячейка не работает
Резервирования нет	0,861÷0,802	0,861÷0,802	0,861÷0,802

Если требуется повысить надежность всей системы постоянным резервированием, то необходимо резервировать крупные функциональные элементы.

Примером АУС, в которой применено постоянное и общее резервирование, является система управления полетом [35], в которой применены два идентичных индикаторных канала, работающих одновременно. Каждый из каналов способен полностью выполнять функциональное назначение, нормально реализуемое двумя каналами. Блок-схема системы показана на рис. 5.14. На этой схеме обозначены: 1 — указатель воздушной скорости; 2 — директорный высотомер; 3 — высотомер; 4 — указатель числа  $M$ ; 5 — компас; 6 — указатель вертикальной скорости; 7 — гиродатчик угловой скорости; 8 — вычислитель управления расходом газа; 9 — усилитель; 10 — приводные двигатели; 11 — секторы газа; 12 — радиоприемник; 13 — блок учета аэродинамических данных; 14 — компасная

система; 15 — курсовой гироскоп; 16 — глассадный радиоприемник; 17 — вычислительный блок тангажа и азимута; 18 — машина, управляющая полетом; 19 — радиокompас; 20 — радиовысотометр; 21 — гировертикаль; 22 — азимутальный вычислитель автопилота; 23 — глассадный радиоприемник; 24 — радиовысотометр; 25 — гировертикаль; 26 — тангажный вычислитель автопилота; 27 — гиродатчик угловой скорости; 28 — усилитель данных аэродинамического вычислителя; 29 —

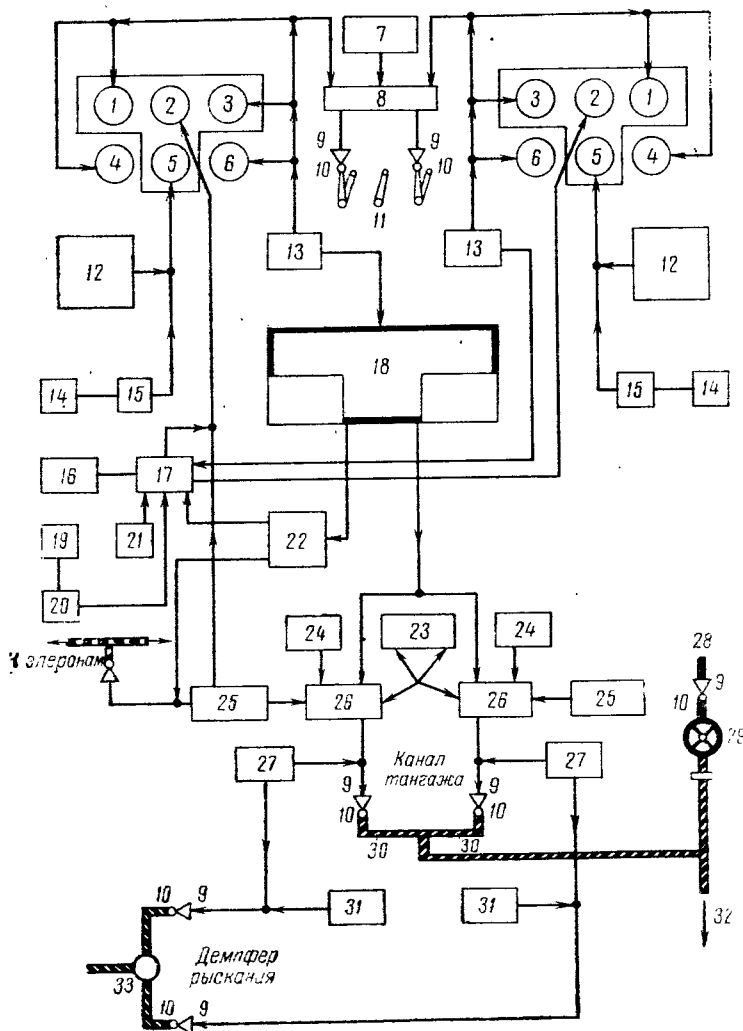


Рис. 5.14. Блок-схема АВС управления полетом

верньер ручного триммирования; 30 — муфта и ограничитель силового привода; 31 — датчик бокового скольжения; 32 — кинематическая цепь привода горизонтальных рулей; 33 — кинематическая цепь привода вертикальных рулей.

Как известно, между кораблем-спутником «Восток-2» и станциями Советского Союза непрерывно в течение 25 час поддерживалась надежная радиосвязь. Это обеспечивалось, в частности, постоянным и общим резервированием ультракоротковолнового передатчика корабля-спутника [36]. Два ультракоротковолновых передатчика корабля-спутника через разделительные фильтры непрерывно работали на одну передающую антенну.

### **§ 5.7. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЗАМЕЩЕНИЕМ. НАГРУЖЕННЫЙ, ОБЛЕГЧЕННЫЙ И НЕНАГРУЖЕННЫЙ РЕЗЕРВЫ**

При резервировании замещением в ряде случаев возможно применять ненагруженный резерв, при котором резервные единицы отключаются от источников энергии до начала их функционирования. Это дает возможность сохранить ресурс надежности элементов и устройств, что, естественно, повышает общую надежность системы и уменьшает эксплуатационные расходы за счет экономии энергии. Преимуществом резервирования замещением является также возможность применения одного резервного элемента на несколько основных.

Реализация резервирования замещением осложняется необходимостью применять сигнализирующие и переключающие элементы. Эти элементы могут существенно уменьшать общую надежность системы (§ 5.4). Они должны быть достаточно мощными, так как резервирование замещением целесообразно применять к функциональным звеньям или сравнительно сложным и крупным частям АУС. Значительная сложность часто обуславливает невысокую надежность переключающих устройств.

Рассмотрим общую методику оценки надежности систем с резервированием замещением, начиная с идеальных переключающих устройств, которые будем считать безынерционными.

Необходимо различать три возможных вида резервирования замещением: нагруженный резерв, облегченный и ненагруженный.

Нагруженный резерв отличается тем, что внешние или энергетические условия для основных и резервных элементов совпадают (например, они находятся под теми же напряжениями), но резервные элементы не перерабатывают информацию и не выдают выходных сигналов. При этом

ресурс их надежности начинает расходоваться (сверх износа неиспользования) с момента включения всей системы, а не с момента начала их функционирования. Поэтому система с нагруженным резервом более надежна, чем система без резерва в течение времени, меньшего времени безотказной работы нерезервированной системы [37].

Облегченный резерв отличается от нагруженного резерва тем, что его элементы нагружены неполностью. Ресурс надежности резервных элементов и в этом случае начинает расходоваться (сверх износа неиспользования) с момента включения системы, однако расходуется он медленнее.

Ненагруженный резерв расходует свой ресурс надежности (сверх износа неиспользования) только с момента его включения. Такой резерв соответствует, например, случаю применения в АУС резервных магнитных, полупроводниковых или диэлектрических усилителей, отключенных от источников питания.

Влияние видов резерва на расход ресурса надежности резервных элементов показано на рис. 5.15. Здесь  $P_{p6}(t)$  и  $P_{p3}(t)$  — вероятности безотказной работы соответственно работающего и резервного элементов,  $t_0$  — момент отказа работающего элемента,  $t_a$  — момент включения резервного элемента. Кривые, изображенные на рис. 5.15, а, относятся к случаю нагруженного, на рис. 5.15, б — к случаю облегченного и на рис. 5.15, в — к случаю ненагруженного резервов. Легко видеть, что при нагруженном резерве вероятность безотказной работы системы, резервированной способом замещения, и системы при постоянном резервировании одинакова (в предположении идеального переключателя). Методика расчета

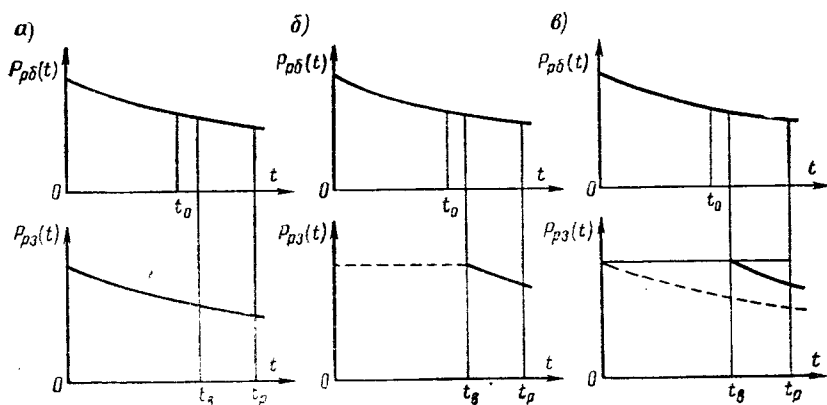


Рис. 5.15. Расход ресурса надежности работающих и резервных элементов при резервировании замещением



надежности в этом случае одинакова и для постоянного резервирования и для резервирования замещением.

Применение облегченного и ненагруженного резерва в случае резервирования замещением должно увеличивать надежность системы, так как при этом ресурс надежности резервных элементов либо расходуется незначительно, либо совсем не расходуется, что приводит к повышению вероятности их безотказной работы в промежутке времени от  $t_b$  до момента  $t_c$  окончания работы системы. Для этого обстоятельства требуется другая методика расчета надежности, так как отказ резервного элемента здесь не может считаться событием независимым, как это имеет место при нагруженном резерве. Рассмотрим простейший случай резервирования замещением одного работающего элемента одним резервным. Отказ системы за время  $t_p$  представляет собой событие, состоящее в совместном отказе основного и резервного элементов. Разобьем время  $t_p$  на  $l$  отрезков, каждый длительностью  $\Delta t$  (рис. 5.16). На любом участке  $\Delta t_i$  элемент может работать

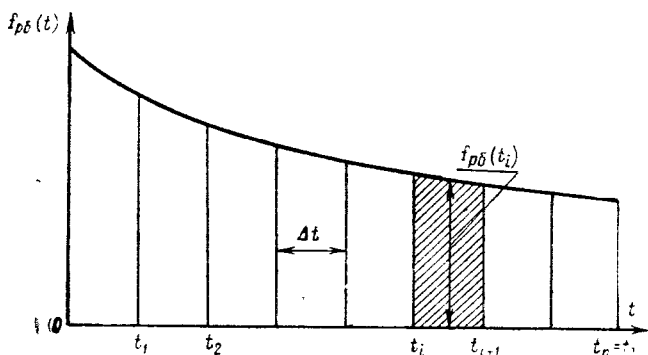


Рис. 5.16. К расчету вероятности отказа при облегченном резерве

либо безотказно, либо отказать в работе. Эти события несовместимы. Предположим, что работающий элемент откажет на  $i$ -м участке. Вероятность этого события  $Q_{pб}(t)$  есть вероятность того, что случайная величина — время отказа работающего элемента — окажется внутри отрезка времени  $\Delta t_i$ , т. е., если  $f_{pб}(t)$  есть плотность вероятности времени отказа, то, по (2.8),

$$Q_{pб}(t_i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f_{pб}(t) dt.$$

Для малых интервалов  $\Delta t$

$$Q_{\text{рб}}'(t_i) \approx f_{\text{рб}}(t_i) \Delta t.$$

Обозначим через  $Q_{\text{рз}}\left(\frac{t_p}{t_i}\right)$  условную вероятность отказа резервного элемента за период  $t_p$ , вычисленную при допущении, что основной элемент отказал в промежутке  $\Delta t_i$ . Тогда вероятность отказа системы за время  $t_p$  можно определить по формуле полной вероятности<sup>1</sup>:

$$Q_c(t_p) = \sum_{i=1}^l f_{\text{рб}}(t_i) Q_{\text{рз}}\left(\frac{t_p}{t_i}\right) \Delta t. \quad (5.42)$$

Полагая  $l \rightarrow \infty$ , сумму (5.42) представим в виде интеграла

$$Q_c(t_p) = \int_0^{t_p} f_{\text{рб}}(t) Q_{\text{рз}}\left(\frac{t_p}{t}\right) dt. \quad (5.43)$$

Условная вероятность отказа резервного элемента за время  $t_p$  определяется с помощью плотности вероятности времени его отказа  $f_{\text{рз}}(t)$  как

$$Q_{\text{рз}}\left(\frac{t_p}{t}\right) = \int_0^{t_p-t} f_{\text{рз}}(t) dt. \quad (5.44)$$

Из (5.43) получаем

$$Q_c(t_p) = \int_0^{t_p} f_{\text{рб}}(t) \left\{ \int_0^{t_p-t} f_{\text{рз}}(t) dt \right\} dt. \quad (5.45)$$

Формула (5.45) является общим выражением, применимым ко всем случаям резервирования замещением. Она упрощается для нагруженного резерва, когда

$$f_{\text{рз}}(t) = f_{\text{рб}}(t),$$

и выражение (5.45) принимает вид

$$Q_c(t_p) = \left[ \int_0^{t_p} f_{\text{рб}}(t) dt \right]^2 = [Q_{\text{рб}}(t_p)]^2. \quad (5.46)$$

Легко видеть, что полученное выражение действительно является частным случаем формулы (2.22), примененной

<sup>1</sup> См., например, [38].

к простейшей системе, состоящей из двух элементов при общем резервировании.

Для системы, состоящей из одного работающего и двух резервных элементов, вероятность отказа может быть найдена посредством рассмотрения работающего и первого резервного элементов как одного элемента, замещенного вторым резервным. Аналогично решается задача и при большем числе резервных элементов [39]. Рассмотрим преимущества резервирования замещением перед постоянным резервированием, например, в случаях ненагруженного и облегченного резервов.

Введем коэффициент кратности резервирования

$$\beta = \frac{x_{\text{пост}}}{x_{\text{зам}}},$$

определяемый отношением кратности резервирования  $x_{\text{пост}}$  при постоянном включении резерва к величине  $x_{\text{зам}}$  — кратности резервирования при резервировании замещением при условии, что вероятности безотказной работы систем в обоих случаях одинаковы. Если резервирование замещением эффективнее, то  $x_{\text{зам}} < x_{\text{пост}}$ ; тогда коэффициент кратности  $\beta$  будет показывать число резервных элементов при постоянном включении, эквивалентно заменяющих один резервный элемент при включении замещением.

Так как по условию  $P_c(x_{\text{пост}}) = P_c(x_{\text{зам}})$ , то и вероятности отказов систем

$$Q_c(x_{\text{пост}}) = Q_c(x_{\text{зам}}). \quad (5.47)$$

При постоянном резервировании вероятность отказа системы

$$Q_{c \text{ пост}} = Q_9^m, \quad (5.48)$$

где  $Q_9$  — вероятность отказа элемента;

$m$  — число элементов, предположенных одинаковыми.

Но

$$m = x_{\text{пост}} + 1.$$

Тогда из (5.48)

$$x_{\text{пост}} = \frac{\lg Q_{c \text{ пост}}}{\lg Q_9} - 1,$$

или, согласно (5.47),

$$x_{\text{пост}} = \frac{\lg Q_{c \text{ зам}}}{\lg Q_9} - 1.$$

Следовательно,

$$\beta = \frac{\lg Q_{с\text{ зам}}}{z_{\text{зам}} \lg Q_3} - \frac{1}{z_{\text{зам}}} \quad (5.49)$$

Можно показать, что коэффициент кратности  $\beta$  имеет связь с эффективностью резервирования  $E = \frac{Q_{с\text{ пост}}}{Q_{с\text{ зам}}}$ . Эта связь определяется соотношением [39]

$$\beta = 1 - \frac{\lg E}{z_{\text{зам}} \lg Q_3} \quad (5.50)$$

Так как всегда  $Q_3 < 1$ ,  $E \geq 1$ , то всегда и  $\beta > 1$ . Характер зависимости  $\beta$  от  $Q_3$  показан на рис. 5.17, построенном для экспоненциального закона надежности. Из этого рисунка видно, что преимущества резервирования замещением перед постоянным включением резерва становятся особенно ощутимыми при низкой надежности резервируемых элементов.

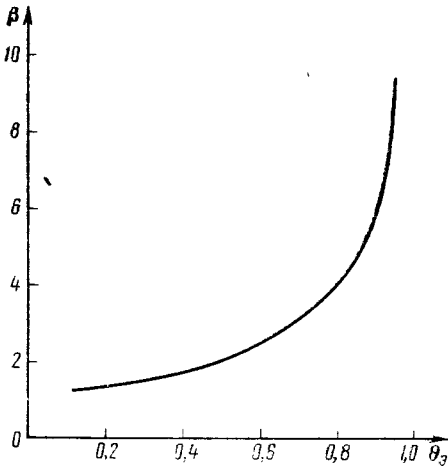


Рис. 5.17. Зависимость коэффициента кратности резервирования от вероятности отказа элемента системы

Таким образом, при наличии малонадежных элементов резервируемой системы следует всегда применять резервирование замещением, если АУС по своему принципу действия допускает это.

В случае дробных значений кратности  $x$  решение задачи резервирования имеет некоторые особенности [40].

Предположим теперь, что отказавший элемент за определенное время, в течение которого функционирование системы обеспечивается оставшейся частью резерва, подвергается ремонту, проверке и снова вводится в резерв. Предположим также, что это будет происходить с каждым из отказавших элементов. Такой резерв, периодически уменьшающийся за счет перехода резервных элементов в работающие и восстанавливающийся за счет ремонта отказавших элементов, будем называть циклическим. Практическое осуще-

ствление циклического резерва и повышение за счет этого надежности систем при некоторых условиях вполне возможно [41, 42].

### § 5.8. ОПТИМАЛЬНОЕ БЛОЧНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Выше было показано, что особенно эффективно раздельное резервирование, при котором наименее надежные элементы имеют наибольшую кратность резервирования. Однако раздельное резервирование усложняет аппаратуру, увеличивает габарит и вес и повышает ее стоимость. Поэтому при построении АУС желательно находить оптимальное решение задачи раздельного резервирования, т. е. оптимальное резервирование.

Рассмотрим решение указанной задачи при следующих условиях:

- 1) обеспечить возможно большее значение вероятности безотказной работы системы при ее заданном весе;
- 2) обеспечить заданную вероятность безотказной работы при наименьшем весе системы;
- 3) обеспечить заданную вероятность безотказной работы при наименьшей стоимости системы.

В первом случае задача была первоначально решена [43] в предположении одинаковых размеров, весов и стоимости всех элементов системы. Это предположение искусственно, но имеется решение той же задачи в общем виде при следующей ее формулировке [44]. Пусть нерезервированная система состоит из  $n$  элементов с вероятностями отказов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  и весами  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . Требуется произвести раздельное резервирование такой системы без превышения заданного для нее веса и при наибольшей возможной вероятности безотказной работы. Заметим, что способ решения этой задачи не изменится, если ограничивающим параметром будет не вес, а габариты или стоимость резервированной системы.

Вероятность безотказной работы нерезервированной системы при основной схеме соединения ее элементов

$$P_c = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i). \quad (5.51)$$

При раздельном резервировании с кратностью  $x_i = m_i - 1$  вес резервированной системы

$$G_p = \sum_{i=1}^n m_i G_i, \quad (5.52)$$

а вероятность безотказной работы ее, в соответствии с (5.2),

$$P_p = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i^{m_i}). \quad (5.53)$$

Решение рассматриваемой задачи сводится к нахождению таких целых чисел  $m_i \geq 1$ , при которых величина  $P_p$ , определяемая из (5.53), принимала бы максимальное значение, а вес  $G_p$  не превышал бы допустимого  $G$ . Искомые значения  $m_i$  определяются формулой [44]

$$m_i = \frac{\ln a_i - \ln (y_0 + a_i)}{\ln Q_i}, \quad (5.54)$$

где  $y_0$  — корень уравнения

$$\sum_{i=1}^n a_i \ln (y + a_i) = G + a_i \ln a_i, \quad (5.55)$$

содержащего постоянные

$$a_i = - \frac{G_i}{\ln Q_i}. \quad (5.56)$$

В первом приближении

$$y_0 = \exp \left[ \frac{G + \sum_{i=1}^n a_i \ln a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right]. \quad (5.57)$$

При недостаточной точности этого приближения следующие могут быть найдены методом Ньютона. Вычисленные таким способом значения  $m_i$  округляются до целых значений  $m'_i$ . Получаемый при этом набор чисел  $m'_i$  должен быть таким, чтобы сумма

$$\sum_{i=1}^n G_i (m_i - m'_i) \quad (5.58)$$

имела наименьшее положительное значение. Если несколько наборов чисел  $m'_i$  дают одинаковый минимум суммы (5.58), то среди них следует выбирать такую, чтобы имела наименьшее значение сумма

$$\sum_{i=1}^n G_i (m_i - m'_i)^2. \quad (5.59)$$

Рассмотрим пример расчета по изложенному способу. Имеется нерезервированная система, построенная по основ-

ной схеме соединения элементов при  $n = 5$ . Пусть элементы системы соответственно имеют:

$$Q_1 = 0,2; \quad Q_2 = 0,3; \quad Q_3 = 0,4; \quad Q_4 = 0,5; \quad Q_5 = 0,6;$$

$$G_1 = 5 \text{ кг}; \quad G_2 = 3 \text{ кг}; \quad G_3 = 2 \text{ кг}; \quad G_4 = 4 \text{ кг}; \quad G_5 = 1 \text{ кг}.$$

Вероятность безотказной работы такой системы в соответствии с формулой (2.21)

$$P_0 = (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_3)(1 - Q_4)(1 - Q_5) =$$

$$= 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,4 = 0,0672,$$

т. е. основная система практически оказывается ненадежной. Вероятность ее отказа  $Q_0 = 0,9328$ .

Вес основной системы  $G_0 = \sum_{i=1}^5 G_i = 15 \text{ кг}$ . Требуется, при-

менив раздельное резервирование, добиться максимально возможного значения вероятности безотказной работы системы  $P_p$ , не превышая при этом заданный вес резервированной системы  $G = 60 \text{ кг}$ .

По (5.56) находим:  $a_1 = 3,11$ ;  $a_2 = 2,29$ ;  $a_3 = 2,20$ ;  $a_4 = 5,78$ ;  $a_5 = 1,97$ . Тогда уравнение (5.55) принимает вид:

$$3,11 \ln(y + 3,11) + 2,49 \ln(y + 2,49) + 2,2 \ln(y + 2,2) +$$

$$+ 5,78 \ln(y + 5,78) + 1,97 \ln(y + 1,97) = 60 + 3,11 \ln 3,11 +$$

$$+ 2,49 \ln 2,49 + 2,2 \ln 2,2 + 5,78 \ln 5,78 + 1,97 \ln 1,97.$$

Приближенное значение корня  $y_0$  этого уравнения находим по (5.57). В рассматриваемом примере

$$G + \sum_{i=1}^n a_i \ln a_i = 79,27, \quad \sum_{i=1}^n a_i = 15,15,$$

поэтому

$$y_0 = \exp\left(\frac{79,27}{15,55}\right) = 164,0.$$

Уточняя полученное значение  $y_0$  методом Ньютона, находим второе приближение

$$y_0 = 156,2.$$

Линейная интерполяция этих двух значений определяет искомую величину:

$$y_0 = \frac{164,0 - 156,2}{2} + 156,2 = 160,1.$$

По формуле (5.54) подсчитаем значения  $m_i$ . Получим:  $m_1 = 2,46$ ;  $m_2 = 3,46$ ;  $m_3 = 4,7$ ;  $m_4 = 4,87$ ;  $m_5 = 8,6$ . Округлим их до целых значений и рассмотрим три набора чисел  $m_i$ , приведенные в табл. 5.4.

К расчету оптимального резервирования

Набор $m'_i$	$m'_1$	$m'_2$	$m'_3$	$m'_4$	$m'_5$
1	2	3	5	5	9
2	3	3	4	4	9
3	3	4	4	4	8

Находим оптимальную комбинацию целых значений  $m_i$ , вычисляя для каждой из них сумму по (5.58): 2,16 — для набора 1, 3,56 — для набора 2 и 4,76 — для набора 3.

Таким образом, убеждаемся, что наилучшее решение получаем при первом наборе значений  $m'_i$ . Поэтому принимаем его в качестве расчетного.

Подставляя в (5.53) принятые значения  $m'_i$ , найдем вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P_p = (1 - 0,2^2)(1 - 0,3^3)(1 - 0,4^5)(1 - 0,5^5)(1 - 0,6^9) = 0,89.$$

Таким образом, не превышая четырехкратного увеличения веса резервированной системы по сравнению с нерезервированной, вероятность безотказной работы системы оказывается возможным увеличить в 13,3 раза.

Заметим, что при определении значений  $m$  практически нет необходимости проделывать вычисления, уточняющие величину  $y_0$ . Можно пользоваться первым приближением по формуле (5.60), если  $a_i \ll y_0$ , что обычно имеет место. В рассмотренном примере уточнения были излишними, так как же первое приближение  $y_0 = 164,0$  определяет значения:

$$m_1 = 2,47; m_2 = 3,5; m_3 = 4,71; m_4 = 4,9 \text{ и } m_5 = 8,65,$$

которые после округления дают возможность получить те же целые значения  $m'_i$ .

Обратимся теперь к решению задачи оптимального резервирования с наименьшим весом при заданной вероятности безотказной работы системы. В частном случае, когда вероятность безотказной работы всех элементов системы близка к единице, эта задача решена в [45]. Рассмотрим ее решение в общем виде [44]; при этом будем считать, что вероятность безотказной работы резервированной системы  $P_p$  не меньше заданного ее значения  $P$  при наименьшем возможном весе. При таком предположении также оказывается справедливым соотношение (5.54), если величину  $y_0$  определять из

$$y^n - P \prod_{i=1}^n (y + a_i) = 0, \quad (5.60)$$



где  $a_i$  выражается формулой (5.56). В первом приближении искомый корень этого уравнения

$$y_0 = \frac{P}{1-P} \sum_{i=1}^n a_i. \quad (5.61)$$

В остальном расчет не отличается от предыдущего.

Рассмотрим теперь задачу оптимального резервирования для случая, когда лимитирующим фактором является стоимость системы. Пусть нерезервированная система состоит из  $n$  элементов, соединенных по основной схеме. Пусть также вероятности отказов элементов и их стоимости равны соответственно

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_n \text{ и } C_1, C_2, \dots, C_n.$$

Стоимость такой системы

$$C_c = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Определим минимально возможную стоимость резервированной системы, при которой возможно получить заданную величину вероятности ее безотказной работы  $P_p$ , если осуществляется раздельное резервирование. Предположим, что для этого требуется  $m_i - 1$  элементов, резервирующих  $i$ -й элемент данной системы. Тогда вероятность безотказной работы резервированной системы выражается формулой (5.53). Так как стоимость любой  $i$ -й группы элементов равна произведению  $m_i C_i$ , то стоимость резервированной системы

$$C_p = \sum_{i=1}^n m_i C_i. \quad (5.62)$$

Введем такую новую переменную  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ , при которой удовлетворялось бы уравнение

$$1 - Q_i^{m_i} = P_p^{\alpha_i}. \quad (5.63)$$

Тогда

$$m_i = \frac{\lg(1 - P_p^{\alpha_i})}{\lg Q_i}. \quad (5.64)$$

Из (5.62) и (5.64) стоимость резервированной системы

$$C_p = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \lg(1 - P_p^{\alpha_i})}{\lg Q_i}. \quad (5.65)$$

На основании (5.63)

$$P_p = \prod_{i=1}^n P_p^{\alpha_i} = P_p^{\sum_{i=1}^n \alpha_i},$$

откуда

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1. \quad (5.66)$$

Значения  $\alpha_i$  и  $m_i$  определяются соотношениями, аналогичными (5.56) и (5.54):

$$\alpha_i = \frac{C_i}{n}; \quad (5.67)$$

$$\lg Q_i \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\lg Q_i}$$

$$m_i = \frac{\lg(1 - P_p^{\alpha_i})}{\lg Q_i}, \quad (5.68)$$

или

$$m_i = \frac{\lg[1 - (1 - Q_p)^{\alpha_i}]}{\lg Q_i},$$

где

$$Q_p = 1 - P_p.$$

Если  $Q_p \ll 1$ , то

$$(1 - Q_p)^{\alpha_i} \approx 1 - \alpha_i Q_p.$$

Следовательно,

$$m_i \approx \frac{\lg(\alpha_i Q_p)}{\lg Q_i}. \quad (5.69)$$

Стоимость резервированной системы

$$C_p = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\lg Q_i} \lg(1 - P_p^{\alpha_i}). \quad (5.70)$$

Значения  $m_i$ , определяемые указанными соотношениями, обычно не будут целыми. В таком случае, пользуясь обычными правилами округления чисел, рекомендуется брать ближайшее целое число. Получаемое при этом приближение обычно оказывается вполне достаточным.

Добавление резервного элемента к какой-либо группе элементов повышает и надежность, и стоимость системы. Для того чтобы подключение резервного элемента было наиболее эффективным, получаемое при этом отношение приращения критерия надежности к приращению стоимости си-

стемы должно быть максимальным. Назовем это отношение коэффициентом эффективности резервирования. Для  $i$ -го элемента этот коэффициент

$$k_i = \frac{C_c \Delta P_i}{P_c \Delta C_i}, \quad (5.71)$$

где  $P_c$  — вероятность безотказной работы системы до подключения резервного элемента к  $i$ -й группе;

$\Delta P_i$  — приращение этой вероятности при подключении резервного элемента.

Выражение (5.67) существенно упрощается для случая равнонадежных и равноценных элементов, имеющих вероятность отказа  $Q_3$ . При этом

$$\alpha = \frac{1}{n} \quad (5.72)$$

и

$$m = \frac{\lg(1 - P_p^{\frac{1}{n}})}{\lg Q_3}. \quad (5.73)$$

В заключение рассмотрим пример, поясняющий применение предыдущих соотношений к резервированию системы, у которой  $n = 5$ . Пусть  $Q_1 = 0,5$ ;  $Q_2 = 0,4$ ;  $Q_3 = 0,3$ ;  $Q_4 = 0,2$ ;  $Q_5 = 0,1$ , а стоимость элементов в условных единицах  $C_1 = 1$ ;  $C_2 = 2$ ;  $C_3 = 3$ ;  $C_4 = 4$ ;  $C_5 = 5$ . Требуется при раздельном резервировании получить величину  $P_p = 0,999$  при минимальной стоимости системы  $C_p$ .

Вероятность безотказной работы резервируемой системы

$$P_c = \prod_{i=1}^5 P_i = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 0,1512.$$

По формуле (5.67)

$$\alpha_1 = 0,135; \alpha_2 = 0,202; \alpha_3 = 0,231; \alpha_4 = 2,30; \alpha_5 = 0,200.$$

Далее, по формуле (5.69),

$$m_1 = \frac{\lg 1,35 \cdot 10^{-4}}{-0,3} = 12,9, \text{ принимаем } m_1 = 13;$$

$$m_2 = \frac{\lg 2,02 \cdot 10^{-4}}{-0,4} = 9,24, \text{ принимаем } m_2 = 9;$$

$$m_3 = \frac{\lg 2,31 \cdot 10^{-4}}{-0,52} = 6,90, \text{ принимаем } m_3 = 7;$$

$$m_4 = \frac{\lg 2,3 \cdot 10^{-4}}{-0,7} = 5,20, \text{ принимаем } m_4 = 5;$$

$$m_5 = \frac{\lg 2,0 \cdot 10^{-4}}{-0,1} = 3,70, \text{ принимаем } m_5 = 4.$$

Стоимость резервированной высоконадежной системы

$$C_p = \sum_{i=1}^5 m_i C_i = 13 \cdot 1 + 9 \cdot 2 + 7 \cdot 3 + 5 \cdot 4 + 4 \cdot 5 = 92.$$

Если до резервирования стоимость основной системы

$$C_c = \sum_{i=1}^5 C_i = 15,$$

то стоимость резервированной системы увеличится в

$$\frac{C_p}{C_c} = \frac{92}{15} = 6,1 \text{ раза.}$$

Вероятность же безотказной работы системы увеличивается в

$$\frac{P_p}{P_c} = \frac{0,999}{0,1512} = 6,6 \text{ раза.}$$

Интересно сравнить эти величины с теми, которые получаются при общем резервировании. При  $P_c = 0,1512$   $Q_c = 0,8488$ . Тогда необходимое число резервных систем, на основании (5.16),

$$m_c = \frac{\lg Q_p}{\lg Q_c} = \frac{\lg (1 - 0,999)}{\lg 0,8488} = 44.$$

Следовательно, для получения той же высокой надежности системы при общем резервировании потребовалось бы не менее, чем сорок четыре трехкратное увеличение ее размеров, веса и стоимости (учитывая переключатели, дополнительные соединения и т. п.).

## § 5.9. СХЕМНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Как уже было выяснено в § 5.1, схемное резервирование сигналов осуществляется составлением схемы из ряда одинаковых блоков, подобно одному из которых должна действовать такая схема. При этом схема оказывается надежнее отдельного блока, как показывает формула (2.29). Отсюда возникает задача разработки подобных схем по заданной надежности, которую они должны иметь.

Решение поставленной задачи начнем с исследования формулы (2.29), предварительно подставив в нее (2.33):

$$P_c(t) = \sum_{h=1}^k A_h P_s^h (1 - P_s)^{k-h}. \quad (5.74)$$

Очевидно, что при  $h = k$  (все элементы образуют одно основное соединение)

$$A_k = 1.$$

Поэтому при  $P_s = 1$

$$P_c(t) = A_k P_s^k = 1.$$

При  $P_s = 0$ , как видно из (5.74),

$$P_c(t) = 0.$$

Таким образом, изображая зависимость  $P_c$  от  $P_s$  графически, можно найти линию, проходящую через точки  $(0, 0)$  и  $(1, 1)$ .

Если  $k = 1$ , то

$$P_c = P_s, \quad (5.75)$$

т. е. зависимость  $P_c(P_s)$  в координатах  $P_s, P_c$  представляется собой биссектрису координатного угла между точками  $(0, 0)$  и  $(1, 1)$  (рис. 5.18).

При  $k > 1$  в этих точках

$$\frac{dP_c}{dP_s} = 0.$$

Следовательно, при этом кривая  $P_c(P_s)$  должна пересекать линию (5.75) в точках  $(0, 0)$ ,  $(1, 1)$  и еще, по крайней мере, один раз между этими точками. Если в этой области имеется лишь три пересечения, т. е. при  $P_s = 0$ ,  $P_s = 1$  и  $P_s = P_0$  ( $0 < P_0 < 1$ ) (рис. 5.18), то при  $P_s > P_0$  надежность схемы будет, очевидно, выше надежности элементов, из которых эта схема составлена. Это всегда имеет место, так как никакая функция  $P_c(P_s)$  не имеет в области  $0 \leq P_s \leq 1$  других пересечений с линией (5.75) [10].

Рассмотрим, например, схему, представленную на рис. 2.6. При этом будем считать, как и в § 2.2, что основным является последовательное соединение. Уравнение, определяющее точки пересечения кривой  $P_c(P_s)$  с прямой (5.75), получим, если  $P_s$  приравнять правую часть выражения  $P_c(t)$  (2.34), выведенного в § 2.2 для этой схемы:

$$2P_s^5 - 5P_s^4 + 2P_s^3 + 2P_s^2 - P_s = 0.$$

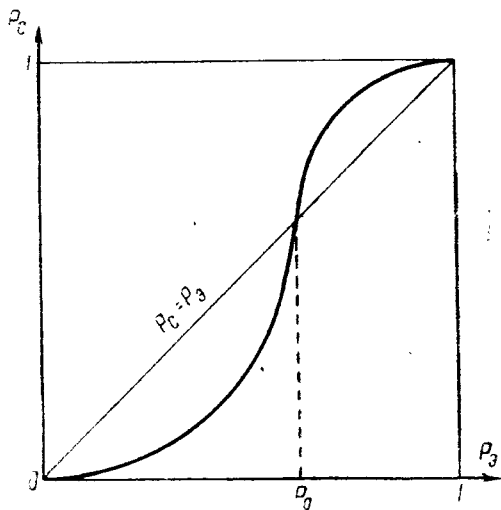


Рис. 5.18. Зависимость между вероятностями безотказной работы системы и элемента при схемном резервировании

Отсюда, в соответствии со сказанным выше, следует, что одно пересечение имеет место при  $P_3 = 0$ , а всего может быть пять пересечений. Остальные пересечения определяются уравнением

$$P_3^4 - 2,5P_3^3 + P_3^2 + P_3 - 0,5 = 0,$$

которое, как легко видеть, удовлетворяется при  $P_3 = 1$ . Деля его левую часть на  $P_3 - 1$ , находим уравнение

$$P_3^3 - 1,5P_3^2 - 0,5P_3 + 0,5 = 0,$$

которое, как нетрудно заметить, удовлетворяется при  $P_3 = 0,5$ . Делением левой части последнего уравнения на  $P_3 - 0,5$  приходим к квадратному уравнению

$$P_3^2 - P_3 - 1 = 0;$$

его корни

$$P_3 = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$$

дают еще два пересечения, лежащие, однако, вне области возможных значений  $P_3$ . Таким образом, для рассматриваемой схемы

$$P_0 = 0,5,$$

т. е. в области

$$0,5 < P_3 < 1$$

ее надежность больше надежности составляющих ее элементов.

В области

$$0 < P_3 < P_0$$

вероятность безотказной работы рассмотренной схемы ниже, чем у ее элементов. Однако та же самая схема будет иметь вероятность безотказной работы большую, чем ее элементы, если

$$P_3 > P_0.$$

Более того, уменьшение вероятности безотказной работы при  $P_3 < P_0$  может означать увеличение надежности, если при изменении характера отказов основные соединения становятся резервными, и наоборот. Это следует из того, что (как было выяснено в § 2.2) в этом случае выражение вероятности безотказной работы превращается в выражение вероятности отказа. Пусть, например, рассматриваемая схема составлена из реле, контакты которых должны замыкаться при возбуждении обмотки и размыкаться при отсутствии возбуждения. Пусть  $P$  обозначает вероятность замыкания в обоих случаях. Тогда в возбужденном состоянии реле  $P -$

вероятность его безотказной работы; если эта вероятность больше  $P_0$ , то надежность схемы в этом случае выше надежности отдельного реле. При отсутствии возбуждения  $P$  будет, очевидно, вероятностью отказа, так как в этом случае не должно быть замыкания контактов. Поэтому, если эта вероятность меньше  $P_0$ , то отказ схемы в этом случае будет происходить с меньшей вероятностью, чем отказ отдельного реле, вследствие чего надежность схемы будет также выше надежности реле.

Если из элементов с некоторой вероятностью безотказной работы составить схему, повышающую надежность, а затем из нескольких таких схем, употребляемых в качестве блоков, построить подобную же схему, то повторение такого построения позволит, очевидно, получить вероятность безотказной работы системы, сколь угодно близкую к единице [30]. Такой способ составления схем называют итерацией, т. е. подстановкой одной схемы в другую. Имея кривую зависимости  $P_c(P_3)$  для рассматриваемой схемы, легко получить графически результат любой по порядку итерации [10]. Пусть, например, вероятность безотказной работы элементов, из которых строится система, равна  $P_1$ . По кривой  $P_c(P_3)$  находим, что вероятность безотказной работы схемы, составленной из таких элементов, будет равна  $P_{c2}$ , причем  $P_{c2} > P_1$ , если  $P_1 > P_2$  (рис. 5.19). Следующая итерация повышает вероятность безотказной работы получаемой системы до  $P_{c3}$  и т. д. Это

будет, однако, достижимо лишь при условии применимости формулы (2.29), т. е. в случае, когда износ существенно не влияет на характеристики блоков. Практически этого не бывает, что ограничивает возможность рассмотренного метода повышения надежности.

Допустим (для примера), что элементы некоторого типа характеризуются вероятностью безотказной работы  $P_3 = 0,7$ , которую

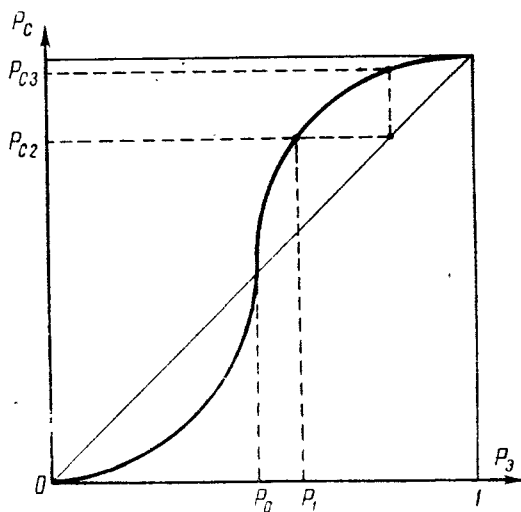


Рис. 5.19. Графическое определение увеличения вероятности безотказной работы системы способом итерации

при определенных условиях можно считать постоянной. Построим из этих элементов блок по схеме, приведенной на рис. 2.6, действующий, предположим, так же, как единственный элемент. Вероятность безотказной работы такого блока, по формуле (2.34):

$$P_c(t) = 2 \cdot 0,7^2 (1 + 0,7 - 2,5 \cdot 0,7^2 + 0,7^3) \approx 0,80.$$

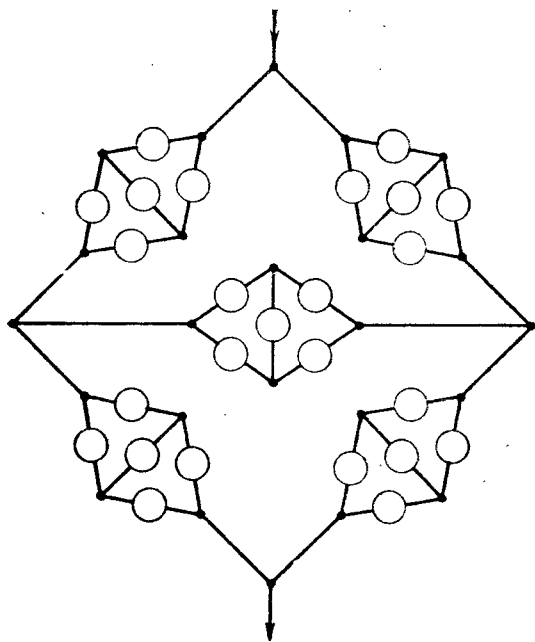


Рис. 5.20. Итерация мостовой схемы, изображенной на рис. 2.6

Составим теперь по той же схеме (рис. 2.6) систему из таких блоков (рис. 5.20). Вероятность безотказной работы системы, приведенной на рис. 5.20, вычисляется по формуле (2.34) при  $P_s = 0,8$ :

$$P_c(t) = 2 \cdot 0,8^2 (1 + 0,8 - 2,5 \cdot 0,8^2 + 0,8^3) \approx 0,91.$$

Составляя более сложную систему по той же схеме (рис. 2.6), блоками которой будут системы предыдущего вида (рис. 5.20), получим дальнейшее приближение вероятности безотказной работы к единице.

Практически применяемые элементы АУС должны быть высоконадежными. Поэтому вероятность  $P_s$  их безотказной работы должна быть близка к единице, а иногда и нулю (у элементов релейного типа). В таких случаях задача итерации будет решаться на участках характеристики  $P_c(P_s)$ , определяемых шириной (когда  $P_s$  близка к 1) и длиной (когда  $P_s \approx 0$ ) схемы. Например, для только что рассмотренной схемы (рис. 2.6)  $L = W = 2$ ;  $A_L = A_W = 2$ . Следовательно, при  $P_s \approx 1$

$$P_c(t) \approx 1 - 2(1 - P_s)^2.$$

Таким образом, для высокой надежности релейных и подобных им схем требуется, чтобы вероятность  $P_c(t)$  имела значения, близкие к нулю и единице. По характеристике



$P_c(P_3)$  (рис. 5.18) при таких значениях  $P_c$  соответственно близки к нулю и единице значения  $P_3$ . Следовательно, вблизи нуля вид функции  $P_c(P_3)$  определяется первым ненулевым членом (2.29), приблизительно равным  $A_L P_3^L$ . Из (2.32) также следует, что вблизи единицы вид функции  $P_c(P_3)$  приблизительно определяется выражением

$$1 - B_W Q_3^W.$$

Здесь  $L$  и  $W$  — длина и ширина схемы (§ 2.2). Предыдущий результат получается с достаточной точностью: при  $P_3 = 0,8$

$$P_c(t) \approx 1 - 2(1 - 0,8)^2 = 0,92.$$

Необходимо, однако, отметить, что замена некоторых элементов более надежными блоками, построенными посредством итерации, может вызвать ошибки, которых не было до замены, если, например, усложнение схемы изменяет время передачи сигналов.

Методы синтеза для подобных схем развили фон Нейман [30], а для релейных систем — Мур и Шеннон [10, 104].

В применении к релейным схемам изложенные методы повышения надежности основаны на предположении, что реле являются идеальными переключателями. Под идеальным переключателем понимается четырехполюсник, у которого сопротивление изоляции между управляющей и коммутируемой цепями бесконечно, а сопротивление коммутируемой цепи изменяется от бесконечности до нуля при замыкании и от нуля до бесконечности — при размыкании.

Практически такая идеализация оказывается допустимой лишь в случае применения электромеханических реле и криотронов и обычно не подходит для полупроводниковых диодов и триодов, а также фотосопротивлений, работающих в «ключевом» режиме.

На рис. 5.21, а показана релейная схема, а на рис. 5.21 б, в, г — три различных схемы на полупроводниковых элементах, которые могут применяться для управления величиной сопротивления между точками А и В. Структура этих схем одна и та же, но соотношения, полученные для одной из них, могут быть применены для анализа другой только с учетом особенностей соответствующих элементов.

В схемах, где применяются электромеханические реле и фотосопротивления, цепи коммутации и управления полностью разделены. В диодном выключателе эти цепи полностью совмещены, а в триодном — взаимодействуют через общие сопротивления. Наличие связи между цепями управления и коммутации не позволяет непосредственно распространять правила итерации на такие схемы.

Кроме того, коммутирующие элементы в этих схемах имеют весьма различные характеристики. Если контакты электромеханического реле возможно рассматривать практически как идеальный выключатель, то полупроводниковые элементы в состоянии «включено» вносят в коммутируемую

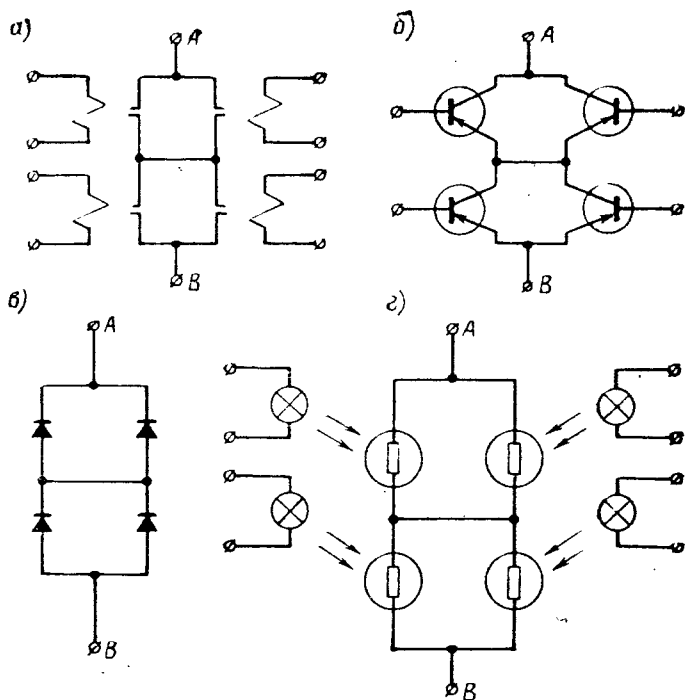


Рис. 5.21. Схемы резервирования переключателей:  
 а) релейная, б) транзисторная, в) диодная, г) на фотосопротивлениях

цепь заметно отличное от нуля, а в состоянии «выключено» заметно отличающееся от бесконечности сопротивление. Полупроводниковые элементы не обеспечивают ни полного включения, ни полного размыкания. Этот недостаток проявляется особенно заметно у фотосопротивлений.

Осуществляя резервирование таких несовершенных переключателей, необходимо учитывать их реальные характеристики. Так, в случае увеличения потерь мощности в схеме, обусловленных применением несовершенных переключателей, требуется ввести дополнительные усилители, что снизит уровень надежности, достигаемый резервированием.

Несмотря на указанные ограничения, в ряде случаев удастся успешно применять рассмотренные выше методы резервирования и к схемам на полупроводниковых элементах. На рис. 5.22 показаны две возможные схемы резервирования полупроводниковых триодов. Схема, изображенная на рис. 5.22, *а*, наиболее эффективна для триодов, отказы которых возникают чаще при переходе в состояние «выключено», а схема, представленная на рис. 5.22, *б*, — при переходе в со-

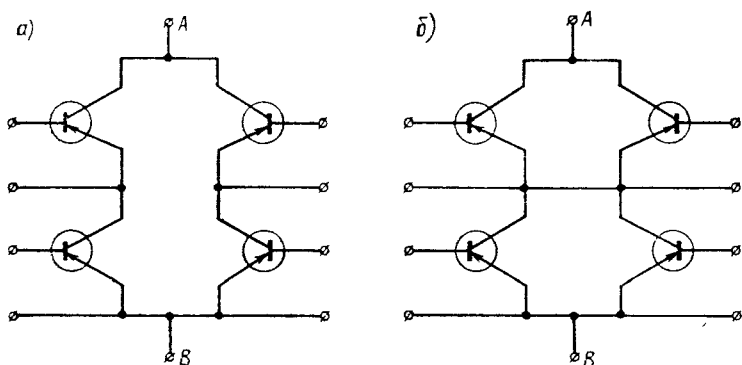


Рис. 5.22. Схемы резервирования транзисторных переключателей:

*а)* вероятность короткого замыкания больше вероятности обрыва, *б)* вероятность обрыва больше вероятности короткого замыкания

стояние «включено» [46]. В первом случае отказы вызываются коротким замыканием, а во втором — обрывом цепи.

Для резервирования по схеме, показанной на рис. 5.22, потребуется примерно четырехкратное увеличение мощности источников питания. Однако это увеличение мощности, незначительное по абсолютному значению, не является большим недостатком, если достигается существенное увеличение надежности схемы.

Резервирование можно вводить и для увеличения надежности промежуточных соединений. Пусть два проводника должны быть соединены в точке 1 (рис. 5.23). Это соединение может быть резервировано одной (*а*) или двумя (*б*) проводящими связками. Вероятность контакта двух проводников при резервировании одной связкой по формуле (2.29) будет

$$P_k = P_3 + P_3^2 - P_3^3,$$

где  $P_3$  — вероятность контакта в каждой из точек 1, 2, 3.

Применение двух связей дает (по той же формуле)

$$P_k = P_s + 2P_s^2 - 2P_s^3 - 2P_s^4 + P_s^5.$$

Увеличение надежности соединения проводников добавлением связей иллюстрируется рис. 5.24.

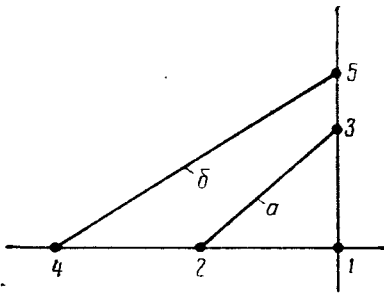


Рис. 5.23. Резервирование контакта между двумя проводниками

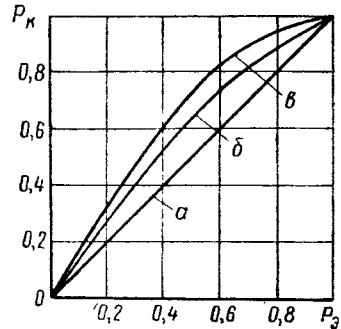


Рис. 5.24. Вероятность контакта:

а) без связей, б) при одной связи, в) при двух связях

### § 5.10. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

Возможность случайных ошибок в системах обработки информации, например, в вычислительных машинах, может быть значительно уменьшена применением резервирования, особенно если система обладает способностью самонастройки, непрерывно исключая из функционирования узлы, которые наиболее приближаются к состоянию отказа.

Известны различные схемы, обеспечивающие повышение надежности сложных систем обработки информации [46, 47]. При обработке двоичной информации для выработки правильных сигналов в любой точке резервированной системы можно применять анализатор по большинству, предложенной фон Нейманом (§ 5.1), если обеспечивать правильность его сигналов. Возможно применять одну или более резервных вычислительных машин, остающихся бездействующими, но готовых к работе, а также независимо работающих машин с переключением выходов, обеспечивающим получение информации от безотказно работающей машины.

Выбор способа резервирования в каждом конкретном случае зависит от вида резервируемых и переключающих элементов.

Если в структуре машины имеется большое количество логических элементов, а переключающих элементов приме-

няется мало, то последние можно принять за идеальные, так как их влияние на работу машины будет невелико.

В простейшем случае резервного соединения двух равнонадежных логических элементов  $L$  с помощью одного идеального переключателя  $\Pi$  (рис. 5.25) вероятность безотказной работы, в соответствии с (2.22),

$$P_c = 1 - (1 - P_s)^2,$$

где  $P_s$  — вероятность безотказной работы логических элементов.

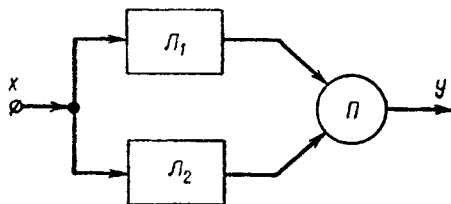


Рис. 5.25. Резервное соединение двух логических элементов

Для основного соединения  $n$  блоков, состоящих из  $m$  резервно соединенных логических элементов с идеальными

переключателями в каждом блоке (рис. 5.26), вероятность безотказной работы выражается формулой (5.11).

Другой вариант резервирования группы  $n$  элементов, находящихся в основном соединении, в котором применяется идеальный переключающий элемент, показан на рис. 5.27.

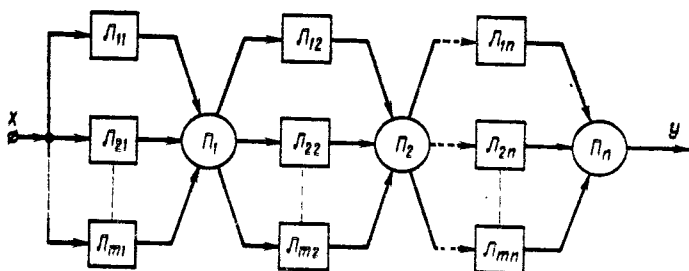


Рис. 5.26. Основное соединение  $n$  блоков, состоящих из  $m$  резервно соединенных логических элементов

Для этой схемы вероятность безотказной работы выражается формулой (5.10).

Сравнивая выражения (5.11) и (5.10), можно видеть, что структура, показанная на рис. 5.26, более эффективна при принятых условиях, чем структура, изображенная на рис. 5.27, поскольку в первой при отказе нескольких элементов не будет иметь места отказ всей системы. Здесь будут проявляться преимущества отдельного резервирования перед блочным (§ 5.3).

В системах с резервными цифровыми элементами вероятность безотказной работы может быть получена сколь угодно близкой к единице с помощью так называемых восстанавливающих органов (ВО). Такой орган получает информацию от многих малонадежных элементов, находящихся в резервном соединении, и дает возможность правильно управлять элементами, получающими информацию от него [30].

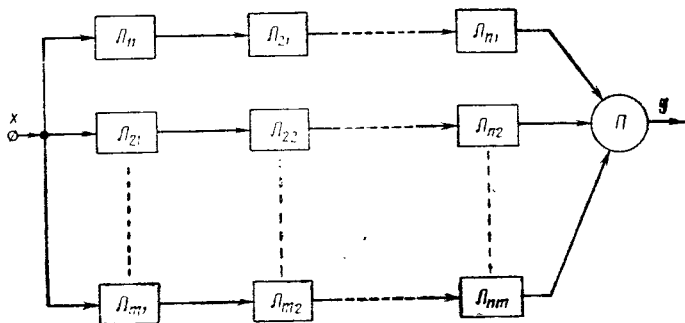


Рис. 5.27. Резервное соединение  $m$  систем из  $n$  логических элементов

В случае резервирования по схеме, изображенной на рис. 5.26, ВО занимают места переключателей. Пример схемы ВО показан на рис. 5.28. Если  $m = 3$ , то ВО должен иметь порог

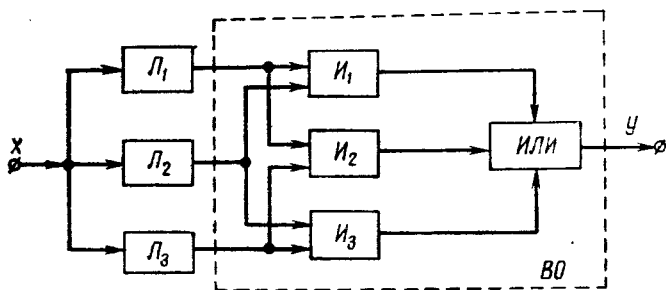


Рис. 5.28. Пример схемы восстанавливающего органа

срабатывания, равный двум. На выходе такого восстанавливающего органа будет правильный сигнал, если будут действовать безотказно не меньше двух логических элементов. Вероятность безотказной работы такой системы ( $m = 3$ ) при

восстанавливающим органе, обладающем надежностью идеального переключателя, на основании (2.29),

$$P_c = P_3^2 (3 - 2P_3). \quad (5.76)$$

Для системы, состоящей из  $n$  таких частей,

$$P_c = [P_3^2 (3 - 2P_3)]^n. \quad (5.77)$$

При  $n = 100$ ,  $P_3 = 0,99$  вероятность безотказной работы системы  $P_c = 0,97$ , тогда как у основного соединения 100 таких же элементов

$$P_0 = 0,99^{100} = 0,37.$$

Для любого  $n$  при  $m = 3$

$$\frac{P_c}{P_0} = \frac{[P_3^2 (3 - 2P_3)]^n}{P_3^n} = P_3^2 (3 - 2P_3)^n. \quad (5.78)$$

На рис. 5.29 приведен график отношения (5.78), характеризующий надежность, обеспечиваемую введением в систему восстанавливающих органов, работающих по принципу выбора из большинства [47]. Интересно отметить, что даже в этом идеализированном случае вероятность безотказной работы системы не может быть увеличена за счет резервирования рассмотренного типа, если  $P_3 < 0,5$ .

В реальных системах вероятность безотказной работы восстанавливающего органа  $P_{BO} < 1$ . После введения  $P_{BO}$  в уравнение (5.77)

$$P_c = [P_{BO} P_3^2 (3 - 2P_3)]^n. \quad (5.79)$$

Полагая логические элементы и восстанавливающие органы равнонадежными, т. е.  $P_3 = P_{BO}$ , получим

$$P_c = [P_3^3 (3 - 2P_3)]^n,$$

а при идеальных ВО

$$P_c = P_3^n [P_3^2 (3 - 2P_3)]^n. \quad (5.80)$$

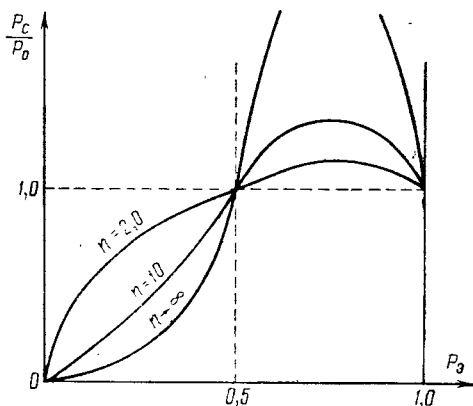


Рис. 5.29. Отношение вероятностей безотказной работы резервированной системы при  $m = 3$  и  $m = 1$

В последнем случае вероятность безотказной работы систем равна произведению таких же вероятностей, характеризующих системы с идеальными ВО (5.77) и без резервирования ( $P_0^n$ ). Так как вероятность безотказной работы систем с идеальными ВО всегда меньше единицы, при реальных ВО  $P_c$  никогда не может быть больше  $P_0$ , если вводить восстанавливающий орган после каждого блока резервно соединенных логических элементов (рис. 5.26). Если же вводить такие органы по схеме, изображенной на рис. 5.27, то можно подобрать такое оптимальное число восстанавливающих органов, при котором  $P_c > P_0$ .

Рассмотрим систему, резервированную с кратностью  $\lambda=2$ . Если имеется один ВО, то это является частным случаем системы, показанной на рис. 5.27, в которой  $m=3$ . Вводя в схему некоторое число  $r$  ВО и учтя, что на каждый ВО приходится  $3s$  элементов, где  $s=n/r$  (на рис. 5.26  $s=1$ , а на рис. 5.28  $s=n$ ), по формуле (5.7) имеем

$$P_c = [P_{\text{ВО}} P_0^{2s} (3 - 2P_0^s)]^{\frac{n}{s}}. \quad (5.81)$$

Для облегчения исследования примем, что  $P_{\text{ВО}} = P_0^x$ , где  $0 \leq x < \infty$ . Тогда

$$P_c = [P_0^{(2s+x)} (3 - 2P_0^s)]^{\frac{n}{s}}. \quad (5.82)$$

При изменении  $s$  вероятность (5.82) имеет максимум, когда

$$P_0^x = - \frac{2P_0^s}{(3 - P_0^s)^2 P_0^s}. \quad (5.83)$$

Найдя  $s$  из уравнения (5.83), можно затем определить и соответствующее значение  $P_c$ . При этом  $s$  следует округлить до ближайшего целого числа, при котором  $P_c$  будет иметь большее значение. В случае идеального ВО  $x=0$  и, вероятность  $P_c$  будет больше  $P_0$  при условии, что  $0,5 \leq P_0 < 1$ .

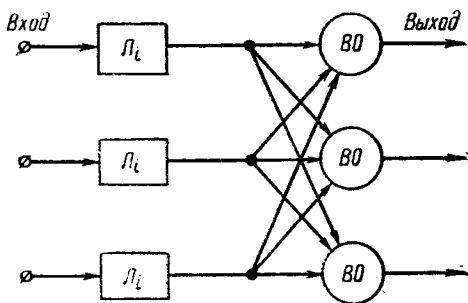


Рис. 5.30. Резервирование восстанавливающих органов

Чтобы повысить надежность системы, следует увеличить число ВО. Например, при  $m=3$  количество ВО утраивается, как показано на рис. 5.30. Это означает резервирование восстанавливающих органов. В такой системе ошибка может произойти только при отказе всех логических элементов блока.





Рассмотрим большую цифровую систему с резервируемыми элементами, в которой применены восстанавливающие органы, при  $s=1$  (рис. 5.34). Пусть  $l$  — полное число каскадов системы,  $m$  — число входных цепей к каждому восстанавливающему элементу,  $p$  — число безотказно действующих входных цепей ВО, при котором этот орган действует безотказно,  $P_i$  — вероятность того, что выходная цепь  $i$ -го кас-

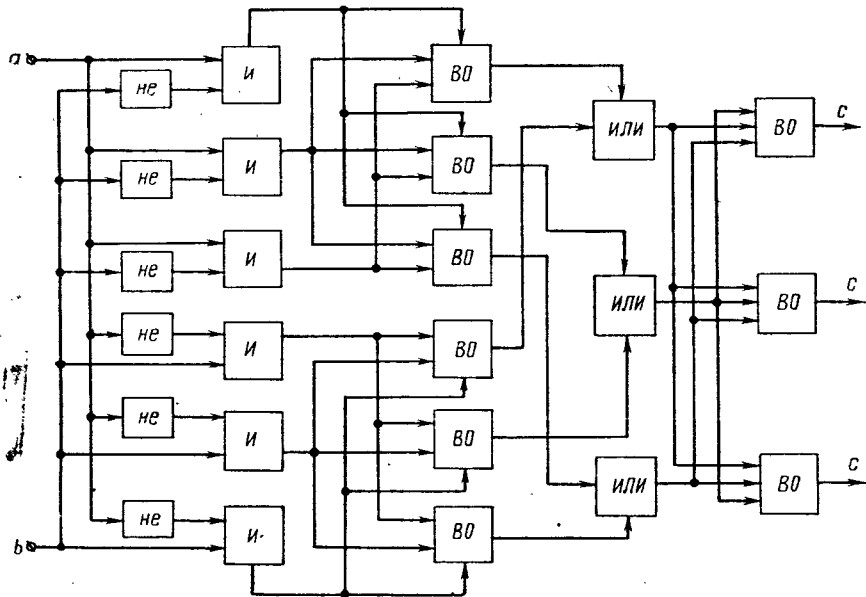


Рис. 5.33. Вариант резервирования схемы сравнения двоичных цифр.

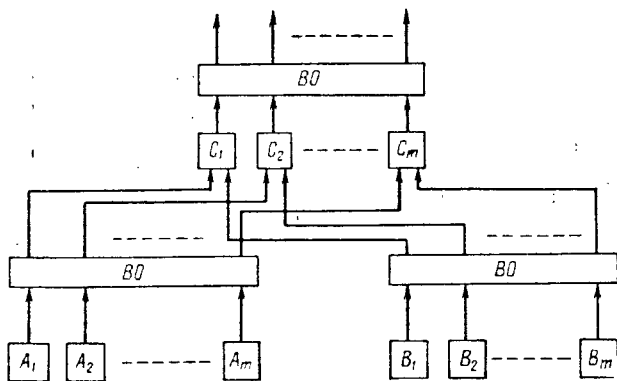


Рис. 5.34. Расположение восстанавливающего органа в резервированной схеме

када работает безотказно. Заметим, что значение  $p$  зависит от самонастройки. Без самонастройки, когда действует принцип выбора по большинству,  $p > \frac{m}{2}$ , причем  $m$  должно быть нечетным. В случае оптимальной самонастройки может быть так, что  $p = 1$ .

Самонастраивающиеся решающие элементы в резервированных системах, анализирующие состояние входных цепей во многих точках схемы, подобны автоматически действующему ремонтующему устройству. Они делают оптимальным использование остающихся элементов после автоматического отключения отказавших.

Тенденцией развития цифровых вычислительных и управляющих машин является разработка для них самонастраивающейся логики. Такой тип логики не имеет обычной жесткой структуры. Самонастраивающиеся логические системы обучают работе путем тренировок. Такие системы могут приспособляться к отказам своих собственных элементов.

Рассмотренные системы, содержащие восстанавливающие органы, являются переходными между обычными цифровыми системами с фиксированной логикой и системами, полностью самонастраивающимися.



## РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ АУС

## § 6.1. КОНСТРУКТИВНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Вследствие отклонений параметров реальных элементов АУС от номинальных или расчетных значений, принимаемых при проектировании системы, вероятность ее безотказной работы может оказаться меньше единицы уже в момент первого включения. Эта вероятность характеризует начальную, или конструктивную, надежность системы. Конструктивная надежность может быть оценена по известным допускам на параметры элементов системы. Ее определение является важнейшей задачей проектирования АУС. Если вероятность безотказной работы системы в момент включения значительно меньше единицы, то необходимо пересмотреть комплектующие детали, чтобы повысить конструктивную надежность.

При расчете конструктивной надежности проектируемой системы возможны два способа решения задачи: первый основан на определении многомерной вероятности реализации требуемых характеристик системы; второй — на оценке соответствия свойств системы заданному обобщенному функционалу [49]. Второй способ состоит в том, что (в отличие от первого) определяется вероятность соответствия АУС не всем ее характеристикам, а обобщающей характеристике — ее функционалу. Это упрощает решение задачи. Для АУС в качестве обобщенного функционала удобно рассматривать передаточную функцию  $W(p)$ . Если параметры системы отличаются от допустимых значений, то передаточная функция  $W_1(p)$ , соответствующая таким значениям параметров, отличается от  $W(p)$  — это указывает на то, что система ненадежна.

В тех случаях, когда можно применять преобразования Фурье [50], удобно перейти от изображений по Лапласу к изображениям по Фурье. В этом случае передаточная функция заменяется частотной характеристикой  $W(i\omega)$ , которая и будет обобщенным функционалом. При этом, во-первых, представляется возможным оценивать амплитудную и фазо-

вую надежность, и, во-вторых, существенно упростить расчеты, исключая из них переход от изображений к оригиналам. Необходимо лишь найти вещественную и мнимую части частотной характеристики:

$$W(i\omega) = R(\omega) + iI(\omega),$$

ее модуль

$$M(i\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} \quad (6.1)$$

и аргумент

$$A(i\omega) = \arctg \frac{I(\omega)}{R(\omega)}. \quad (6.2)$$

Особый интерес для многих АУС представляет гармоническое внешнее воздействие. В качестве примера произведем расчет конструктивной надежности следящей системы, показанной на рис. 6.1, предполагая, что гармоническое воздействие имеет частоту  $\omega$ . Пусть параметры элементов системы имеют следующие номинальные значения: передаточный коэффициент сельсинного преобразующего устройства  $K_c = 1$  в/град; машинная постоянная двигателя  $C_e = 0,32$  в·сек/рад; электро-механическая постоянная времени двигателя  $T_m = 0,07$  сек; передаточное число редуктора  $j = 276$ ; коэффициент усиления лампового усилителя  $K_y = 11\,500$ , передаточный коэффициент  $T$ -образного корректирующего контура  $K_k = 0,015$ ; постоянная времени контура  $T_k = 0,04$  сек.

Рассмотрим прежде всего систему в разомкнутом состоянии. В этом случае ее передаточную функцию можно записать в виде [51]:

$$W(p) = \frac{D(1 + T_k p)}{(1 + T_m p)p},$$

где

$$D = \frac{K_c K_k K_y}{C_e j}.$$

Воспользовавшись выражением частотной характеристики разомкнутой системы

$$W(i\omega) = \frac{D \left( T_k + \frac{1}{i\omega} \right)}{1 + T_m i\omega}, \quad (6.3)$$

вычислим ее модуль

$$M(\omega) = \frac{D}{\omega} \sqrt{\frac{1 + T_k^2 \omega^2}{1 + T_m^2 \omega^2}}, \quad (6.4)$$

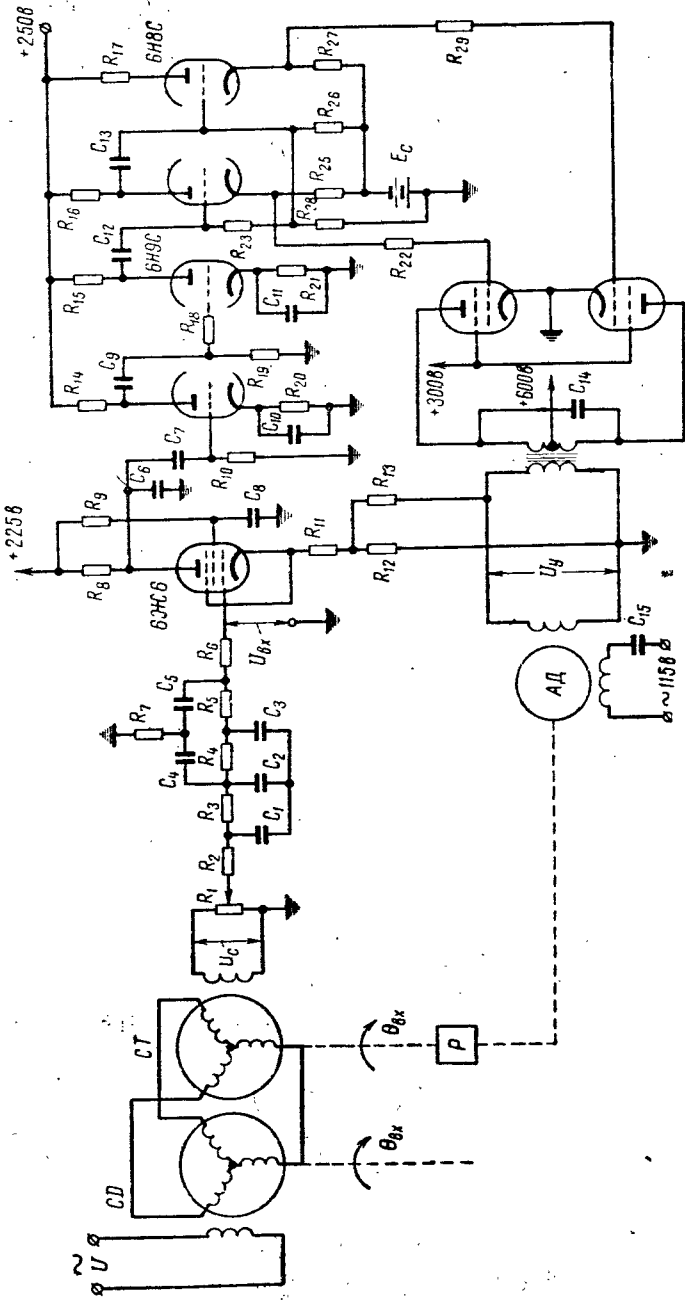


Рис. 6.1. Пример принципиальной схемы следящей системы

и аргумент

$$A(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{T_k T_M \omega^2 + 1}{(T_k - T_M) \omega}. \quad (6.5)$$

Установим теперь допуск на параметры системы. Ошибки сельсинов лежат обычно в пределах, позволяющих принять  $\delta k_c = \pm 0,25\%$ . Для точной работы корректирующей цепи, а именно для того, чтобы выдержать угловую частоту с точностью  $\pm 5\%$ , ширину частотного диапазона с точностью  $\pm 2\%$ , фазовый сдвиг не более  $\pm 10^\circ$ , все элементы  $T$ -образной цепи должны быть изготовлены с допусками, не превышающими  $\pm 0,5\%$  [52]. На этом основании примем  $\delta k_k = \pm 0,5\%$ ,  $\delta T_k = \pm 0,5\%$ . Будем считать, что колебания коэффициента усиления из-за наличия местной отрицательной обратной связи не превышают  $\delta k_y = \pm 10\%$  (обычно в ламповых усилителях следящих систем обеспечивают запас по усилению 30–40%), а несущая частота  $f = 50$  гц стабилизирована с точностью  $\delta \omega = \pm 5\%$ . Для двухфазных асинхронных двигателей обычными являются значения  $\delta C_e = \pm 3\%$ ;  $\delta T_M = \pm 5\%$ . Полагая, что передаточное число  $j$  реализуется точной кинематической цепью, примем  $\delta j = \pm 0,1\%$ . Будем считать также, что пределы изменения питающих напряжений незначительны и нормальный режим соответствующих звеньев системы не нарушается.

Из уравнения (6.4) имеем:

$$\begin{aligned} \Delta M = & \frac{\partial M}{\partial k_c} \Delta k_c + \frac{\partial M}{\partial k_k} \Delta k_k + \frac{\partial M}{\partial k_y} \Delta k_y + \frac{\partial M}{\partial C_e} \Delta C_e + \\ & + \frac{\partial M}{\partial j} \Delta j + \frac{\partial M}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial M}{\partial T_k} \Delta T_k + \frac{\partial M}{\partial T_M} \Delta T_M. \end{aligned} \quad (6.6)$$

В это выражение входят абсолютные значения отклонений параметров. Поскольку предельные допуски на параметры элементов заданы в процентах, удобнее привести (6.6) к виду, определяющему связь между относительными отклонениями. После вычисления частных производных и соответствующих преобразований получим

$$\begin{aligned} \delta M = & \delta k_c + \delta k_k + \delta k_y - \delta C_e - \delta j - \delta \omega \frac{1 + T_k^2 T_M^2 \omega^4}{(1 + T_k^2 \omega^2)(1 + T_M^2 \omega^2)} + \\ & + \delta T_k \frac{T_k^2 \omega^2}{1 + T_k^2 \omega^2} - \delta T_M \frac{T_M^2 \omega^2}{1 + T_M^2 \omega^2}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

где  $\delta M = \frac{\Delta M}{M}$  и т. п.

Подставляя в (6.7) соответствующие значения параметров и их вариаций, найдем

$$\delta M_{\text{макс}} = \pm 22,35\%.$$

Положим, что модуль частотной характеристики, изменяющийся в зависимости от вариаций параметров системы, должен находиться в пределах допуска  $\delta M_{\text{доп}} = \pm 5\%$ . Тогда, зная предел вариаций величины  $\delta M$ , нетрудно найти вероятность того, что при заданных вариациях параметров величина  $\delta M$  останется в указанных пределах. Имеются все условия, чтобы считать, что  $\delta M$  подчиняется нормальному распределению. Тогда искомая вероятность

$$P\{\delta M < \delta M_{\text{доп}}\} = \Phi\left(\frac{\delta M - \delta \bar{M}}{\sigma}\right), \quad (6.8)$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа;

$\delta \bar{M}$  — среднее значение;

$\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

В рассматриваемом случае, когда распределение  $\delta M$  ограничено значениями  $\delta M_{\text{макс}}$ , среднее значение можно определить по приближенной формуле

$$\delta \bar{M} = \frac{\delta M_{\text{макс}} - \delta M_{\text{мин}}}{2}, \quad (6.9)$$

откуда

$$\delta \bar{M} = \frac{22,35 - 22,35}{2} = 0.$$

На основании правила, по которому

$$P\{|\varepsilon - \bar{\varepsilon}| < 3\sigma\} = 0,9973,$$

при определении  $\sigma_M$  также можно воспользоваться приближенным соотношением

$$\sigma_M = \frac{\sigma M_{\text{макс}} + \delta M_{\text{мин}}}{6}. \quad (6.10)$$

откуда

$$\sigma_M = \frac{22,35 + 22,35}{6} = 7,43\%.$$

Из (6.8) находим, что амплитудная надежность разомкнутой системы характеризуется вероятностью

$$P_{\text{мр}} = \Phi(0,672) = 0,498.$$

Это значение подтверждается опытом [49] и является вероятностью того, что при первом включении системы ее ампли-



тудная характеристика не будет отличаться от расчетной более, чем на  $\pm 5\%$ .

Полученный результат не вызывает сомнений. Известно, что надежность основной системы не может превышать надежности наименее надежного элемента. Наименее надежным звеном рассматриваемой системы является ламповый усилитель. Пользуясь приведенными здесь соотношениями, легко показать, что вероятность безотказной работы лампового усилителя не превышает 0,6, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Для определения фазовой надежности системы воспользуемся выражением (6.5). Тогда

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial A}{\partial T_k} \Delta T_k + \frac{\partial A}{\partial T_m} \Delta T_m. \quad (6.11)$$

или

$$\Delta A = \frac{(T_k - T_m)(T_k T_m \omega^2 - 1)}{(T_m^2 \omega^2 + 1)(T_k^2 \omega^2 + 1)} \Delta \omega - \frac{\omega}{T_k^2 \omega^2 + 1} \Delta T_k + \frac{\omega}{T_m^2 \omega^2 + 1} \Delta T_m.$$

Далее, находим

$$\delta A = \frac{1}{\operatorname{arctg} \frac{T_k T_m \omega^2 + 1}{(T_k - T_m) \omega}} \left[ \frac{(T_k - T_m)(T_k T_m \omega^2 - 1) \omega}{(T_m^2 \omega^2 + 1)(T_k^2 \omega^2 + 1)} \delta \omega - \frac{T_k \omega}{T_k^2 \omega^2 + 1} \delta T_k + \frac{T_m \omega}{T_m^2 \omega^2 + 1} \delta T_m \right]. \quad (6.12)$$

Подставляя в (6.12) значения параметров и предельные их вариации, получим

$$\delta A_{\max} = \pm 0,28\%.$$

Система будет безотказно работать, если при всех возможных изменениях параметров  $\delta A_{\max} < \delta A_{\text{доп}}$ . Стабильность фазовой характеристики рассматриваемой системы будет определяться главным образом фазовой стабильностью лампового усилителя. Положив для усилителя  $\delta A_{\text{доп}} = 0,5^\circ$  [53] и определив из (6.5)  $A_{\text{ном}} = -88^\circ$ , получим

$$\delta A_{\text{доп}} = 0,57\%.$$

Далее, аналогично (6.9) и (6.10), находим

$$\begin{aligned} \delta \bar{A} &= 0, \\ \sigma_{Ap} &= \frac{0,28 + 0,28}{6} = 0,093\%. \end{aligned}$$

Тогда фазовая надежность системы характеризуется вероятностью

$$P_{Ap} = \Phi\left(\frac{\delta A_{\text{доп}}}{\sigma_{Ap}}\right) = \Phi(6,1) = 1.$$

Это вероятность того, что при первом включении системы ее фазовая характеристика не будет отличаться от расчетной более чем на  $\pm 0,57\%$ .

Полученный результат не является неожиданным и хорошо согласуется с практикой. Известно, что в подобной схеме отклонение параметров усилительных каскадов или несущей частоты сигнала от номинальных значений не вызывает существенного изменения фазы [52, 53].

Перейдем к расчету надежности той же системы в замкнутом состоянии, когда ее передаточная функция

$$W_3(p) = \frac{D(1 + T_K p)}{T_M p^2 + (1 + DT_K)p + D},$$

а частотная характеристика

$$W_3(i\omega) = \frac{D - DT_K i\omega}{D - T_M \omega^2 + (1 + DT_K) i\omega}. \quad (6.13)$$

Модуль частотной характеристики

$$M_3(\omega) = \sqrt{\frac{k_c^2 k_K^2 k_Y^2 (1 + T_K^2 \omega^2)}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_K^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e j (1 + T_M^2 \omega^2)}}, \quad (6.14)$$

а аргумент

$$A_3(\omega) = \text{arctg} \frac{(1 + 2T_K D) \omega - T_M T_K \omega^2}{D + (T_K - T_M) \omega^2 + T_K^2 D \omega^2}. \quad (6.15)$$

Из формулы (6.14) получим

$$\begin{aligned} \Delta M_3 = & \frac{\partial M_3}{\partial k_c} \Delta k_c + \frac{\partial M_3}{\partial k_K} \Delta k_K + \frac{\partial M_3}{\partial k_Y} \Delta k_Y + \frac{\partial M_3}{\partial C_e} \Delta C_e + \\ & + \frac{\partial M_3}{\partial j} \Delta j + \frac{\partial M_3}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial M_3}{\partial T_K} \Delta T_K + \frac{\partial M_3}{\partial T_M} \Delta T_M. \end{aligned} \quad (6.16)$$

Производя над (6.16) необходимые преобразования, получим

$$\begin{aligned}
 \partial M_3 = & \left[ \frac{T_K^2 \omega^2}{1 + T_K^2 \omega^2} - \right. \\
 & \left. \frac{k_c^2 k_R^2 k_Y^2 T_K^2 \omega^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + C_e j^2 \omega^2 + 2C_e^2 j^2 T_M^2 \omega^4}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)} \right] \delta \omega + \\
 & + \left[ \frac{T_K^2 \omega^2}{1 + T_K^2 \omega^2} - \right. \\
 & \left. \frac{T_K^2 k_c^2 k_R^2 k_Y^2 \omega^2 + C_e j k_c k_K k_Y T_K \omega^2}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)} \right] \times \\
 & \times \delta T_K + \\
 & + \left[ \frac{\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y - T_M^2 \omega^4 C_e^2 j^2}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)} \right] \delta T_M - \\
 & - \left[ \frac{\omega^2 j C_e k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)} \right] \times \\
 & \times (\delta C_e - \delta j) + \\
 & + \left[ 1 - \frac{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + \omega^2 C_e^2 j k_c k_K k_Y (T_K - T_M)}{(1 + T_K^2 \omega^2) k_c^2 k_R^2 k_Y^2 + 2\omega^2 C_e j k_c k_K k_Y (T_K - T_M) + \omega^2 C_e^2 j^2 (1 + T_M^2 \omega^2)} \right] \times \\
 & \times (\delta k_c + \delta k_K + \delta k_Y). \quad (6.17)
 \end{aligned}$$

Подставляя в (6.17) значения параметров и их вариации, находим

$$\partial M_3 = \pm 20,4\%.$$

Определив по (6.10)

$$\sigma_{M_3} = \frac{20,4 + 20,4}{6} = 6,8\%,$$

на основании (6.8) при заданной ранее величине  $\delta M_{\text{доп}} = \pm 5\%$  получим характеристику амплитудной надежности замкнутой системы:

$$P_{M_3} = \Phi(0,735) = 0,538.$$

Это значение надежности также подтверждается опытом [49].

Сравнивая значения  $P_{M_p}$  и  $P_{M_3}$ , видим, что надежность замкнутой системы оказывается выше надежности разомкнутой. Это можно объяснить известными стабилизирующими воздействиями отрицательной обратной связи на систему. Повышение надежности замкнутой системы по сравнению с

разомкнутой невелико, так как охват всей системы отрицательной обратной связью мало сказывается на повышении надежности наименее надежного элемента — лампового усилителя. Также можно убедиться и в повышении фазовой надежности замкнутой системы по сравнению с разомкнутой.

Полученные выше значения  $P_{Mr}$  и  $P_{Mz}$  относятся к началу работы системы. Значительное отличие их от единицы указывает на необходимость применения элементов с меньшими допусками или же необходимость регулировки передпуском. Имея зависимость допусков всех элементов от времени, можно подобным же образом получить  $P_{Mr}$  и  $P_{Mz}$  в функции времени. Другой пример расчета помещен в [105].

В том случае, когда рассматриваемая АУС является достаточно сложной, а ее передаточная функция чрезмерно громоздкой, необходимо прежде всего определить характеристики надежности отдельных звеньев, пользуясь их частотными характеристиками, а затем найти вероятность безотказной работы всей системы, исходя из ее структуры и формул, определяющих эту вероятность в зависимости от схемы соединения звеньев (§ 2.2).

В АУС, в состав которых входят элементы, подверженные неустойчивым отказам (§ 4.1), для расчета конструктивной надежности требуется применять специальные методы [59].

Изложенный метод обобщенного функционала, основанный на учете лишь предельных допусков на параметры элементов, дает возможность определять критерии надежности без исчерпывающих статистических сведений об элементах системы.

## § 6.2. СОСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АУС

Составление передаточных функций ряда элементов АУС не вызывает трудностей. Во многих случаях эти передаточные функции являются типовыми и заранее известными. К таким элементам не относятся, однако, электронные блоки разнообразного назначения, передаточные функции которых необходимы для расчета конструктивной надежности системы. Вследствие большой сложности электронных блоков АУС определение их передаточных функций связано с громоздкими вычислениями, при которых легко допустить ошибку [55].

Составление передаточных функций сложных четырехплюсников можно существенно упростить, а передаточную функцию выразить непосредственно через параметры элемен-



Перепишем систему уравнений (6.18) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1i} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2i} & \dots & -Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{i1} & -Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & -Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \dots & -Y_{ni} & \dots & -Y_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_i \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6.19)$$

или сокращенно

$$Y_{nn} U_n = I_n, \quad (6.20)$$

где  $Y_{nn}$  — квадратная матрица проводимостей порядка  $n$ ;  $U_n$  и  $I_n$  — матрицы-столбцы напряжения и тока.

Для определения узловых напряжений воспользуемся обратной матрицей проводимостей:

$$U_n = Y_{nn}^{-1} I_n, \quad (6.21)$$

или

$$U_n = \frac{\tilde{Y}_{nn}}{|Y|} I_n, \quad (6.22)$$

где  $\tilde{Y}_{nn}$  — взаимная матрица проводимостей, полученная заменой каждого элемента матрицы  $Y_{nn}$  его алгебраическим дополнением и последующим транспонированием;

$|Y|$  — определитель квадратной матрицы проводимостей.

Раскрывая выражение (6.22), например для  $i$ -го узла, получаем

$$U_i = \frac{I_1 |Y|_{1i} + I_2 |Y|_{2i} + \dots + I_k |Y|_{ki} + \dots + I_n |Y|_{ni}}{|Y|}, \quad (6.23)$$

где  $|Y|_{ki}$  — определители, взятые со знаком  $(-1)^{k+i}$  и полученные из  $|Y|$  вычеркиванием в нем  $k$ -й строки и  $i$ -го столбца.

В реальных четырехполюсниках, представляющих элементы АУС, все внешние токи  $I_k$ , кроме  $I_1$ , являются зависимыми токами, например электронных ламп; эти токи возможно выразить через сеточные напряжения. Поэтому ток  $I_n$  (матрица-столбец) в уравнении (6.22) попросту вырождается в ток  $I_1$ . Это обстоятельство дает возможность существенно упростить все последующие выводы. Так, формула (6.23) примет вид

$$U_i = \frac{|Y|_{1i} I_1}{|Y|}. \quad (6.24)$$

Напряжение между узлами  $i$  и  $j$  можно определить как разность напряжений между этими узлами и общим узлом:

$$U_{ij} = U_i - U_j = \frac{|Y|_{ii} I_i}{|Y|} - \frac{|Y|_{ij} I_i}{|Y|} = \frac{I_i (|Y|_{ii} - |Y|_{ij})}{|Y|}. \quad (6.25)$$

Пользуясь приемами операторного исчисления, для элементов АУС и эквивалентных им четырехполюсников можно составить систему изображающих уравнений вида (6.18) [58]. Повторяя изложенное выше для системы изображающих уравнений, получим выражение для напряжения  $i$ -го узла в следующем виде:

$$U_i(p) = \frac{|Y|_{ii}(p) I_i(p)}{|Y|(p)}. \quad (6.26)$$

Соответственно изображение напряжения между узлами

$$U_{ij}(p) = \frac{I_i(p) [ |Y|_{ii}(p) - |Y|_{ij}(p) ]}{|Y|(p)}. \quad (6.27)$$

В формулах (6.26) и (6.27)

$I_i(p)$ ;  $U_i(p)$  и  $U_{ij}(p)$  — изображения тока и узловых напряжений;

$|Y|(p)$ ;  $|Y|_{ii}(p)$  и  $|Y|_{ij}(p)$  — изображения определителей  $|Y|$ ,  $|Y|_{ii}$  и  $|Y|_{ij}$ .

Элементы систем и эквивалентные им четырехполюсники можно разделить в зависимости от расположения общего узла на четыре группы:

- 1) четырехполюсники с общим входным и выходным узлом (несимметричными входом и выходом);
- 2) четырехполюсники с общим узлом на входе (несимметричным входом и симметричным выходом);
- 3) четырехполюсники с общим узлом на выходе (симметричным входом и несимметричным выходом);
- 4) четырехполюсники с внутренним общим узлом (симметричными входом и выходом).

В зависимости от группы изменяются и способы определения передаточных функций четырехполюсников. Для элементов первой группы (рис. 6.3)

$$H_1(p) = \frac{U_m(p)}{U_1(p)} = \frac{I_1(p) |Y|_{im}(p)}{|Y|(p)} \times \frac{|Y|(p)}{I_1(p) |Y|_{ii}(p)} = \frac{|Y|_{im}(p)}{|Y|_{ii}(p)}; \quad (6.28)$$

второй (рис. 6.4) группы

$$H_2(p) = \frac{U_{mg}(p)}{U_1(p)} = \frac{I_1(p) [ |Y|_{1m}(p) - |Y|_{1g}(p) ]}{|Y|(p)} \times \\ \times \frac{|Y|(p)}{I_1(p) |Y|_{11}(p)} = \frac{|Y|_{1m}(p) - |Y|_{1g}(p)}{|Y|_{11}(p)}; \quad (6.29)$$

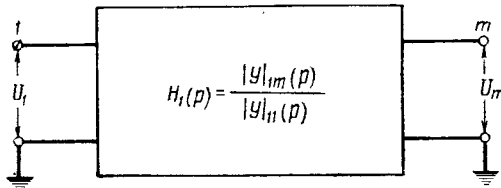


Рис. 6.3. Четырехполюсник с несимметричными входом и выходом

третьей (рис. 6.5) группы

$$H_3(p) = \frac{U_m(p)}{U_{1g}(p)} = \\ = \frac{I_1(p) |Y|_{1m}(p)}{|Y|(p)} \times$$

$$\times \frac{|Y|(p)}{I_1(p) [ |Y|_{11}(p) - |Y|_{1g}(p) ]} = \frac{Y_{1m}(p)}{|Y|_{11}(p) - |Y|_{1g}(p)}; \quad (6.30)$$

и, наконец, четвертой (рис. 6.6) —

$$H_4(p) = \frac{U_{mg}(p)}{U_{1g}(p)} = \frac{U_m(p) - U_g(p)}{U_1(p) - U_g(p)} = \\ = \frac{U_1(p) H'(p) - U_g H''(p)}{U_1(p) - U_g(p)} \quad (6.31)$$

Так как в последнем случае элементы плеч схемы расположены симметрично относительно общего заземленного узла, а их параметры одинаковы, то

$$H'(p) = H''(p) \\ H_4(p) = H_1(p) = \frac{|Y|_{1m}(p)}{|Y|_{11}(p)}. \quad (6.32)$$

В выражениях передаточных функций  $H_1(p)$ ,  $H_2(p)$ ,  $H_3(p)$  и  $H_4(p)$  определители  $|Y|_{1i}(p)$  при  $i = 1, 2, \dots, g, \dots, q$  и  $m$  взяты со знаком  $(-1)^{1+i}$  и получены из  $|Y|(p)$  вычеркиванием в нем первой строки и  $i$ -го столбца.

Порядок составления передаточной функции элементов АУС в соответствии с изложенным сводится к последовательному выполнению следующих операций: во-первых, исходная принципиальная электрическая схема элемента преобразуется в расчетную. При этом пассивные элементы исходной схемы, находящиеся между двумя смежными узлами, заменяются соответствующими проводимостями, а элементы активные, например, электронные лампы, — узлами с токами, опре-



деляемыми через сеточные напряжения [59]. Далее, на расчетную схему наносятся порядковые номера узлов. За общий узел принимается точка, имеющая потенциал земли (заземленная точка). Эти преобразования для типовых элементов схем иллюстрируются рис. 6.7 и 6.8.

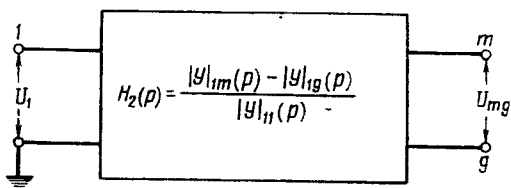


Рис. 6.4. Четырехполюсник с несимметричным входом и симметричным выходом

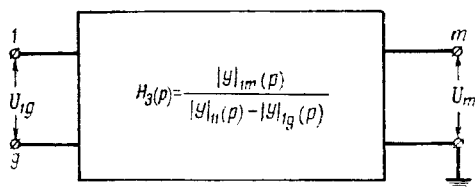


Рис. 6.5. Четырехполюсник с симметричным входом и несимметричным выходом

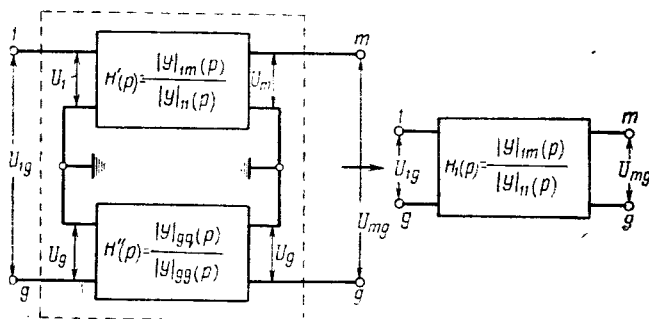


Рис. 6.6. Четырехполюсник с внутренним общим узлом

Далее, составляется сетка определителя квадратной матрицы из  $n$  строк и  $n$  столбцов, где  $n$  — число узлов в расчетной схеме четырехполюсника без общего узла. Индексы мест каждого элемента определителя  $|Y| (p)$  показаны на рис. 6.9.

Заполнение мест, например строки  $i$ -го узла, производится переносом из расчетной схемы значений собственной проводимости  $i$ -го узла на место с индексом  $ii$  и взаимных проводимостей этого узла, взятых со знаком минус, на остальные

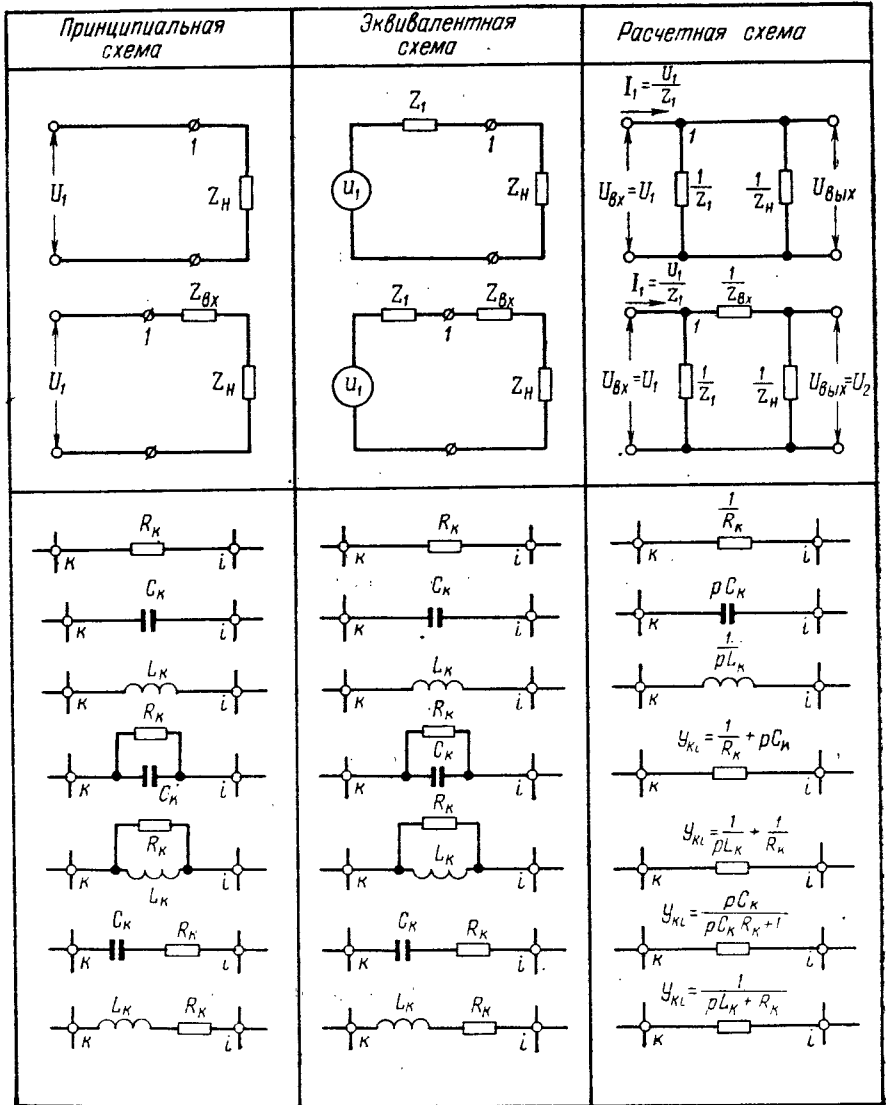


Рис. 6.7. Преобразования принципиальных схем из пассивных элементов в расчетные

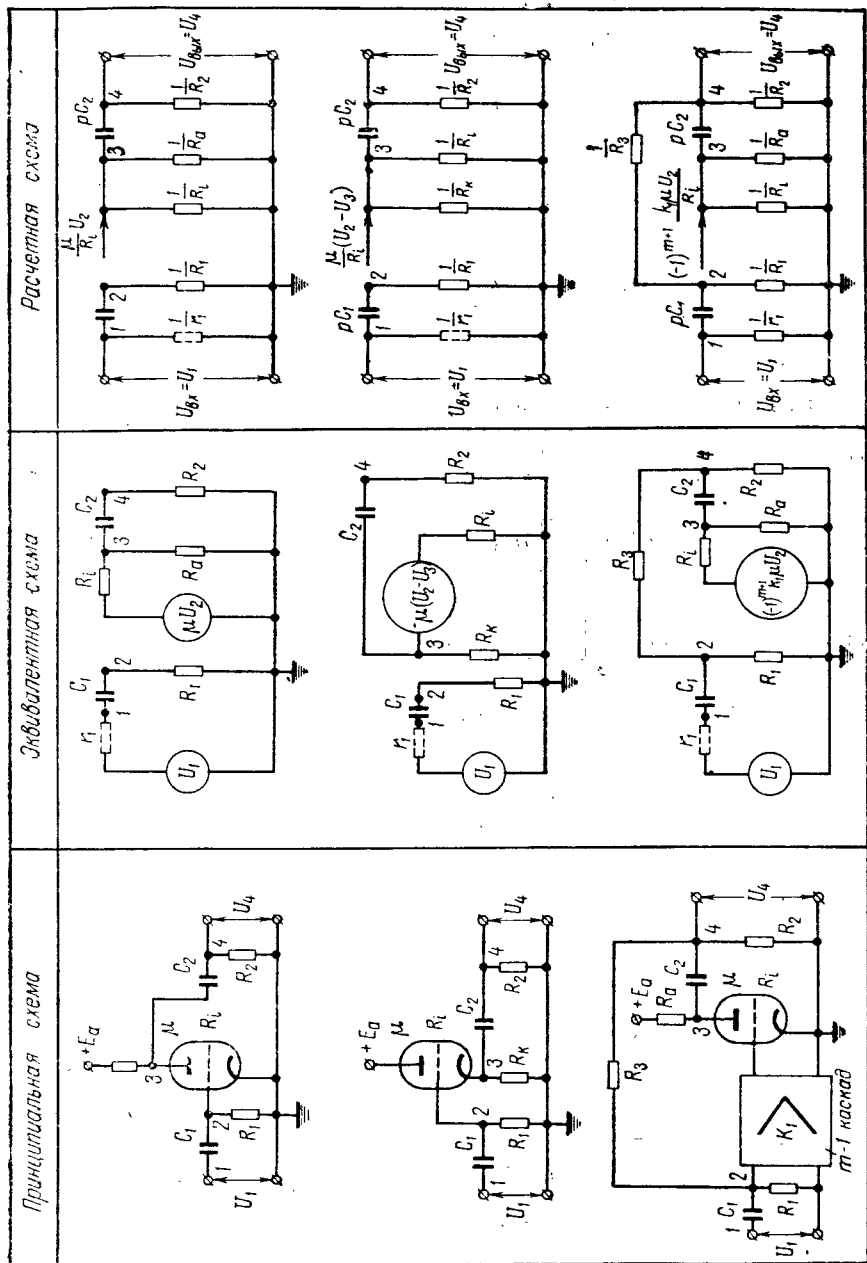


Рис. 6.8. Преобразования принципиальных схем из активных элементов в расчетные

соответствующие места. Проводимость, которая при умножении на сеточное напряжение  $U_j$  образует зависимый ток  $i$ -го узла, равна

$$(-1)^{m+1} \frac{k_1}{R_i} \mu,$$

где  $m$  — число каскадов усилителя;  
 $k_1$  — коэффициент усиления каскадов предварительного усиления (до выходного каскада).

Отношение к узлам

	1-му	2-му	...	$i$ -му	...	$n$ -му
Строка 1-го узла	$11$	$12$	...	$1i$	...	$1n$
Строка 2-го узла	$21$	$22$	...	$2i$	...	$2n$
...	...	...	...	...	...	...
Строка $i$ -го узла	$i1$	$i2$	...	$ii$	...	$in$
...	...	...	...	...	...	...
Строка $n$ -го узла	$n1$	$n2$	...	$ni$	...	$nn$

Рис. 6.9. К составлению определителя матрицы проводимости

Составление передаточной функции элемента можно считать законченным после раскрытия определителей числителя и знаменателя и приведения подобных членов.

Рассмотрим пример двойной  $T$ -образной  $RC$  — цепи. Преобразование этой цепи к расчетной схеме показано на рис. 6.12.

Она записывается без изменения знака на место  $i$ -го узла с индексом  $ij$ .

Пример заполнения определителя квадратной матрицы проводимостей по данным расчетной схемы активного четырехполюсника, показанного на рис. 6.10, приведен на рис. 6.11.

После того, как будет составлен определитель квадратной матрицы проводимостей  $|Y|(p)$ , из него, согласно формулам (6.28)–(6.31), необходимо составить частные определители вида  $|Y|_{ii}(p)$ .

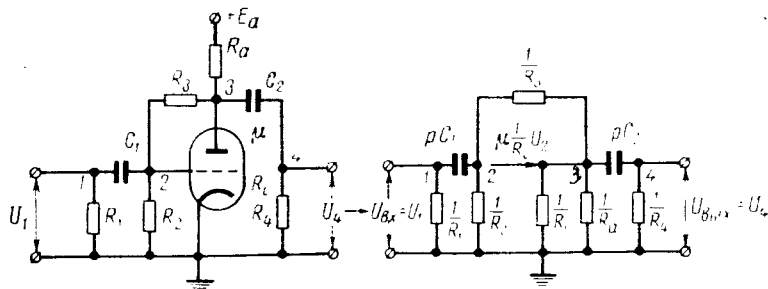


Рис. 6.10. Пример активного четырехполюсника и его расчетной схемы

Отношение к узлам

	1-му	2-му	3-му	4-му
Строка 1-го узла	$\frac{1}{R_1} + pC_1$	$-pC_1$	0	0
Строка 2-го узла	$-pC_1$	$\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + pC_1$	$-\frac{1}{R_3}$	0
Строка 3-го узла	0	$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}$	$\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + pC_2$	$-pC_2$
Строка 4-го узла	0	0	$-pC_2$	$\frac{1}{R_4} - pC_2$

Рис. 6.11. Определитель квадратной матрицы проводимостей по схеме, изображенной на рис. 6.10

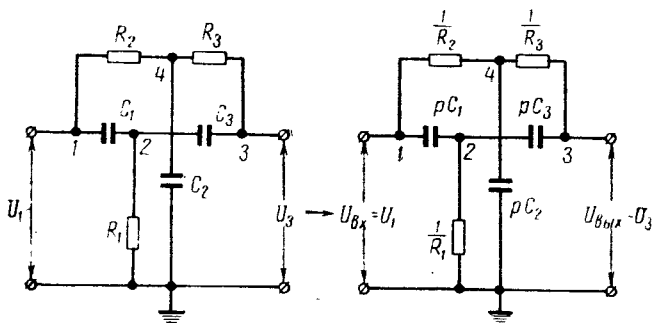


Рис. 6.12. Двойная Т-образная RC — цепь и ее расчетная схема

Заполнив сетку определителя квадратной матрицы, получаем

$$|Y(p)| = \begin{vmatrix} \frac{1}{R_2} + pC_1 & -pC_1 & 0 & -\frac{1}{R_2} \\ -pC_1 & \frac{1}{R_1} + pC_1 + pC_3 & -pC_3 & 0 \\ 0 & -pC_3 & \frac{1}{R_3} + pC_3 & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_2} & 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + pC_2 \end{vmatrix} \quad (6.33)$$

Далее, на основании формулы (6.28), находим

$$H(p) = \frac{U_3(p)}{U_1(p)} = \frac{|Y_{13}(p)|}{|Y_{11}(p)|}$$

где

$$|Y|_{13}(p) = \begin{vmatrix} -pC_1 & \frac{1}{R_1} + pC_1 + pC_3 & 0 \\ 0 & -pC_1 & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_2} & 0 & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + pC_2 \end{vmatrix}, \quad (6.34)$$

$$|Y|_{11}(p) = \begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + pC_1 + pC_3 & -pC_3 & 0 \\ -pC_3 & \frac{1}{R_3} + pC_3 & -\frac{1}{R_3} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + pC_2 \end{vmatrix}. \quad (6.35)$$

После вычисления определителей (6.34) и (6.35), приведения подобных членов и умножения числителя и знаменателя  $H(p)$  на  $R_1R_2R_3$ , получаем:

$$H(p) = \frac{T_1T_2T_3p^3 + T_1(S_2 + T_3)p^2 + (T_1 + S_1)p + 1}{T_1T_2T_3p^3 + (T_3 + S_2)p^2 + (T_1 + T_3 + S_1)p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + S_1 + S_2)p + 1}, \quad (6.36)$$

где

$$T_1 = R_1C_1, \quad T_2 = R_2C_2, \quad T_3 = R_3C_3, \quad S_1 = R_1C_3, \quad S_2 = R_2C_3.$$

В качестве второго примера рассмотрим определение передаточной функции симметричного (балансного) усилителя, принципиальная схема которого показана на рис. 6.13. Согласно формуле (6.32) передаточная функция такого усилителя может быть определена по одной симметричной его части, преобразованная расчетная схема которой приведена на рис. 6.14. Определитель квадратной матрицы для этой расчетной схемы имеет вид

$$|Y|(p) = \begin{vmatrix} pC_1 & -pC_1 & 0 & 0 \\ -pC_1 & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + pC_1 & -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_3} \\ 0 & -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + pC_2 & -\frac{1}{R_1} \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{vmatrix}. \quad (6.37)$$

Согласно (6.32) передаточная функция усилителя

$$H(p) = \frac{|Y_{14}(p)|}{|Y_{11}(p)|}, \quad (6.38)$$

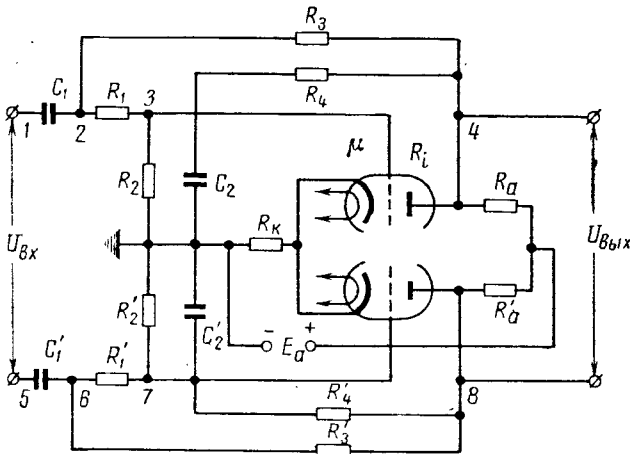


Рис. 6.13. Принципиальная схема симметричного (балансного) усилителя

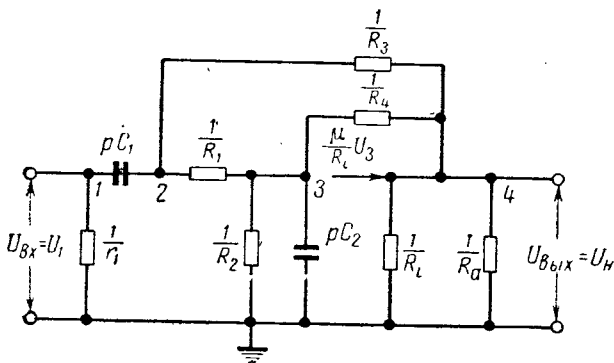


Рис. 6.14. Расчетная схема симметричной части усилителя по схеме, изображенной на рис. 6.13

где

$$|Y_{114}(p) = (-1)^{1+4} \begin{vmatrix} -pC_1 & -\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_1 & -\frac{1}{R_1} \\ 0 & -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + pC_2 \\ 0 & -\frac{1}{R_3} & \frac{\mu}{R_i} - \frac{1}{R_4} \end{vmatrix} \quad (6.39)$$

$$|Y_{111}(p) = (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + pC_1 & -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + pC_2 & -\frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_3} & \frac{\mu}{R_i} - \frac{1}{R_4} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_a} \end{vmatrix} \quad (6.40)$$

После вычисления определителей (6.39) и (6.40), приведения подобных членов и умножения числителя и знаменателя  $H(p)$  на  $R_1R_2R_3$ , получаем передаточную функцию рассматриваемого усилителя:

$$H(p) = \{p [T_1T_2p + T_1(1 + \alpha_2) + S_1(1 + \alpha_3 - \mu\beta_3)]\} : [T_1T_2p^2(1 + \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3) + T_1p(1 + \alpha_2\beta_3 + \alpha_2\gamma_3 + \alpha_2 + \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3 + \mu\alpha_2\beta_3) + T_2p(1 + \alpha_1 + \gamma_1 + \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3) + S_1p(1 + \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3) + \alpha_1(1 + \beta_2 + \mu\beta_2 + \mu\beta_3 + \gamma_2) + \alpha_2(1 + \beta_3 + \mu\beta_3 + \gamma_3) + \beta_2(1 + \mu) + \gamma_1 + \gamma_2 + \alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3 + 1].$$

Здесь

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{R_4}; \quad \beta_1 = \frac{R_1}{R_i}; \quad \gamma_1 = \frac{R_1}{R_a};$$

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{R_1}; \quad \beta_2 = \frac{R_2}{R_i}; \quad \gamma_2 = \frac{R_2}{R_a};$$

$$\alpha_3 = \frac{R_3}{R_4}; \quad \beta_3 = \frac{R_3}{R_i}; \quad \gamma_3 = \frac{R_3}{R_a};$$

$$T_1 = R_1C_1; \quad T_2 = R_2C_2; \quad S_1 = R_2C_1.$$



### § 6.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ УСЛОВИЙ НАДЕЖНОСТИ

Рассмотрим определение допусков на параметры элементов устройств непрерывного действия, исходя из требований надежности. Так как характеристики надежности ухудшаются со временем, то допуски следует определять для момента окончания заданного времени безотказной работы [60, 61]. Для устройства с одним выходом допуски определяются из следующих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y - |\overline{\Delta y}| > 0, \\ \varepsilon^2 \leq (\Delta y - |\overline{\Delta y}|)^2, \end{aligned} \right\} \quad (6.41)$$

в которых  $\overline{\Delta y}$  и  $\varepsilon$  — среднее и предельное значения ошибки на выходе,  $\Delta y$  — допустимая ошибка. При нарушении неравенств (6.41) устройство отказывает.

Точность устройства может быть существенно повышена за счет регулировок. Поэтому в случае применения регулировок в неравенствах (6.41) значения  $\Delta y$  и  $\varepsilon$  должны быть соответственно изменены.

При определении допусков на параметры элементов из условий соответствия их характеристике надежности условия (6.41) должны удовлетворяться в течение всего времени безотказной работы. Среди ошибок выделяют наиболее интенсивно растущие со временем вследствие износа, старения, деформаций и т. п. Из этой группы отбирают ошибки, наиболее влияющие на ошибки выхода. Для отобранных таким образом ошибок уменьшают первоначальные значения допусков, найденные из неравенств (6.41). При этом следует учитывать не только увеличение самих ошибок, но также и степень их влияния на ошибки выхода. Уменьшенные  $\varepsilon'$  и первоначальные  $\varepsilon$  допуски будут связаны соотношением

$$\varepsilon' = \gamma \varepsilon \quad (6.42)$$

$$\text{при } 0 < \gamma < 1,$$

где  $\gamma$  — статистический коэффициент, определяющий уменьшение первоначального допуска.

Выбор допусков на параметры элементов устройств дискретного действия производится с учетом особенностей работы таких устройств. Как известно, эти устройства выдают переработанную информацию только в устойчивом состоянии. Это означает, что допуски на параметры их элементов должны выбираться из условий безотказной работы именно в устойчивом состоянии. Осуществление переходного процесса и заданная его быстротечность при этом обычно обеспечиваются.

Сначала устанавливается требуемое время безотказной работы устройства. Затем найденные допуски на отклонения параметров, растущие с течением времени, уменьшаются до таких начальных значений, при которых в конце времени безотказной работы они не превышают допустимых.

Допуски можно выбирать при помощи методов теории вероятностей и неравенств (6.41) для устойчивых состояний устройств в конце промежутка времени безотказной работы.

Определим, например, допуски на параметры элементов однокаскадного усилителя с анодно-катодной нагрузкой (рис. 6.15), работающего в потенциальной схеме, т. е. в условиях, когда существенны только высокий и низкий уровни выходного сигнала [60]. Очевидно, что высокий уровень выходного напряжения  $U_{\text{вых в}}$  в этой схеме будет соответствовать запертой лампе, а низкий уровень  $U_{\text{вых н}}$  — открытой. В идеальном случае

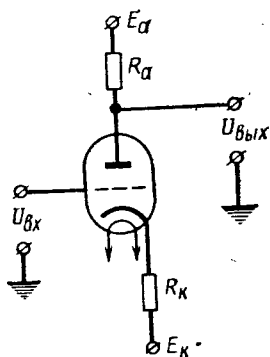


Рис. 6.15. Схема однокаскадного усилителя с анодно-катодной нагрузкой

$$\begin{aligned} U_{\text{вых в}} &= E_a, \\ U_{\text{вых н}} &= E_a - R_a I_a = \\ &= \frac{[R_i + (1 + \mu) R_k] E_a + (1 + \mu) R_a E_a - \mu R_a U_{\text{вх}}}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k}, \end{aligned} \quad (6.43)$$

где  $U_{\text{вх}}$  — значение входного напряжения, полностью открывающего лампу;

$E_a$  — напряжение источника анодного питания;

$I_a$  — ток насыщения лампы;

$R_i$  — внутреннее сопротивление лампы;

$\mu$  — статический коэффициент усиления лампы;

$R_a$  и  $R_k$  — сопротивления анодной и катодной нагрузок.

Предположим, что в конце заданного срока безотказной работы отклонения величины выходного напряжения обоих уровней не должны быть больше, чем

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{вых}} &= \gamma \frac{U_{\text{вых в}} - U_{\text{вых н}}}{2} = \\ &= \gamma \frac{R_a}{2} \cdot \frac{E_a - (1 + \mu) E_k + \mu U_{\text{вх}}}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k}, \end{aligned} \quad (6.44)$$

где  $\gamma$  — постоянный коэффициент, причем  $0 < \gamma < 1$ .

Недопустимое понижение высокого уровня, определяемое только уменьшением анодного напряжения  $E_a$ , может явиться

причиной отказа усилителя. При понижении напряжения анодного питания на  $\Delta E_a$  высокий уровень выходного сигнала понизится до величины

$$U'_{\text{вых в}} = E_a - \Delta E_a. \quad (6.45)$$

Это означает, что стабильность напряжения источника питания должна определяться условием

$$|\Delta E_a| \leq \Delta U_{\text{вых}}. \quad (6.46)$$

Отклонение выходного напряжения от заданного низкого уровня может быть вызвано большим количеством возмущений. Под влиянием этих возмущений низкий уровень может подняться до

$$U'_{\text{вых н}} = U_{\text{вых н}} + \Delta E_a - i_a \Delta R_a - \frac{R}{R_a} \{ \Delta E_a - (1 + \mu) \Delta E_k + \\ + \mu \Delta U_{\text{вх}} - i_a [\Delta R_i + \Delta R_a + (1 + \mu) \Delta R_k] \},$$

т. е. до

$$U'_{\text{вых н}} = U_{\text{вых н}} + \frac{R_i + (1 + \mu) R_k}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k} [\Delta E_a - i_a \Delta R_a] + \\ + \frac{R}{R_a} \{ (1 + \mu) \Delta E_k - \mu \Delta U_{\text{вх}} + i_a [\Delta R_i + (1 + \mu) \Delta R_k] \}, \quad (6.47)$$

где

$$R = \frac{R_a^2}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k}.$$

Предельному значению  $U'_{\text{вых н}}$  будут соответствовать отклонения:

$$\begin{aligned} \Delta E_a > 0; \quad \Delta E_k > 0; \quad \Delta R_i > 0; \\ \Delta R_k > 0; \quad \Delta R_a < 0; \quad \Delta U_{\text{вх}} < 0. \end{aligned} \quad (6.48)$$

Очевидно, все слагаемые правой части (6.47), кроме первого, будут определять величину отклонения от низкого уровня. Это отклонение не должно превышать  $\Delta U_{\text{вых}}$ , поэтому выбор допусков на параметры элементов усилителя должен удовлетворять условию

$$\begin{aligned} \frac{R_i + (1 + \mu) R_k}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k} \Delta E_a - \frac{R_i + (1 + \mu) R_k}{R_i + R_a + (1 + \mu) R_k} i_a \Delta R_k + \\ + \frac{R}{R_a} \{ (1 + \mu) \Delta E_k - \mu \Delta U_{\text{вх}} + i_a [\Delta R_i + (1 + \mu) \Delta R_k] \} \leq \Delta U_{\text{вых}}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

При этом знаки отклонения принимаются согласно условиям (6.48).

Некоторая неточность изложенного приема определения допусков заключается в линеаризации характеристик усиленной лампы.

Рассмотрим метод, основанный на применении реальных статических выходных характеристик [62]. Для схемы, представленной на рис. 6.15,

$$\begin{aligned} U'_{\text{вых н}} &= E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{к}} + i_{\text{а}}(R_{\text{к}} + \Delta R_{\text{к}}) + E'_{\text{ак}} = \\ &= E_{\text{а}} + \Delta E_{\text{а}} - i_{\text{а}}(R_{\text{а}} - \Delta R_{\text{а}}), \end{aligned} \quad (6.50)$$

откуда напряжение между анодом и катодом

$$E'_{\text{ак}} = E_{\text{а}} + \Delta E_{\text{а}} - E_{\text{к}} - \Delta E_{\text{к}} - i_{\text{а}}(R_{\text{а}} + R_{\text{к}} - \Delta R_{\text{а}} + \Delta R_{\text{к}}). \quad (6.51)$$

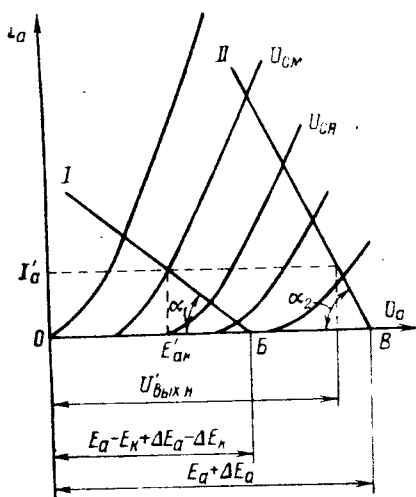


Рис. 6.16. К расчету допусков по схеме, изображенной на рис. 6.15

На рис. 6.16 приведено типовое семейство статических выходных характеристик триода  $i_{\text{а}} = f(U_{\text{а}})_{U_{\text{с}} = \text{const}}$ . Граничные значения входного напряжения (напряжения на управляющей сетке), определяющие низкий уровень выходного, заданы характеристиками для  $U_{\text{с}} = U_{\text{сн}}$  и  $U_{\text{с}} = U_{\text{см}}$ . Точка *B* на оси абсцисс соответствует напряжению, равному  $E_{\text{а}} + \Delta E_{\text{а}}$ , а точка *B* — напряжению  $E_{\text{а}} - E_{\text{к}} + \Delta E_{\text{а}} - \Delta E_{\text{к}}$ . Через точку *B* проведена прямая *I*, составляющая с осью абсцисс угол

$$\alpha_1 = \arctg \frac{1}{R_{\text{а}} + R_{\text{к}} - \Delta R_{\text{а}} + \Delta R_{\text{к}}}. \quad (6.52)$$

Направление прямой *I* определено тем, что последний член правой части выражения (6.51) имеет знак минус. Пересечение прямой *I* с характеристикой  $i_{\text{а}} = f(U_{\text{а}})_{U_{\text{см}} = \text{const}}$  определяет величину анодного тока  $I'_a$ , соответствующего максимальной величине  $E'_{\text{ак}}$ . Найдя на графике значение  $I'_a$  и воспользовавшись уравнением (6.50), определим

$$U'_{\text{вых н}} = E_{\text{а}} + \Delta E_{\text{а}} - I'_a (R_{\text{а}} - \Delta R_{\text{а}}). \quad (6.53)$$

Через точку  $B$  проведем прямую  $II$ , составляющую с осью абсцисс угол

$$\alpha_2 = \arctg \frac{1}{R_a - \Delta R_a}. \quad (6.54)$$

Далее находим пересечения прямой  $I$  с линией  $I'_a$ , восстанавливаем из точки пересечения перпендикуляр к оси абсцисс и определяем величину  $U'_{\text{вых н}}$ .

Аналогичным образом графически определим  $U_{\text{вых н}}$ . Построения осуществляются в соответствии с уравнениями (6.50), (6.51) и (6.53), полагая в них все первичные отклонения равными нулю. В этом случае величину  $E_{\text{ак}}$  определим по статической характеристике  $i_a = f(U_a)_{U_{\text{сн}} = \text{const}}$ , где  $U_{\text{сн}}$  соответствует входному напряжению (напряжению на сетке лампы), обеспечивающему низкий уровень выходного. Очевидно,

$$\Delta U_{\text{вых н}} = U'_{\text{вых н}} - U_{\text{вых н}}. \quad (6.55)$$

Можно подобрать такие значения допусков  $\Delta E_{\text{к}}$ ,  $\Delta R_{\text{к}}$  и  $\Delta R_a$ , при которых получается

$$\Delta U_{\text{вых н}} \leq \Delta U_{\text{вых}}. \quad (6.56)$$

Найденные по уравнениям (6.44), (6.49) или (6.56) допуски необходимо уменьшить с учетом увеличения первичных ошибок в процессе эксплуатации. Для этого выбирают достаточно малое значение коэффициента  $\gamma$  в уравнении (6.44).

#### § 6.4. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Обычно при расчете характеристик надежности для условий нормальной работы пользуются методами, основанными на пуассоновом распределении числа отказов (§ 2.3) и экспоненциальном законе надежности (§ 2.4). Находимая при этом интенсивность отказов элементов зависит от режимов работы и условий эксплуатации (§ 3.1). Эта зависимость для многих элементов современных АУС еще не получена (для некоторых элементов такие зависимости приведены в § 4.1). В связи с этим нет возможности вычислять значения характеристик надежности для различных условий эксплуатации. Для расчета надежности в указанных условиях более удобны так называемые коэффициентные методы. Например, основным источником отказов электронных блоков АУС (усилителей, генераторов, смесителей, регистров, логических ячеек и пр.) являются электронные лампы, надежность которых значительно хуже надежности прочих неделимых элементов электронных систем [23]. Соотношение между надежностью

электронных ламп и надежностью прочих неделимых элементов (сопротивлений, конденсаторов, трансформаторов и др.) таково, что при ориентировочной оценке надежности электронных блоков все их элементы, кроме ламп, оказываются возможным считать абсолютно надежными, полагая для них  $P_0(t) \approx 1$ . При таком допущении надежность блока будет определяться только надежностью ламп, примененных в нем. При основном соединении вероятность  $P_0$  безотказной работы блока за время  $t_n$ , определяемое «долговечностью» ламп,

$$P_0(t_n) = P_n n_n(t_n), \quad (6.57)$$

где  $n_n$  — количество ламп в элементе;

$P_n$  — вероятность безотказной работы лампы.

Поскольку отказ электронной лампы может вызываться отказами других, подключенных к ней неделимых элементов, формула (6.57) нуждается в уточнении. Так как на одну электронную лампу приходится от 7 до 10 сопротивлений, конденсаторов, катушек индуктивности и других элементов, то величина  $P_0$  несколько снижается. Уточненная формула в связи с этим приобретает вид

$$P_0(t_n) = [k_n P_n(t_n)]^{n_n}, \quad (6.58)$$

где  $k_n$  — является средним статистическим коэффициентом.

Значения  $k_n$  [63] приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Значения коэффициента в (6.58)

Количество неделимых элементов на одну лампу	7	8	9	10
$k_n$	0,98	0,95	0,91	0,86

При сравнении значений  $P_0$ , получаемых по формуле (6.58), и результатов наблюдений для некоторых образцов блоков АУС, расхождения расчетных и опытных данных не превысили 3—5% [63].

Метод эмпирических коэффициентов может быть применен и при расчете характеристик надежности целых систем.

Предположим, что отказы являются независимыми, а элементы включены в систему по схеме основного соединения. Допустим также, что все элементы работают в нормальном

режиме, а зависимость интенсивности их отказов от условий эксплуатации одинакова для всех элементов. Эти предположения означают, во-первых, что как для элементов, так и для системы справедлив экспоненциальный закон надежности и действительны соотношения (2.59), (2.60) и (2.61), и, во-вторых, что отношение интенсивностей отказов любых двух элементов

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_0} = k_i = \text{const.} \quad (6.59)$$

Из (6.59) следует, что имея значения отношения  $k_i$  и интенсивности отказов  $\lambda_0$  элемента, количественные характеристики надежности для которого известны из опыта с высокой достоверностью, можно найти  $\lambda_i$  для любого другого элемента. На основании (6.59) элемент с интенсивностью отказов  $\lambda_0$  можно назвать стандартным. Отношение  $k_i$  будем называть коэффициентом надежности  $i$ -го элемента.

Полагая все однотипные элементы равнонадежными, из формул (2.59) — (2.61) имеем:

$$\left. \begin{aligned} P_c(t) &= \exp\left(-t\lambda_0 \sum_{i=1}^n k_i z_i\right), \\ \lambda_c &= \lambda_0 \sum_{i=1}^n k_i z_i, \\ \bar{T}_c &= \frac{1}{\lambda_0 \sum_{i=1}^n k_i z_i} = \frac{\bar{T}_0}{\sum_{i=1}^n k_i z_i}, \end{aligned} \right\} \quad (6.60)$$

где  $z_i$  — число элементов  $i$ -го типа;  
 $n$  — число типов элементов;

$\bar{T}_0 = 1/\lambda_0$  — среднее время отказа стандартного элемента.

Коэффициенты надежности  $k_i$  могут быть получены в результате анализа статистических данных, относящихся к интенсивностям отказов различных АУС. Эти коэффициенты будут находиться в пределах (рис. 6.17), зависящих от совокупности факторов, влияющих на интенсивности. Поэтому характеристики надежности в общем случае целесообразно вычислять для наибольшего и наименьшего значений  $k_i$ .

Из рис. 6.17 видно, что вероятность безотказной работы системы при этих условиях будет находиться внутри области значений коэффициентов  $k_i$ . Подобные зависимости дают возможность просто пересчитывать характеристики надежности при изменении условий работы АУС. Действительно, при  $k_i = \text{const}$  изменение условий эксплуатации учитывается

в формулах (6.60) лишь коэффициентом  $\lambda_0$ . Это приводит к изменению масштаба времени при определении  $P_c(t)$ . Эти изменения масштаба можно вычислять, если известны зависимости интенсивности отказов стандартного элемента от условий эксплуатации.

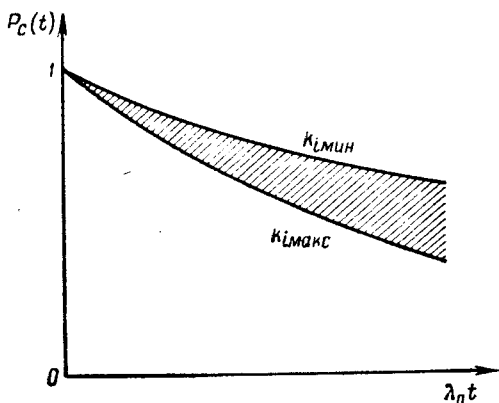


Рис. 6.17. К определению коэффициента надежности

В табл. 6.2 приведены значения  $k_{i \text{ мин}}$  и  $k_{i \text{ макс}}$  для некоторых элементов вычислительных машин, корабельных систем, летательных аппаратов и пр., полученные в [64] в результате обработки опытных данных об отказах этих элементов. В качестве стандартного элемента здесь приняты сопротивления.

Таблица 6.2

**Коэффициенты надежности некоторых элементов**

Наименование элементов	$k_i$		Наименование элементов	$k_i$	
	мини-мум	макси-мум		мини-мум	макси-мум
Электровacuумные приборы	18,3	26,6	Селеновые и купрокс-ные выпрямители	16,7	20
Генераторные лампы	70	77	Электродвигатели	17	22
Конденсаторы танталовые	10,70	15,30	Преобразователи	70	100
Конденсаторы прочие	0,33	0,61	Реле	3,3	5,5
Сопротивления	1	1	Гирскопические элементы	97,5	100
Потенциометры	7,2	12,0	Линии задержки	62,5	93,4
Полупроводниковые диоды	11,7	15,4	Штепсельные разъемы	10,7	15,3

При расчете характеристик надежности коэффициенты должны уточняться в каждом конкретном случае, например в случаях применения облегченных режимов работы отдельных элементов или их резервирования.

Метод коэффициентов особенно удобен при прогнозировании надежности проектируемой АУС, так как требования,



предъявляемые к характеристикам надежности отдельных ее блоков, можно задавать величиной  $\sum_{i=1}^{n_j} k_i z_{ij}$ , где  $j$  — номер блока;  $n_j$  — число типов элементов;  $z_{ij}$  — число элементов  $i$ -го типа в блоке. Тогда вероятность безотказной работы системы, состоящей из  $b$  блоков (при основном соединении всех элементов и блоков), согласно (6.60):

$$P_c(t) = \exp\left(-t\lambda_0 \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{n_j} k_i z_{ij}\right). \quad (6.61)$$

Если заданы вероятность безотказной работы  $P_c(t)$ , а также интенсивность отказов  $\lambda_0$  стандартного элемента, то из (6.61) имеем условие обеспечения требуемой надежности в виде:

$$\sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{n_j} k_i z_{ij} \geq -\frac{\ln P_c(t)}{t\lambda_0}. \quad (6.62)$$

Здесь должен быть принят знак неравенства, если не принимаются специальных мер для повышения надежности. В этом случае

$$\sum_{j=1}^b a_j \sum_{i=1}^{n_j} k_i z_{ij} = -\frac{\ln P_c(t)}{t\lambda_0},$$

где  $a_j$  — коэффициенты, по крайней мере некоторые из которых должны быть больше единицы. Эти коэффициенты могут быть определены в зависимости от требований, предъявляемых к системе и ее блокам.

Будем считать систему удовлетворительной, если ее характеристики надежности не ниже заданных, а одинаковые по сложности элементы равнонадежны. В этом случае требование, предъявляемое к надежности блоков, может быть задано не значением какой-либо количественной характеристики надежности, а распределением численного значения левой части неравенства (6.62) между блоками, т. е. значениями сумм вида

$$\sum_{i=1}^{n_j} k_i z_{ij}. \quad (6.63)$$

Располагая значениями коэффициентов надежности неделимых элементов, можно оценить надежности блоков системы, так как тип неделимых элементов и число их определены схемой блока. Если заданное число удовлетворяется, то схема блока может быть принята. Если же окажется, что число, соответствующее сумме (6.63), не удовлетворяется, т. е. оно окажется меньше числа, получаемого в действительности, то необходимо принимать меры для повышения надежности блока, т. е. применять облегченные режимы и резервирование.

Пользуясь коэффициентным методом, характеристики  $P_6 = f(\lambda_0, t)$  вероятности безотказной работы блоков системы целесообразно строить на одном графике. Такое построение дает возможность сравнивать надежности отдельных блоков системы и выявлять наименее надежные из них. В общем случае не все элементы АУС работают непрерывно все время от момента ее включения до выключения. Поэтому кривые  $P_6 = f(\lambda_0, t)$ , соответствующие отдельным блокам, могут быть смещены во времени (рис. 6.18).

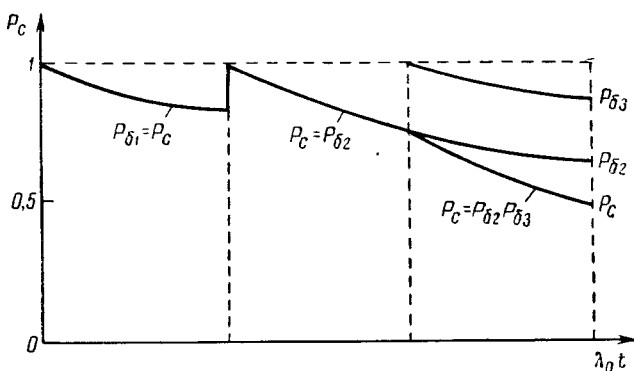


Рис. 6.18. Сравнение характеристик безотказной работы блоков

Применение коэффициентного метода существенно упрощается, если придерживаться следующего порядка расчета. Прежде всего необходимо точно определить условия отказа системы, а также выбрать вид соединения ее элементов. Затем следует составить схему расчета, на которой указываются временные интервалы работы каждого элемента. Далее выбирается стандартный неделимый элемент системы, т. е. такой элемент, интенсивность отказов которого является достоверной величиной. После этого для каждого блока мо-

гут быть определены и построены зависимости  $P_0 = f(\lambda_0, t)$  при  $k_{i \text{ макс}}$  и  $k_{i \text{ мин}}$ . Далее определяются также для каждого блока относительные значения средних времен  $\bar{T}_i/\bar{T}_0$  безотказной работы блоков. Эти отношения дают возможность сравнить надежности блоков и выявить наименее надежные из них.

Вероятность безотказной работы системы определяется по известным величинам интенсивности отказов  $\lambda_0$  стандартного элемента и времени  $t$  непрерывной работы системы.

---

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, ПРОИЗВОДСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АУС

### § 7.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НАДЕЖНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАНИЯХ

Для правильного учета требований, предъявляемых к надежности в процессе разработки аппаратуры, необходимо в первую очередь нормировать эти требования, а также знать и рационально применять способы обеспечения надежности.

До недавнего времени в технических заданиях (ТЗ) на аппаратуру АУС требования к надежности не оговаривались совсем или же в редких случаях оговаривались лишь качественно или косвенно, как например: «система должна работать надежно» или же «система должна работать надежно столько-то часов»; количественных же требований, предъявляемых к надежности, не указывалось. Попытки дать количественную оценку новой аппаратуры часто предпринимаются лишь после того, как разработка закончена и первая партия аппаратуры поступила в эксплуатацию. Такая практика приводит во многих случаях к внедрению в производство мало-надежной аппаратуры, которая не может удовлетворять требованиям, предъявляемым к АУС.

Без указания количественно нормированных требований, предъявляемых к надежности в ТЗ, вопросам обеспечения надежности при проектировании будет уделено недостаточно внимания. Поэтому количественная оценка надежности при доставлении ТЗ всегда необходима, в особенности в тех случаях, когда разработка отдельных частей системы производится в разных организациях. При этом желательны такие критерии надежности, которые могут быть применены к аппаратуре в условиях стендовых испытаний.

В состав ТЗ должны включаться два численных уровня надежности: требуемый наименьший и несколько больший желательный уровень, но система, удовлетворяющая требуемому уровню надежности, должна быть принята при испытаниях. Численные значения критериев надежности должны быть заданы для АУС в целом и для ее основных частей.

Критерий надежности в ТЗ может быть задан в различной форме. Так, для элементов наиболее удобным критерием надежности является интенсивность отказов. Для невозстанавливаемых устройств разового действия наиболее удобным критерием надежности является вероятность  $P(t)$  безотказной работы в течение заданного времени в заданных условиях работы. Для устройств восстанавливаемых (как разового, так и многоразового действия) лучшим критерием надежности является вероятность исправного состояния  $S(t)$  (§ 3.1).

Все требования в ТЗ, в том числе и на надежность, устанавливаются, исходя из критериев необходимости и возможности. Необходимость некоторого численного значения уровня надежности определяется прежде всего задачами, которые должны выполнять АУС в связи с назначением управляемого объекта. Так, для космического корабля или же кабеля межконтинентальной связи надежность должна быть значительно выше, чем для автоматов бытового назначения.

Возможность достижения определенного количественного уровня надежности определяется экономическими, научно-техническими и организационными условиями. Исходной базой при оценке этих условий для выбора уровня надежности должны служить статистические данные о надежности ранее изготовленных аналогичных систем.

Экономические условия — это прежде всего стоимости разработки и разработанной аппаратуры. Для повышения надежности требуется выполнение специальной программы работ, как правило очень трудоемкой. Каждый процент повышения надежности обычно увеличивает себестоимость изделия. Технически возможно для всех систем достичь высокой надежности, но вряд ли целесообразно повышать надежность малоответственных устройств на несколько процентов за счет повышения их стоимости в несколько раз. В каждом конкретном случае следует искать оптимальное соотношение между стоимостью и надежностью.

Организационные условия — это прежде всего срок разработки и возможность соответствующего материально-технического обеспечения. При разработке АУС с повышенной надежностью, помимо повышения затрат, часто требуется и увеличение сроков. Наличие новых высоконадежных элементов или высококачественных материалов еще не означает реальную возможность их применения в любой аппаратуре. Как правило, новые перспективные элементы и материалы изготавливаются в малых количествах и могут быть применены не во всякой системе.

Научно-технические условия, определяющие возможность достижения определенного уровня надежности, состоят из:

- 1) наличия методов разработки и расчета надежности вообще и для проектируемых систем в частности;
- 2) наличия необходимых статистических данных, в частности по интенсивностям отказов;
- 3) наличия необходимой культуры производства в промышленности;
- 4) достигнутого уровня разработки и выпуска надежных элементов и высококачественных материалов.

Введение количественных требований к надежности в ТЗ еще недостаточно, хотя и необходимо. Помимо этого в ТЗ должны быть намечены меры достижения надежности, а именно: применение элементов заданного уровня надежности (§ 4.1); применение метода граничных (§ 7.3) и разграничивающих (§ 7.4) испытаний; обязательность стандартизации и модульного построения (§ 7.3) системы; наличие значений коэффициента нагрузки наиболее распространенных типов элементов; необходимость или возможность применения других мер — специального отбора элементов, введения обратных связей, применения избыточных схемных решений и т. п. Наконец, там же следует оговаривать необходимость или возможность применения методов приработки системы (ускоренных испытаний).

## § 7.2. СОСТАВЛЕНИЕ НАДЕЖНЫХ СХЕМ

Требования, предъявляемые к повышению надежности, могут быть реализуемы на всех этапах проектирования, изготовления, отладки в схемах АУС. Сюда относится тщательная разработка схемы с оптимальным резервированием (§ 5.8).

Следует иметь в виду, что современные АУС очень часто являются системами дистанционного действия, состоящими из целого ряда рассредоточенных объектов. В связи с этим необходимо оптимизировать схему включения объектов в систему, добиваясь наибольшей ее надежности.

При составлении схемы АУС необходимо отдавать предпочтение заведомо более надежным элементам. Так, например, при прочих равных условиях следует предпочесть полупроводниково-магнитный или полупроводниково-электромагнитный усилитель лампово-магнитному или лампово-электромагнитному, диэлектрический усилитель — полупроводниковому, следящую систему переменного тока — системе постоянного тока и т. д.

В качестве примера резервирования на рис. 7.1 показана возможная блок-схема резервированной следящей системы. Здесь применено постоянное общее однократное резервирование. В схеме обозначено:  $U_{\text{вых}}$  — напряжение на выходах усилителей;  $\theta$  — углы поворота исполнительных двигателей;

дающие с коэффициентами передачи  $k_d$ ; принимающие с коэффициентами передачи  $k_n$ ; элементы отрицательной обратной связи по скорости  $D$ ; усилители с коэффициентом усиления  $k_y$ ; исполнительные двигатели  $D$ , редуктор  $P$ . Переключающий индикатор отказов (ПИО) сравнивает выходные

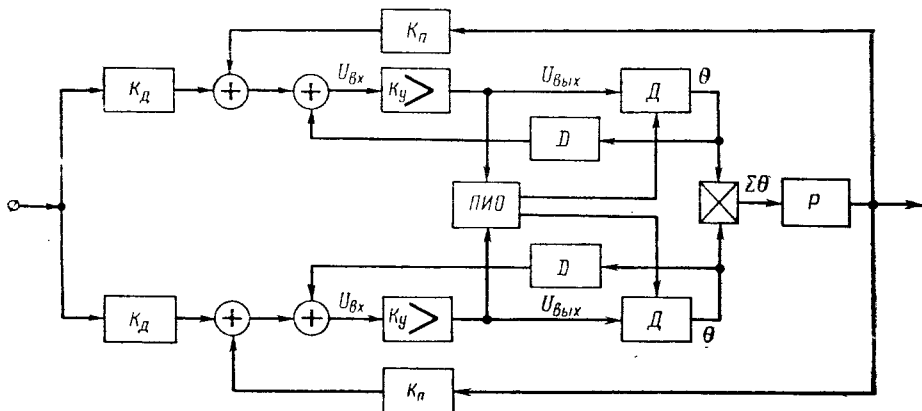


Рис. 7.1. Блок-схема резервированной следящей системы

напряжения усилителей и при обнаружении отклонения амплитуды напряжения одного из усилителей от допустимого значения отключает отказавший канал, разрывая, например, цепь питания соответствующего двигателя. Нетрудно видеть, что функционирование резервированной системы эквивалентно функционированию резервируемой, а характеристики надежности ее существенно улучшаются (§ 5.3 и 5.6).

Особый интерес представляет возможность повышения надежности АУС за счет резервирования путей передачи сигналов (§ 5.9). Рассмотрим пример, в котором для увеличения надежности функционирования логических элементов утроено их количество [30]. Все три элемента получают одинаковую информацию, одинаково ее преобразуют и подают на выходной элемент, реакция которого оказывается «правильной», если хотя бы два логических элемента из трех функционируют нормально (рис. 7.2).

Предположим, что выходной элемент является абсолютно надежным, а отказавшие элементы могут давать на своем выходе либо только низкое, либо только высокое напряжение. Пусть вероятность того, что любой из трех элементов будет работать безотказно, равна  $P_3$ , тогда вероятность

безотказной работы трех элементов есть  $P_3^3$ , а вероятность отказа одного элемента при безотказной работе двух остальных равна  $(1 - P_3)P_3^2$ . Поэтому вероятность безотказной работы резервированной системы

$$P_3 = P_3^3 + 3(1 - P_3)P_3^2 = 3P_3^2 - 2P_3^3.$$

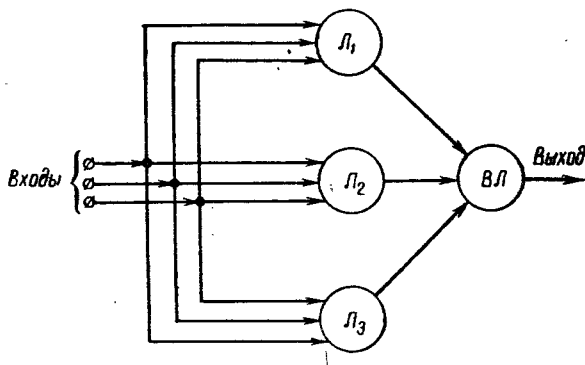


Рис. 7.2. Схема резервирования логических элементов

Применив экспоненциальный закон надежности, получим

$$P_c = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}.$$

Если на выходе одного из двух отказавших элементов будет высокое напряжение, а на выходе другого — низкое, то

$$P_c = P_3^3 + 3(1 - P_3)P_3^2 + \frac{3}{2}(1 - P_3)^2 P_3 = \frac{3}{2}P_3 - \frac{1}{2}P_3^3$$

или

$$P_c = \frac{3}{2}e^{-\lambda t} - \frac{1}{2}e^{-3\lambda t}.$$

В § 5.9 рассмотрен способ резервирования посредством замены одного элемента схемой из таких же элементов. На рис. 7.3 показано применение этого способа: реле с одним контактом заменено четырьмя аналогичными реле при схеме включения контактов по рис. 2.4.

Отработка принципиальной схемы устройства для обеспечения его наибольшей надежности иллюстрируется рис. 7.4 и 7.5. На первом из них показана схема усилителя, в которой реализованы принципы постоянного общего резервирования. Усилитель, выполненный по этой схеме, применяется на практике [65]. Однако постоянное общее резервирование



не исчерпывает всех возможностей повышения надежности рассматриваемого устройства (элемента). Поэтому более совершенным является второй вариант принципиальной схемы того же усилителя (рис. 7.5). В этой схеме реализовано постоянное раздельное резервирование. Легко подсчитать, что вероятность безотказной работы второй схемы усилителя

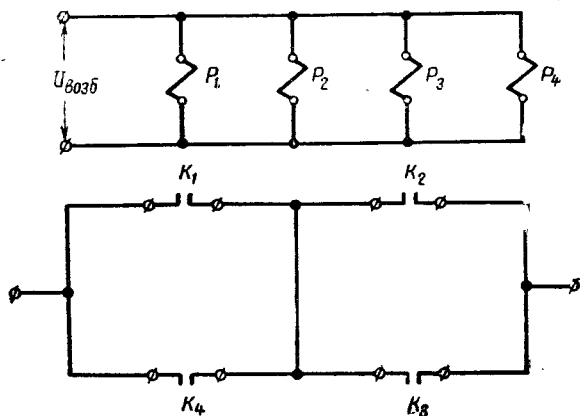


Рис. 7.3. Релейная схема, более надежная, чем ее элементы

примерно в три раза выше первой. При составлении принципиальной схемы устройства для увеличения его надежности следует применять отрицательную обратную связь даже в тех случаях, когда другой необходимости в этой связи нет [106].

Весьма существенное улучшение надежности устройств и систем можно получить при разработке монтажных схем и технологии их сборки.

### § 7.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ

Конструктивная надежность любой аппаратуры, в том числе и аппаратуры АУС, в основном определяется тремя факторами:

- 1) надежностью применяемых элементов и их количеством;
- 2) правильностью схемного решения;
- 3) надежностью конструкции.

В связи с этим при разработке системы необходимо прежде всего придерживаться следующих правил применения элементов.

1. Все элементы, устанавливаемые в аппаратуре, должны соответствовать техническим условиям (ТУ).

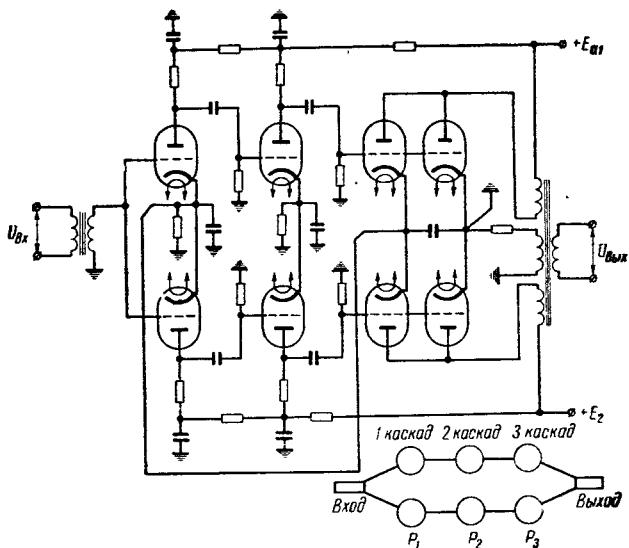


Рис. 7.4. Схема лампового усилителя с постоянным общим резервированием  $P_{yc} \approx (P_1 + P_2 + P_3)^2$

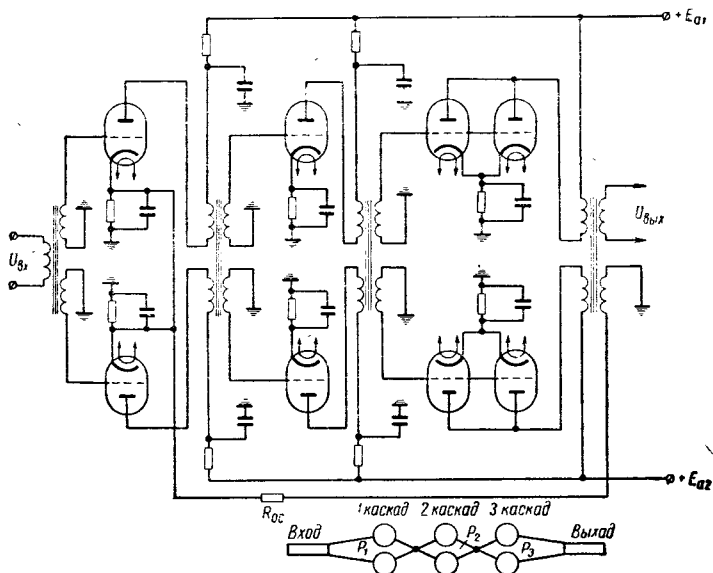


Рис. 7.5. Схема лампового усилителя с постоянным разделным резервированием  $P_{yc} \approx P_1^2 + P_2^2 + P_3^2$

2. Применение элементов возможно только в режимах, предусмотренных этими ТУ или в более легких, но не в предельных.

3. В аппаратуре, как правило, должны применяться элементы только серийного производства со стабильными параметрами и с известной интенсивностью отказов.

4. Номенклатура элементов, применяемых в аппаратуре, должна быть сведена к минимуму.

5. Применение недолговечных и быстро изнашивающихся элементов (магнетронов, тиратронов, микропереключателей и т. п.) разрешается только в тех случаях, когда конструкция системы и условия ее эксплуатации позволяют регулярную их замену.

6. Везде, где это возможно, взамен электровакуумных приборов следует применять полупроводниковые, а также магнитные и диэлектрические.

7. В коммутирующих контактных элементах (реле, переключатели и т. п.) рекомендуется резервировать контакты, но не для повышения их пропускной способности. Схемы коммутации желательно строить таким образом, чтобы в нормальном рабочем состоянии обмотки коммутационных элементов были обесточены.

8. Разъемные соединения также желательно резервировать. Необходимо применять только разъемные элементы повышенной надежности, у которых имеется надежная фиксация сочлененного состояния (желательна резьба), достаточное количество точек контакта (не менее двух) между штырем и гнездом (так называемые «банановые» штеккера, разрезные двухслойные гнезда для ножевых штырей, трехсекционные гнезда для круглых штырей и т. п.), нетускнеющее покрытие контактных поверхностей штырей и гнезд (золочение, родирование).

9. По мере разработки микромодулей они должны внедряться во все виды аппаратуры.

10. Все элементы, устанавливаемые в аппаратуре, должны иметь срок хранения после изготовления не более 6—18 месяцев.

11. При прочих равных условиях рекомендуется применять электровакуумные приборы с более низким анодным напряжением.

12. Не рекомендуется применять высокоомные проволочные сопротивления, которые изготавливаются из проводов диаметром менее 0,05 мм.

13. Элементы, допускающие регулировку (переменные сопротивления, конденсаторы и т. п.), обязательно должны иметь фиксаторы. Фиксация не должна влиять на настройку.

Тенденцией развития современного радиоэлектронного оборудования является сокращение его размеров, веса и потребляемой мощности. Микроминиатюризация электронной аппаратуры дает возможность повысить надежность сложнейших систем прежде всего за счет:

- 1) сокращения механическим путем получаемых электрических соединений;
- 2) увеличения стандартизации деталей и узлов;
- 3) легкости предохранения малогабаритных систем от возможных механических повреждений;
- 4) простоты изготовления элементов обычной надежности при использовании их в системах, надежность которых повышается резервированием.

Последняя причина представляет особый практический интерес. При помощи микроминиатюризации можно применять в системах любую необходимую кратность резервирования, что в сочетании с методами самонастройки дает возможность создавать высоконадежные системы из малонадежных элементов.

Правильное схемно-режимное применение элементов позволяет разрабатывать достаточно надежные схемы из относительно малонадежных элементов.

Разработчики радиоэлектронных устройств до недавнего времени не придавали столь большого значения запасу прочности, как это делали инженеры других специальностей. Применение средств электроники в АУС потребовало изменения этого положения. Правильное действие системы должно быть обеспечено с учетом возможной нестабильности и допусков на параметры применяемых элементов. Таким образом необходимо разрабатывать надежные схемы из недостаточно стабильных и неоднородных по параметрам элементов, подверженных, кроме того, старению, неустойчивым отказам и разрегулировке. По этим причинам необходимо вводить в систему запас прочности. Система должна соответствовать предъявляемым к ней требованиям в условиях, когда все ее элементы и параметры, в том числе напряжения питания, имеют наихудшие значения в пределах установленных для них допусков (§ 6.3). Это означает, что достаточно надежная система должна быть избыточной (§ 1.4). Таким образом, запас прочности вводится в АУС в виде избыточности. Желательно и для простых схем возможно (как, например, для схемы модулей электронных цифровых вычислительных машин) обеспечить устойчивую работу при одновременном изменении параметров всех элементов до наихудших значений [66]. Схемы должны быть составлены так, чтобы при исчезновении хотя бы одного из питающих напряжений (как

внутри схемы, так и вне ее) ни один из ее элементов не выходил из строя.

Поскольку все схемные элементы с течением времени меняют свои параметры, в схеме необходимо предусматривать способы обнаружения таких отклонений от номинала. Отклонения должны наблюдаться заблаговременно, чтобы заменить элемент до тех пор, пока изменение его параметров не привело к отказу схемы (гл. 8).

Проверка выполнения этих требований предусматривает введение двух режимов испытания для схем. Один из режимов соответствует нормальным условиям работы, в том числе и климатическим. Второй режим — кратковременным условиям граничных испытаний (режим перенапряжения, приводящий к предельным изменениям параметров). Например, если в схеме стабилизатора для полупроводникового триода установлен режим работы при использовании его по мощности на 50%, то в режиме граничных испытаний мощность полупроводникового триода должна быть использована полностью при максимальной температуре окружающей среды. Таким образом, граничные испытания дают возможность проверить, достаточен ли запас прочности, т. е. достаточна ли избыточность системы [67].

Для неделимых элементов АУС запас прочности обеспечивается облегчением режимов их работы. Так, элементы одной из наиболее надежных электронных цифровых вычислительных машин TRANSAC S — 2000 [66] имеет следующие коэффициенты нагрузки:

конденсаторы . . . . .	0,05÷0,10,
сопротивления . . . . .	0,2,
диоды . . . . .	0,1,
мощные полупроводниковые триоды . . . . .	0,5.

Для сложных систем необходимо применять элементы с интенсивностью отказов, не превышающей 0,05% на 1000 час [9]. Большинство существующих элементов не удовлетворяют этим требованиям. Значения интенсивности отказов для таких элементов, как электровакуумные приборы, гироскопы, реле и др., в сотни раз больше. Поэтому практически единственным способом обеспечения требуемой надежности этих элементов является облегчение режимов их работы. Для элементов АУС могут быть рекомендованы следующие облегченные режимы (по экспериментальным данным):

1) мощность рассеяния на сопротивлениях не должна превышать 50—70% от номинальной мощности рассеяния;

2) мощность рассеяния на аноде и других электродах электровакуумных приборов не должна превышать 50—75% от допустимой;

3) мощность рассеяния на полупроводниковых диодах не должна превышать половины допустимой. При этом коэффициенты использования полупроводниковых триодов по току и напряжению должны быть не больше  $0,7 \div 0,9$ ;

4) напряжение катод-подогреватель не должно превышать 70% от номинального значения по ТУ;

5) анодные токи электровакуумных приборов не должны превышать 75% от их номинальных значений;

6) рабочее напряжение конденсаторов должно быть не более 70% от номинального;

7) максимальная плотность тока в соединительных проводах и кабелях не должна превышать  $8 \text{ а/мм}^2$ ;

8) коэффициент использования разъемных элементов (штепсельных разъемов, высокочастотных фишек и т. п.) по току не должен превышать  $0,7 \div 0,8$ ;

9) коэффициент использования коммутационных элементов (контакты реле, переключателей, микровыключателей, галетных переключателей, контакторов и т. п.) по току не должен превышать 0,5.

При разработке АУС во всех случаях следует стремиться к упрощению схем, возможному для уменьшения надежности. Больших результатов для повышения надежности можно ожидать от применения функциональных стандартизованных узлов (подборок, модулей, ячеек) для сборки аппаратуры АУС [68]. Действительно, стандартизируются только хорошо отработанные схемы, все параметры которых известны из практики для всевозможных условий и режимов работы. Стандартизация схем ускоряет ремонт, поскольку приходится обнаруживать и заменять не неисправную деталь, а целый узел, что и проще и быстрее. Стандартизация уменьшает возможное влияние ошибок эксплуатационного персонала, увеличивает возможность включения в схемы автоматов для быстрого указания неисправности, а также дает ряд других выгод. В особенности перспективно применение стандартизованных схем, т. е. стандартизованных модулей в цифровой технике. Так, в электронной цифровой вычислительной машине TRANSAC S—2000 [66] вся логика построена из двух блоков: усилителя с общим эмиттером и эмиттерного повторителя.

При разработке АУС необходимо обеспечивать надежность системы питания в целом, а также, в частности, блоков питания, в особенности для электронных цифровых машин [66]. Блоки питания следует проектировать целиком на полупроводниковых приборах, что повышает их надежность

в несколько раз. При этом необходимо обеспечить надлежащий температурный режим (за счет вентиляции) и его контроль. Нагрузка на полупроводниковые приборы не должна превышать 50% от номинальной. Все элементы, предназначенные для схем выпрямителей и стабилизаторов, должны проходить обязательную тренировку (разграничивающие испытания). Должны разрабатываться специальные меры защиты от перегрузок и коротких замыканий для каждого источника питания. Так, например, на выход каждого источника следует ставить реле напряжения (желательно герметизированное), которое контролирует низшее и высшее допустимые значения напряжения, воздействует при выходе напряжения за допустимые пределы на основной выключатель, снимающий все напряжение, и подает аварийный сигнал. Общее питание должно включаться только после снятия блокировки с выключателя. Реле напряжения следует устанавливать и на входе (на переменном токе), чтобы предотвращать включение машины, а также выключать уже включенную, когда напряжение питающей сети выходит за допустимые пределы. Каждая внешняя нагрузочная шина должна иметь дополнительную защиту от перенапряжения в виде кремниевых стабилитронов.

Схемы стабилизаторов напряжения должны строиться таким образом, чтобы их мощные полупроводниковые триоды переходили в состояние насыщения по коллектору при внешних перегрузках и коротких замыканиях. При этом большие токи могут протекать по полупроводниковым триодам при небольшом рассеивании мощности в течение времени, достаточного для перегорания предохранителей. В качестве дополнительной защиты в первичную обмотку каждого силового трансформатора необходимо включать токовые магнитные выключатели. Быстрые изменения напряжения сети переменного тока могут пройти через относительно медленно действующий регулятор (если он есть) или же прямо на вход блоков питания и вызвать скачок напряжения на мощных полупроводниковых триодах. В этом случае напряжение на последних может превысить допустимое между коллектором и эмиттером.

Помимо этих правил построения схем можно указать еще и другие, позволяющие улучшить надежность.

1. Все схемы должны разрабатываться таким образом, чтобы они удовлетворительно работали при замене любого элемента и установке взамен него элемента того же типа и с теми же номинальными данными, удовлетворяющими ТУ. В технически обоснованных случаях допускается после такой замены подрегулировать схему, но только за счет специально предусмотренных элементов регулировки.

2. Схемы должны быть разработаны и испытаны с учетом возможных максимальных отклонений напряжения (например,  $\pm 10\%$ ) и частоты сети.

3. Схема должна быть составлена так, чтобы аппаратура не являлась источником радиопомех.

4. Должна быть предусмотрена защита от коротких замыканий.

5. Запрещается последовательное соединение накалов электровакуумных приборов.

6. Запрещается последовательное соединение сигнальных и осветительных ламп.

7. Необходимо обеспечивать достаточную мощность осветительных и сигнальных ламп.

8. Для повышения стабильности работы приемноусилительных ламп желательно (где это возможно) применять автоматическое смещение для первой сетки. Для тетродов и пентодов с той же целью рекомендуется включать сопротивление в цепь второй сетки.

9. Участок катод-подогреватель электровакуумных приборов необходимо шунтировать сопротивлением для исключения влияния нестабильности токов утечки через изоляцию подогревателя.

10. Между катодом и подогревателем рекомендуется подавать напряжение 25 в для уменьшения фона, вызванного питанием накала переменным током.

11. В схемах с анодной катушкой обратной связи рекомендуется брать индуктивность минимальной, а связь с колебательным контуром — возможно большей.

12. Все валики и соединительные муфты органов управления рекомендуется заземлять.

13. Рекомендуется предусматривать регулировку накала электровакуумных приборов.

14. Во всех необходимых местах следует предусматривать установку контрольных гнезд.

15. Следует предусматривать делители напряжения с проверочными точками для измерения напряжений свыше 1000 в.

16. Следует предусматривать блокировку и автоматические разрядные устройства для аппаратуры с напряжением свыше 50 в.

17. В цепях первых сеток ламп сопротивления утечки не должны превышать значений, указанных в ТУ на лампы.

Далее приводятся некоторые основные рекомендации по улучшению конструкции частей АУС. Более широко этот вопрос освещен в литературе [67, 69, 70]. Эти рекомендации следует применять в зависимости от условий проектирования.



## Общие рекомендации

1. Везде, где это возможно, следует добиваться применения материалов, деталей, элементов равной надежности (равной прочности).

2. Необходимо производить расчет нагревания и экспериментальную проверку теплового режима разрабатываемых изделий. Требуемый тепловой режим должен обеспечиваться любыми мерами даже за счет увеличения стоимости, веса или габаритов. Ниже перечислены некоторые меры, позволяющие облегчить тепловой режим. Рекомендуется применять массивные шасси, обеспечивающие хороший отвод тепла от элементов. Тепловыделяющие элементы следует крепить так, чтобы обеспечить теплоотдачу на шасси. Для этого в держателях ламп серии «Дробь» необходимо применять уплотняющую прокладку из вафельной фольги. Держатели должны быть припаяны к массивным металлическим пластинам. Силовые трансформаторы нужно крепить массивными пластинками, плотно соединенными с сердечниками. В залитых функциональных блоках все полупроводниковые триоды следует монтировать на массивных металлических платах. Проволочные постоянные сопротивления необходимо дельвать в металлические корпуса-радиаторы. Рекомендуется применять тепловые экраны (полированные) для защиты от тепловой радиации. Не рекомендуется электровакуумные изделия защищать пластмассовыми экранами и делать вентиляционные отверстия в крышках аппаратуры. Системы принудительной вентиляции обязательно должны иметь фильтры, защищающие от пыли. В любом случае все полупроводниковые приборы, рассеивающие более 100 мвт, должны быть установлены на специально рассчитанных радиаторах, имеющих черное покрытие. Поверхности внутри аппаратуры, принимающие тепло за счет радиации, должны быть окрашены в черный цвет, а соединения теплоотводов — плотными и обладать хорошей теплопроводностью. Тепловыделяющие элементы недопустимо устанавливать друг над другом. Следует предусматривать: охлаждение двигателей воздуходувок и вентиляторов, защиту на случай отказа воздушного охлаждения и перемешивание в герметизированной аппаратуре воздуха или газа. При расчете воздушного потока необходимо учитывать уменьшение сечения и отверстий за счет монтажных шнуров.

3. Аппаратура должна содержать устройства для учета числа часов работы и числа включений. Желательно иметь устройства, обеспечивающие учет этих параметров как по всей системе, так и по ее частям.

4. Обязательным вариантом компоновки аппаратуры должен быть узловой (модульный) метод.

### **Конструктивные рекомендации**

1. Конструкция блоков и узлов должна по возможности допускать осмотр и измерения во время эксплуатации как в обесточенном состоянии, так и под током (кроме высоковольтных устройств).

2. Желательно применять, где это возможно, катушки индуктивности с регулируемой магнитной проницаемостью вместо громоздких секционированных подстроечных конденсаторов.

3. Рекомендуются избегать фрикционных соединений и контактов давления.

4. Неэкранированные лампы необходимо разносить на 1,5 диаметра баллона.

5. При работе электровакуумных приборов в условиях вибраций и ударных ускорений, превышающих допускаемые ТУ, следует применять их дополнительную амортизацию.

6. Не рекомендуется делать кабельные вводы на передних панелях аппаратуры.

7. Для снижения центра тяжести аппаратуры тяжелые элементы располагают возможно ниже.

8. Панели должны закрепляться с помощью невыпадающих винтов.

9. Все винтовые крепления обязательно должны иметь стопорящую шайбу.

10. Номенклатура крепежа должна быть минимальной. Желательно, чтобы все винты имели один тип головки.

11. Съёмные узлы и детали рекомендуется изготавливать взаимозаменяемыми.

12. Все движущиеся части должны перемещаться легко и бесшумно, не создавая электрических помех.

13. Конструкция должна предусматривать защиту от помех и вредных излучений (свинцовое стекло перед экранами электроннолучевых трубок и т. п.).

14. Все органы заводской настройки, которыми не полагается пользоваться в эксплуатации, должны быть законтрены краской и отмечены соответствующими надписями.

15. Элементы и детали, подлежащие замене через определенный срок, обозначаются соответствующими пометками.

16. Вращающиеся узлы должны иметь указатели нормального направления вращения.

17. Количество типов специальных деталей и узлов должно быть минимальным, при этом целесообразно пользоваться стандартными или нормализованными деталями.

18. Обслуживаемая аппаратура должна иметь легкоъемные запоры.

19. Таблицы с основными сведениями, необходимыми при обслуживании системы, рекомендуется прикреплять к аппаратуре.

20. Конструкция аппаратуры должна предусматривать проведение операций только в правильной последовательности и исключать возможность поломки при ошибочном нарушении этой последовательности.

21. Механизмы, разбираемые при обслуживании, следует размечать для правильного восстановления взаимного расположения деталей при сборке.

22. Места для введения смазки должны быть легко доступны и заметно обозначены.

23. Дверцы и откидные крышки необходимо закруглять по углам, причем они должны сниматься с петель. Желательно предусмотреть защелки, удерживающие их в открытом положении.

### **Рекомендации, относящиеся к органам управления и индикации**

1. Количество органов настройки в аппаратуре должно быть минимальным.

2. Все органы производственной (технологической) регулировки должны иметь элементы фиксации, а их выводы должны быть пыленепроницаемы.

3. Следует предусматривать встроенные или переносные индикаторы повреждений (ИО).

4. Если в эксплуатации необходимо визуальное наблюдение в темноте, то применяют в аппаратуре только сигналы красного цвета.

5. Редко употребляемые органы управления должны быть доступны, когда аппаратура раскрывается для проверки. Регулировочные элементы должны иметь оси со шлицем для регулировки отверткой.

6. Системы освещения и индикации не должны давать отраженных бликов на деталях аппаратуры, для чего, в случае надобности, поверхности деталей следует снабжать покрытиями, исключающими зеркальные отражения.

7. Количество рукояток управления должно быть минимальным, желательно, чтобы они были по возможности однотипными, имели стандартную форму и цвет; их следует крепить на осях с помощью двух винтов.

8. Редко применяемые ручки управления и индикаторы необходимо закрывать дверцами или крышками.

9. Индикатор и соответствующий орган управления следует помечать одинаковыми надписями или условными обозначениями.

10. Ручки управления должны иметь обозначения, указывающие направление регулировки.

11. Форма, размеры, цвет, размещение и все прочие параметры органов управления и индикации должны удовлетворять требованиям инженерной психологии (§ 7.6).

### Рекомендации, относящиеся к монтажу

1. Рекомендуется везде, где это только возможно, применять печатный монтаж.

2. Отпайка всех соединений типового узла должна легко производиться в условиях эксплуатации (возможно применять специальный инструмент, например фигурный паяльник).

3. Рекомендуется применять кольцевой монтаж, чтобы обрыв провода в одной точке не приводил к прекращению работы схемы.

4. При монтаже необходимо на всех выходных колодках и разъемах иметь порядка 10%, но не менее двух резервных проводников.

5. Внутриблочные соединения рекомендуется выполнять пайкой или сваркой, избегая механических контактов.

6. Для борьбы с помехами следует во всех необходимых случаях применять экранирование проводов: в цепях для импульсов с крутыми фронтами, в цепях питания, в сеточных цепях первых каскадов усилителей и т. п. Экраны необходимо заземлять с обоих концов, в противном случае они работают как антенны. Желательно помимо этого заземлять дополнительно длинные экраны с шагом 0,5 м. Следует применять экранированные кабели с изоляционной оболочкой, защищающей экран.

7. За кабельные выводы разрешается крепить при монтаже только легкие детали весом менее 20 г.

8. Для дополнительного крепления следует широко применять лаки, клеи и смолы.

9. Внутренние соединительные провода должны быть собраны в жгуты и тщательно перевязаны тесьмой, пропитанной связывающим клейким составом. Жгуты следует крепить к шасси хомутиками из эластичных пластмасс.

10. При проходе проводов и кабелей через отверстия в металлических перегородках, необходимо защищать их от механических повреждений изоляционными втулками или обмазывать края отверстий толстым слоем эластичной смолы или лака.

11. Припаянные к выводам многожильные проводники должны быть укреплены так, чтобы вибрация не могла вызвать изгиба проводника вблизи места, где отдельные шины спаяны между собой.

12. Количество штепсельных разъемов должно быть минимальным.

13. Не следует соединять проводники вне мест крепления и крепить в одной точке более трех проводников.

14. Не следует натягивать гибкие проводники во избежание обрыва от тряски.

15. При монтаже нельзя применять кислотные и другие припои и флюсы, которые могут вызвать коррозию.

16. Проводники должны иметь цветную маркировку.

17. Выступающие наружу штыри разъемов не должны быть под напряжением.

18. Все элементы следует маркировать согласно принципиальной схеме.

### **Меры защиты от высокой влажности**

1. Самой надежной защитой является герметизация аппаратуры. Предпочтительно герметизировать аппаратуру в целом, а не по элементам.

2. В герметизированной аппаратуре следует предусматривать установку влагопоглотителей.

3. В случае, если невозможно герметизировать всю аппаратуру, это следует проделать с наиболее важными ее элементами, узлами или блоками.

4. Рекомендуется применять пропитку и заливку элементов и узлов специальными составами.

5. Все металлические детали необходимо предохранять от влаги при помощи специальных гальванических и лакокрасочных покрытий; желательно применять одновременно оба вида покрытия.

6. Все неметаллические материалы, являющиеся в какой-то степени гигроскопичными (текстолит и т. п.), следует либо заменять на негигроскопичные (стеклотекстолит и т. п.), либо подвергать специальной обработке (например, бакелизации).

7. В герметизированной аппаратуре обязательна тщательная герметизация вводов кабелей и проводов.

8. Все блоки необходимо после окончания монтажа и настройки покрывать специальными лаками или же, при малом тепловыделении, заливать специальными пористыми составами, что предохраняет также от механических воздействий.

9. Все составы, употребляющиеся для защиты от влаги (лаки и т. п.), должны содержать вещества, препятствующие образованию грибов (плесени).

10. Для хранения аппаратуры должна разрабатываться специальная тара, как, например, специальные герметичные чехлы из полихлорвинилового пластиката. Внутри подобных чехлов необходимо помещать влагопоглотитель. Перед герметизацией аппарата должна проходить специальную обработку — консервацию (специальная смазка или покрытие специальным лаком). Для возможности суждения о наличии влаги внутри герметичной тары необходимо применять специальные сигнальные (индикаторные) патроны.

11. В любом герметизированном изделии необходимо предусматривать два отверстия: для подачи внутрь сухого горячего воздуха и проверки герметизации.

12. Необходимо предусматривать возможность замены или исправления выводов из герметизированной аппаратуры без нарушения герметичности.

13. Желательно обеспечить возможность замены химических патронов для сушки воздуха без нарушения герметичности.

### **Рекомендации, относящиеся к материалам**

1. Следует избегать ввинчивания алюминиевого крепежа в алюминиевые детали.

2. Нельзя применять ядовитые или гигроскопичные материалы, а также материалы, способствующие появлению грибов.

3. Необходимо применять небьющиеся стекла.

4. При конструировании нужно учитывать различие температурных коэффициентов материалов.

5. Все уплотняющие детали должны изготавливаться или из специальной температуростойкой резины или из фетра со специальной пропиткой против моли.

6. Для изоляции проводов, подходящих к штепсельным разъемам, следует применять фторопластовые трубки.

7. Во всех случаях при монтаже рекомендуется в малогабаритной аппаратуре применять провода с теплостойкой изоляцией и изоляционные трубки из фторопласта.

### **§ 7.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ**

Для обеспечения надежности изделий необходимо общее повышение культуры производства и проведение специальных организационно-технологических мероприятий. Одним из важнейших мероприятий, способствующих повышению надежно-

сти изделий, является автоматизация изготовления, сборки и наладки. Обычно при экономическом обосновании выгоды автоматизации производства не учитывают ее влияния на надежность продукции. Между тем применение автоматизации полностью исключает влияние субъективного фактора и обеспечивает стабильность параметров.

Утомляемость рабочих является самым распространенным источником появления брака всех видов за счет произвольных ошибок. Следует принимать все меры для ее снижения в особенности на операциях сборки и установки АУС, где в большинстве случаев применяется ручной труд.

К специальным технологическим мерам повышения надежности АУС следует отнести внедрение новых прогрессивных методов изготовления деталей, элементов, узлов и блоков (§ 7.3). Одной из относящихся сюда операций является пайка. Поскольку надежность всех прочих элементов значительно возрастает, схемы усложняются, количество паек увеличивается (даже при применении печатных схем), а надежность паек не возрастает, в результате чего число отказов, зависящих от надежности паек, составляет все большую часть общего числа отказов систем. В элементах или узлах, которые не подвергаются ремонту в эксплуатации, а заменяются при отказе целиком, пайку следует заменять сваркой. Как показывает опыт, разъемные соединения являются частым источником отказов, главным образом образуют неустойчивых. Так, в устройствах радиоэлектроники и АУС в различных условиях эксплуатации наблюдалось появление неустойчивых контактов в ламповых панелях. Как правило, персонал, обслуживающий эти объекты, после долгой и безуспешной борьбы с отказами прибегал к запайке контактов. Отсюда следует, что во всех случаях, где это возможно, целесообразно применять лампы с гибкими выводами, присоединяемыми к схеме пайкой или сваркой, т. е. неразъемным соединением [71].

Важным технологическим приемом повышения надежности являются разграничивающие испытания, состоящие в создании температурных, электрических и механических нагрузок по отдельности или в различных комбинациях для выявления элементов, параметры которых выходят за допустимые пределы, причем остальные элементы не подвергаются разрушению [72].

Для большинства видов АУС характерно наличие периода приработки, когда интенсивность отказов  $\lambda$  сравнительно велика из-за технологических дефектов аппаратуры и ее элементов (§ 2.4). С целью стабилизации свойств аппаратуры и устранения возможности попадания в эксплуатацию систем, находящихся в стадии приработки, что особенно опасно для

аппаратуры разового действия, следует прибегать к приработке систем до начала эксплуатации. Типичная кривая распределения интенсивности отказов  $\lambda$  во времени для аппаратуры с большим сроком службы представлена на рис. 2.9. Участок приработки характеризуется повышенной интенсивностью отказов, обусловленных скрытыми технологическими дефектами монтажа и сборки, регулировки, плохим качеством элементов и материалов и т. п. Этот участок по ориентировочным данным лежит в пределах от 0 до  $70 \div 100$  час для электровакуумных приборов и многих видов аппаратуры в целом. Для конденсаторов и сопротивлений этот участок, также по ориентировочным данным, находится в пределах от 0 до  $200 \div 400$  час.

### § 7.5. ЗАВИСИМОСТЬ НАДЕЖНОСТИ ОТ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА

Наряду с системами комплексной автоматизации (§ 1.2), по отношению к которым человек осуществляет лишь наблюдение за их работой, существуют системы полуавтоматического типа, работающие с участием человека-оператора, выполняющего те или иные функции управляющей системы. В некоторых случаях такое участие оператора в работе управляющей системы необходимо, когда, например, недопустимо срабатывание вследствие ложного сигнала, могущее привести к катастрофическим последствиям, или когда возможно возникновение неожиданных ситуаций, в которых машина не может найти решения или сделать это достаточно быстро. Оператор должен: 1) принимать сигналы; 2) критически осознать значение этих сигналов; 3) принимать решение о действиях, требуемых ими; 4) производить эти действия. Понятно, что на работу оператора налагаются физиологические и психологические ограничения. Первые три операции занимают некоторое время, зависящее, с одной стороны, от вида и количества принимаемой информации, а с другой стороны, — от свойств оператора. Четвертая операция определяется передаточной функцией оператора. Для ее составления в тех случаях, когда от оператора требуется механическая реакция (например, движение руки), его можно рассматривать как линейное звено второго порядка с постоянными параметрами [73]. Для более точного описания, дающего возможность, в частности, учесть изменение передаточной функции вследствие усталости оператора, требуется введение переменных коэффициентов [74].

Оператор может действовать неточно. Точность его работы зависит от его индивидуальных качеств и от условий, в которых он находится в системе. От этих же факторов



зависит, следовательно, и надежность всей управляющей системы.

Изложенные обстоятельства требуют изучения управляющих систем типа «человек-машина». Такими системами являются все АУС, поскольку человек контролирует их работу. Человек, участвующий в работе управляющей системы, является как бы элементом этой системы [75, 76]. В частности, это может быть система переработки информации, участие человека в которой упрощает и удешевляет ее, но вместе с тем служит источником ошибок. Вероятность ошибок, зависящих от оператора, существенно уменьшается при правильном конструировании системы. Психологический аспект этой проблемы исследует новая наука — инженерная психология [77]. Оператор рассматривается при этом, как часть системы, охваченная обратной связью, существующей в центральной нервной системе человека. Эта часть управляющей системы принципиально отличается от машинной части. Действия человека имеют своей основой знания, как правило, более разносторонние, чем информация, которой могут оперировать машины. Это делает исследование системы «человек-машина» весьма трудным [78], хотя возможна даже ее оптимизация [79].

Предложены, однако, некоторые методы оценки влияния человека на работу управляющей системы и на ее надежность. Следует заметить, что участие оператора может быть различным в зависимости от степени автоматизации системы. Количественно это различие определяется числом операций, которые должен производить оператор. Каждая операция характеризуется некоторым значением вероятности того, что оператор выполнит ее правильно, или, что то же, частотой совершаемых им ошибок [80]. Произведение вероятностей всех операций, требуемых от человека в рассматриваемой системе, характеризует вероятность безотказной работы оператора, если допускать для упрощения, что операции независимы. Зная вероятность безотказной работы машины, можно вычислить вероятность безотказной работы всей системы, в простейшем случае равную произведению вероятностей, характеризующих оператора и машину [81].

Вероятность безотказного выполнения какой-либо операции человеком зависит как от видов этой операции, так и от подготовленности к ней оператора, его опыта, знаний, возраста и физического состояния (в частности, от усталости), настроения и т. п. Учесть все эти обстоятельства заранее невозможно, поэтому при проектировании следует исходить из предположения, что оператор определенной квалификации находится в нормальном состоянии. Следует также учитывать условия предстоящей эксплуатации проектируемой

системы. Сюда относятся такие факторы, как освещение, шум, давление, влажность и т. п. Влияние различных факторов на поведение человека установлено экспериментально. Определены также оптимальные параметры различных связей оператора с машиной. Существующие виды таких связей (рукоятки, педали, кнопки, перфорированные карты, световые и звуковые сигналы и т. п.) могут быть заменены в будущем электрической связью нервной системы человека с принимающими элементами машины [82]. Усовершенствование существующих связей (например, замена стрелочных приборов цифровыми) уменьшает количество ошибок и ускоряет работу оператора.

Одной из важных задач, возникающих при проектировании систем «человек-машина», является организация совместной работы оператора и быстродействующей цифровой вычислительной машины (БЦВМ). Здесь возможны два варианта. По первому из них БЦВМ собирает, обрабатывает и хранит информацию, которой по мере надобности пользуется оператор. По второму варианту БЦВМ, кроме того, принимает решения и выдает управляющие команды, делая это по имеющейся в ней программе или по заложенным в нее критериям, а оператор, контролируя процесс, отменяет, если находит нужным, эти команды или изменяет программу и критерий в БЦВМ. В последнем случае в особенности важно иметь в виду скорость, с которой человек способен правильно принимать информацию. Найдено, что при наблюдении по приборам человек способен правильно принимать поток информации, не превышающий  $1 \text{ дв. ед./сек.}$  Из-за этого ограничения оператор может тормозить работу системы. Поэтому применяют вспомогательные преобразователи, уменьшающие поток информации, который должен принимать оператор. Простейшим преобразователем такого рода является прибор, печатающий результаты измерений в удобной для обозрения и истолкования форме и вычисляющий по ним нужные величины [83]. Более совершенные устройства должны автоматически вырабатывать ту или иную часть суждений оператора, корректирующего работу БЦВМ. Это особенно важно в тех случаях, когда недопустимо промедление [84].

## § 7.6. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕРЫ

Эксплуатационная надежность АУС в значительной степени определяется конструктивной ее надежностью, но любая, даже самая надежная система при неправильной эксплуатации может быть доведена до очень ненадежного состояния. При эксплуатации необходимы мероприятия, обеспечи-

вающие поддержание надежности имеющейся аппаратуры АУС на некотором практически достижимом и целесообразном уровне. Часть этих мероприятий должна быть направлена на уменьшение числа отказов, как случайных (за счет ослабления приводящих к ним воздействий), так и возникающих вследствие износа (за счет профилактики). Часть же мероприятий способствует повышению ремонтоспособности системы.

Помимо этого в эксплуатации АУС необходимо собирать статистические сведения о надежности систем и элементов, чтобы разрабатывать требования, предъявляемые к проектированию новых, более надежных систем. Опыт эксплуатации дает предпосылки для дальнейшего развития теории надежности и ставит перед ней новые задачи.

Важнейшее значение для повышения эксплуатационной надежности имеет надлежащим образом подготовленный персонал (§ 7.5) и организация соответствующих профилактических мероприятий. Следует также иметь в виду, что система, не обеспеченная качественной эксплуатационной технической документацией, имеет меньшую надежность по сравнению с расчетной.

При эксплуатации важно помнить, что никакое описание не может быть исчерпывающим, а тем более при выпуске его на стадии разработки аппаратуры. Пока аппаратура не подверглась всесторонней проверке в условиях реальной эксплуатации, даже самому опытному разработчику не ясны все тонкости ее работы, а тем более характер и причины даже наиболее часто встречающихся отказов.

Для подготовки эксплуатационного персонала следует еще на стадии проектирования и в процессе испытаний опытных образцов АУС разработать программы обучения операторов и повышать их квалификации путем систематических занятий и тренировок. Подбор операторов необходимо производить с учетом медицинских требований и желательного образования — общего и специального.

К профилактическим мероприятиям относится планово-предупредительный ремонт и осмотр (регламентные работы и функциональный контроль), организация аварийного, а также среднего и капитального ремонта, организация снабжения запасными частями (ЗИП)<sup>1</sup>, а также приборами и приспособлениями.

Регламентные работы и функциональный контроль должны понижать частоту отказов системы путем их своевременного предупреждения, в частности — путем их своевременного

---

<sup>1</sup> ЗИП — запасные части, инструмент, принадлежности и материалы.

обнаружения или прогнозирования. Для прогнозирования отказов служит метод граничных испытаний (§ 7.3). При эксплуатации этот метод позволяет выявить элементы, работающие на пределе допуска. Далее производится замена или регулировка таких элементов. К профилактическим мероприятиям относится также плановая замена элементов и деталей с повышенным износом.

Возможность быстрого устранения состояния отказа в аппаратуре определяется прежде всего ее конструкцией и характеризуется ремонтпригодностью (§ 3.1), которую в эксплуатации повысить невозможно.

Запасные части и принадлежности должны соответствовать количеству элементов, их номинальным данным и интенсивности их отказов для данной АУС с учетом случайного характера отказов; желательно иметь все номиналы величин, во всяком случае в каком-то базовом ЗИПе. Запасные изделия и принадлежности должны быть уложены в ящики, допускающие осмотр и позволяющие быстро отыскивать нужные элементы (необходимы четкие этикетки на ящиках, желательно с рисунками). К каждому комплекту ЗИПа должен прикладываться альбом с эскизами запасных частей и их наименованием. Запасные части подлежат периодической проверке (в особенности сложные) и замене по истечении срока хранения.

Важным фактором обеспечения эксплуатационной надежности является наличие надлежащей испытательной аппаратуры, инструмента и приспособлений. Перечень необходимых приборов, инструментов и приспособлений должен быть составлен еще на стадии проектирования. Отсутствие необходимых инструментов и приспособлений даже простейших типов, но соответствующего качества и размеров, приводит, как правило, к замене их более плохими, или менее удобными, что неизбежно снижает эффективность ремонтных работ, а в некоторых случаях вызывает дополнительные отказы. Так, например, при работе с полупроводниковым оборудованием применение стандартных средств технического контроля резко увеличивает интенсивность отказов [66]. Причина этого — случайные подачи недопустимых напряжений на полупроводниковые цепи из-за применения обычных щупов и зажимов типа «крокодил».

## § 7.7. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Повышение производительности труда зависит от повышения надежности выпускаемой продукции, так как рост ее надежности равносителен значительному увеличению выпуска с относительно небольшим увеличением затрат.

Как известно, наука только тогда становится наукой, когда в нее вводится математический аппарат, дающий возможность, в частности, количественно оценивать ее основные положения [85]. В настоящее время можно говорить о возникновении науки о надежности, поскольку надежность перестает быть только качественным понятием (§ 1.1). Этот процесс следует стимулировать в организационном порядке, устанавливая нормативы надежности на разрабатываемую и изготовляемую продукцию.

Ниже намечен ряд организационных мер, необходимых для того, чтобы способствовать ускорению практического решения проблемы надежности в производстве АУС. На рис. 7.6 приведена примерная схема обмена информацией о надежности. На рис. 7.7 — схема построения службы на-

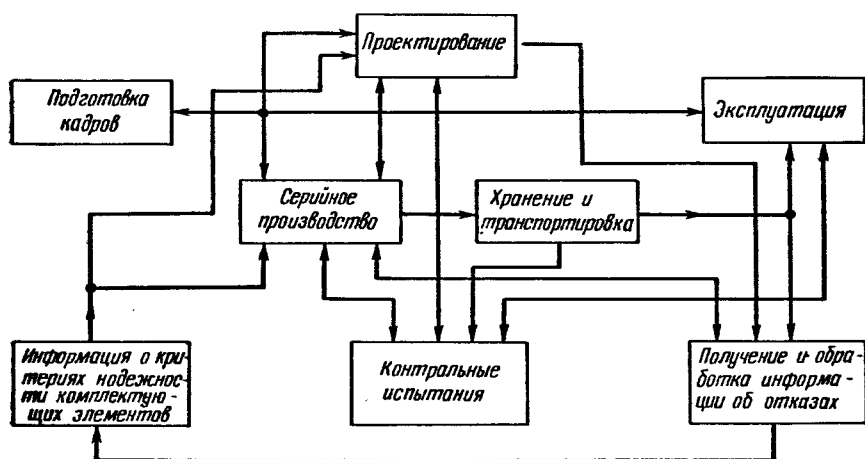


Рис. 7.6. Схема обмена информацией о надежности

дежности, которая должна быть создана в организациях, проектирующих АУС, для успешного решения задач надежности. Как видно из схем, служба надежности является органом, контролирующим и определяющим работу всех других служб и подразделений в части обеспечения надежности и повышения ее уровня. Структура отдела надежности проектной организации представлена на схеме рис. 7.8. Отдел состоит из четырех подразделений: лаборатории испытаний, лаборатории статистического анализа, расчетной группы и группы обобщения и разработки мероприятий.

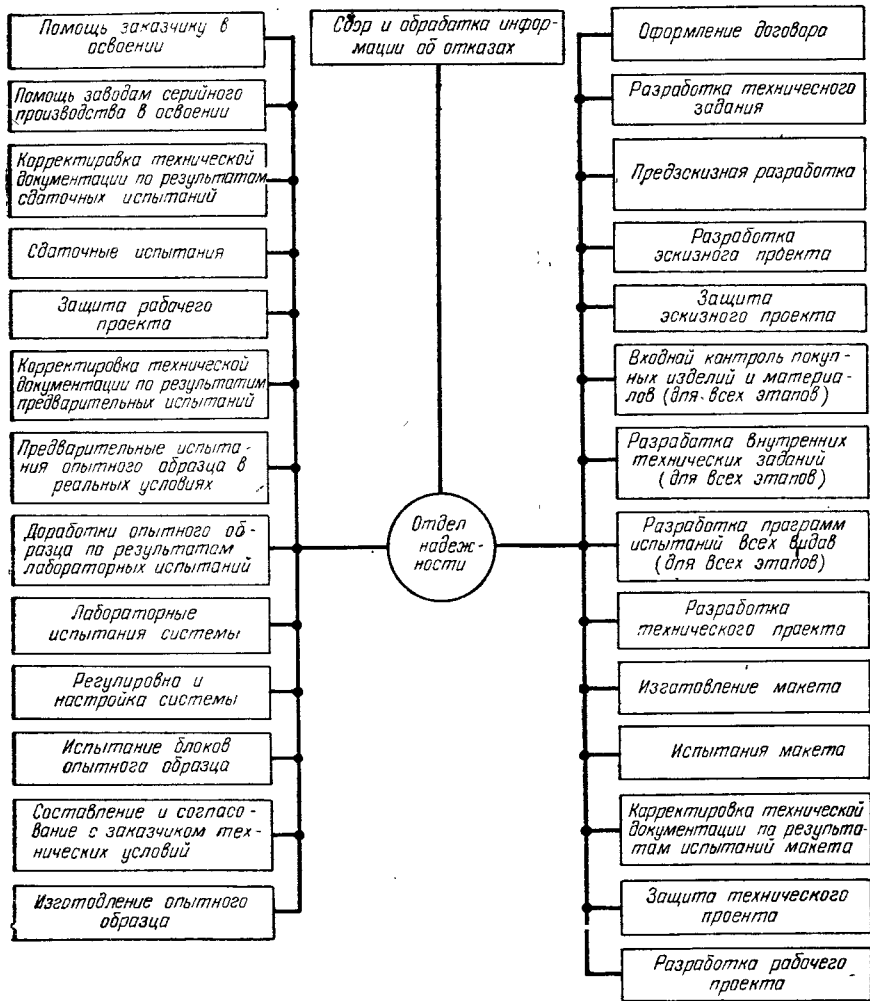


Рис. 7.7. Схема службы надежности

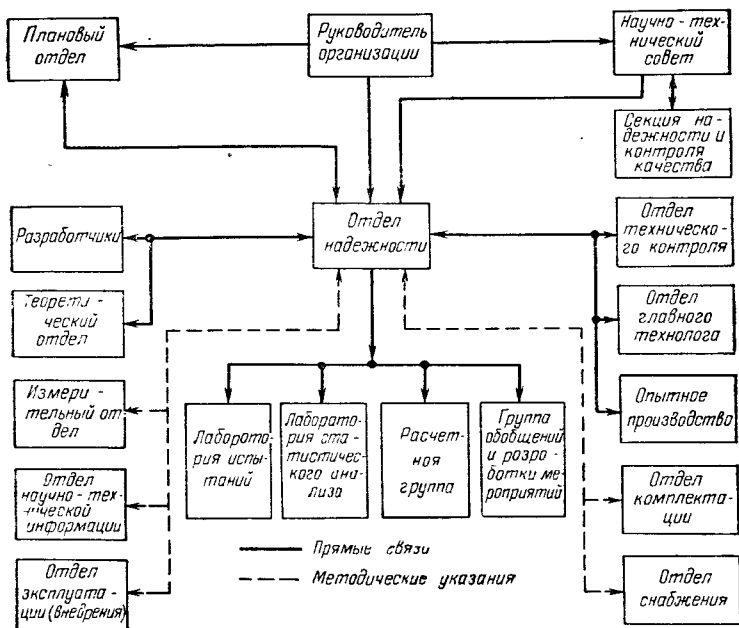


Рис. 7.8. Структура отдела надежности

## § 7.8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Одной из существенных причин, обуславливающих высокие требования, предъявляемые к надежности космических систем, является высокая стоимость космических объектов. Поэтому для космических систем, например для спутников, применяемых в качестве средств связи, является экономически оправданным значительно большее повышение надежности, чем в других случаях. Это, по-видимому, не может быть достигнуто применением обычных средств и проверок. Еще более важным становится фактор надежности при запуске космических объектов с людьми.

Одна из наиболее существенных проблем современной космической электроники — проблема разрушаемости элементов, связанная с наличием особых эксплуатационных условий в космических полетах. В плане решений этой проблемы производится разработка специально для космических объектов нового класса элементов сверхвысокого качества и очень высокой стоимости [86]. Эти специальные детали отличаются от деталей обычного применения по следующим показателям:

1. Элементы космического назначения должны быть очень устойчивыми к внешним воздействиям, которые могут встретиться в космосе. Не следует полагаться на разного рода защитные меры (охлаждение, экраны, изоляция и т. п.). Все защитные устройства могут быть повреждены, и более прочная деталь сможет работать и в таких внезапно ухудшившихся условиях.

2. Надежность этих элементов в эксплуатационных условиях должна быть так высока, чтобы интенсивность отказов не превышала примерно 0,001% на 1000 час работы. Считается, что космический объект должен работать безотказно на протяжении 15 000—26 000 час. В ближайшем будущем следует ожидать, что этот срок будет увеличен по крайней мере вдвое. А для дальних космических полетов будет вполне обычным непрерывная безотказная работа объекта на протяжении 10 лет [86].

3. Характеристики элементов космического назначения должны удовлетворять габаритным, весовым и энергетическим ограничениям. Все элементы должны иметь наименьшие размеры, вес и потребляемую мощность.

Одним из условий обеспечения высокой надежности аппаратуры космических объектов является надлежащий выбор материалов, способных выносить физические условия, действующие в космосе.

К этим условиям относятся: высокий, практически абсолютный вакуум (значения давления для разных высот приведены в табл. 7.1 [87]), излучение Солнца — рентгеновское (интенсивность 0,1—0,2 мквт/см<sup>2</sup> в диапазоне волн 7—60 Å), ультрафиолетовое (в диапазоне до 100 Å) и др.

Отдельным областям космического пространства соответствуют особые условия. Вокруг Земли существуют два радиационных пояса (пояса Вернова — Ван Аллена) и поток заряженных частиц.

Таблица 7.1

Зависимость давления от высоты

Высота, км	15 250	30 500	61 000	91 500	305 000
Давление, Г/см <sup>2</sup>	120	11,1	$32,6 \cdot 10^{-2}$	$18 \cdot 10^{-4}$	$18,2 \cdot 10^{-9}$

В различных случаях проявления солнечной активности возникают интенсивные потоки ионизирующей радиации, состоящей из протонов, ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Кроме этого, всюду действуют космические лучи. Встречаются также и потоки микрометеорных частиц. На



больших высотах существует слой озона с высокой концентрацией.

При обеспечении высокой надежности следует учитывать и такие факторы, как невесомость и воздействие диссоциированных газов. Чрезвычайно важными факторами являются удары, ускорения и вибрации при запуске космических объектов, а также изменения температуры в широких пределах

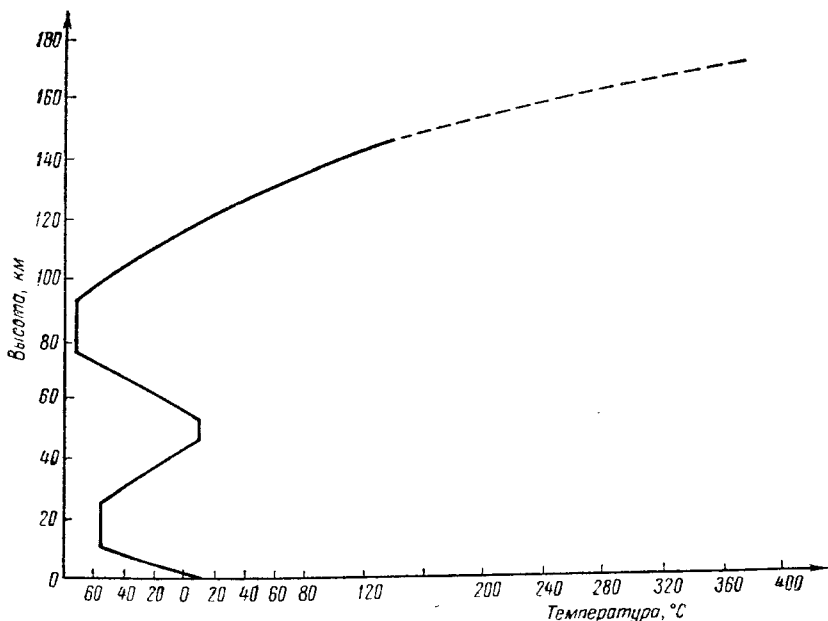


Рис. 7.9. Зависимость температуры атмосферы от высоты

и с высокой скоростью, имеющие место как при запуске, так и при посадке, а в некоторых случаях и в полете.

Основными причинами возникновения высоких перепадов температур являются:

1) изменение температуры атмосферы в зависимости от высоты (рис. 7.9) [87];

2) нагрев при прохождении через плотные слои атмосферы;

3) выделение тепла работающей бортовой аппаратурой;

4) нагрев вследствие поглощения солнечной радиации.

В вакууме космического пространства происходит интенсивное испарение смазочных материалов, пластификаторов и присадок, а также жидких металлов (ртуть). При нагреве в вакууме могут испаряться и другие металлы, например маг-

ний, кадмий и цинк. Эти материалы можно применять в космических устройствах только в следующих случаях: когда они находятся в эксплуатации при низкой температуре, когда применяются в виде массивных конструкций и при условии покрытия другим, менее летучим материалом. Размеры деталей из легко испаряющихся материалов при работе в вакууме будут изменяться; кроме того, вероятно появление конденсации частиц этих материалов на более холодных деталях космической аппаратуры, что может вызвать отказы вследствие загрязнения электрических контактов, коррозии деталей, коротких замыканий и т. п.

Полимерные материалы не испаряются при работе в вакууме, кроме тех случаев, когда они работают при температурах, близких к точке их разложения. Добавляемые к большинству полимерных материалов пластификаторы достаточно легко испаряются в вакууме, что вызывает изменение свойств пластмассовых материалов. Например, полиэтилен, пластифицированный диоктилфталатом, становится в вакууме весьма хрупким вследствие возгонки пластификатора.

Свойства ряда материалов в вакууме изменяются. Прочность некоторых металлов в вакууме увеличивается, тогда как у других уменьшается, изменяются также характеристики усталости и ползучести. Обычное стекло в вакууме (при давлении  $10^{-5}$  мм рт. ст.) имеет прочность в 3 раза более высокую, чем при нормальном атмосферном давлении. Очень большое влияние на прочность некоторых металлов в вакууме оказывает состояние их поверхности.

В вакууме между токонесущими деталями могут возникнуть коронные и дуговые разряды и пробой изоляторов. В табл. 7.2 приводятся экспериментальные данные о величине пробивного напряжения в зависимости от плотности воздуха и расстояния между электродами в соответствии с законом Пашена [112].

Таблица 7.2

Зависимость пробивного напряжения от плотности воздуха и расстояния между электродами

Амплитуда пробивного напряжения, кВ	Произведение расстояния между проводниками (см) на плотность воздуха, отнесенную к плотности при давлении 1 мм рт. ст. и температуре 20° С
1,8	0,1
0,4	0,5
1,7	20,0
70,0	2000,0

Хотя влияние влажности нельзя считать сколь-нибудь разрушительным на высоте над уровнем моря свыше 10 000 м. однако оно все же представляет собой серьезную проблему для АУС, установленных на космических кораблях.

Для космической радиоэлектронной аппаратуры серьезной проблемой является потеря влаги. Вместе с тем проблема влажности в обычном ее понимании тоже очень важна, если космическая аппаратура изготавливается в условиях обычной или повышенной влажности и хранится в течение продолжительного времени в обычных складских условиях.

По мере падения давления в первую очередь улетучиваются водяные пары, содержащиеся в воздухе. Затем усиливается выход паров и газов из органических материалов. Сюда относятся органические газы с большим молекулярным весом, выделяемые изоляционными материалами, и пары других химических элементов, в частности применяемых в негерметизированных батареях электропитания.

Изоляционные материалы в этих условиях несомненно меняют к худшему свои механические свойства, но их электрические характеристики должны улучшаться. Скользящие контакты при этом не получают никакого улучшения, наоборот, для контактов создается дополнительное электрическое сопротивление за счет увеличения концентрации (хотя бы временной) органических паров. Все элементы, действие которых основано на химических реакциях (как например, сухие электрические батареи) при этом выходят из строя. Механические изменения в защитной изоляции в таких элементах, как поверхностные тонкопленочные сопротивления, весьма ощутимы и вредны.

Большую опасность представляет взаимодействие металлов (железа, меди, серебра) и органических материалов с диссоциированными газами. Результатом такого взаимодействия будет быстрое окисление металлов и органических материалов. Как исключение можно привести алюминий, поверхность которого постоянно покрыта оксидной пленкой. При попадании деталей из алюминия в среду, содержащую выделившиеся диссоциированные газы, происходит лишь некоторое утолщение оксидной пленки.

Можно ожидать, что при полете космических объектов через слой озона будет иметь место его химическое воздействие на некоторые материалы (например, на резину), вследствие чего могут измениться свойства этих материалов. Вообще одной из наиболее вероятных причин отказов элементов бортовой аппаратуры при длительной работе является взаимодействие тех или иных материалов с некоторыми реагентами, содержащимися в окружающей среде в условиях наличия радиации.

Воздействие на аппаратуру корпускулярных и радиационных потоков проявляется в изменении свойств материалов, в особенности полупроводников, из которых, в частности, изготовляются солнечные батареи.

Наиболее сильное влияние оказывает радиация на материалы кристаллической структуры. Вытеснение атомов приводит к необратимым дефектам кристаллической решетки. Возникает также трансмутация ядра. Происходящая при этом ионизация характеризуется определенным периодом времени, в течение которого электроны в проводящей области возвращаются на более стабильный уровень. Количество электронов в проводящей области зависит от вида и дозы радиации.

Во многих случаях можно ожидать появления вторичных эффектов в электронных схемах, удаленных от элементов, подвергшихся действию радиации, из-за наличия электрических связей.

Необратимые (остаточные) эффекты радиации в большинстве своем зависят от типа материала и проявляются в изменении удельного сопротивления или других физических свойств (например, при превращении германия *n* типа в германий *p* типа). Наблюдаются также увеличение хрупкости проводников, изменение частоты колебаний кварцевых кристаллов, наведение напряжения и химические изменения [113].

Радиация оказывает воздействие на характеристики различных коммутационных элементов, вызывая выход их из строя вследствие появления усталости в металлических пружинах [87]. Под влиянием радиации изменяется физическое состояние (образуются поверхностные пленки или происходит деполимеризация) пластических материалов, входящих в конструкцию коммутационных элементов и пленочных конденсаторов.

Металлические проводники обычно хорошо переносят воздействие радиации. Изолированные провода и кабели испытывают влияние радиации уже из-за изменения сопротивления их изоляции. Так, например, под действием радиации ощутимо падает сопротивление полиэтиленовой изоляции.

Сопротивления всех видов отличаются значительной стойкостью к воздействию радиации.

Конденсаторы разных типов различно реагируют на влияние радиации. Эффект воздействия радиации сказывается главным образом на диэлектрике. Органические диэлектрики под действием радиации разлагаются, обугливаются или полимеризуются; неорганические — более устойчивы. Слюдяные, керамические и стеклянные конденсаторы без заметных изменений выдерживают воздействие потоков нейтронов; параметры же пластмассовых и бумажных конденсаторов при

этом заметно меняются; еще более это относится к бумаго-масляным и тантановым конденсаторам [88]. Металлические обкладки (пленки, фольга) всех видов конденсаторов мало подвержены действию радиации. Иногда наблюдается разрушение под действием радиации контактов выводов с фольгой (в бумажных конденсаторах). Электролитические конденсаторы с содержанием бора, имеющего большое сечение захвата нейтронов, выдерживают только малые дозы облучения. Наблюдается высыхание электролита электролитических конденсаторов и исчезновение ионов. Твердые диэлектрики, изготовленные из окиси алюминия, окиси магния или нитрата бора, подвержены малым изменениям в статическом потоке излучения. При импульсном облучении у этих конденсаторов наблюдается уменьшение сопротивления утечки, вероятно, вследствие резкого увеличения ионизации диэлектрика.

Варисторы и купроксные или селеновые выпрямители очень чувствительны к радиации. Вероятной причиной этого является изменение оксидной пленки под действием заряженных частиц и появление вторичных продуктов соударения.

При больших дозах облучения заливочные компаунды трансформаторов (обычно органические) претерпевают заметные химические изменения и начинают выделять газы. Органическая межвитковая изоляция подвержена тем же изменениям, вследствие чего может иметь место ее пробой.

Инфракрасные детекторы, изготовленные из PbS, PbSe и InSb, подвержены действию облучения, приводящего к уменьшению отношения сигнал/шум, которое падает до нуля при больших дозах. Материал, из которого делают прозрачные окна детекторов, например  $\text{CaF}_2$ , под действием облучения теряет прозрачность, однако этот эффект значительно меньше выражен, чем изменение отношения сигнал/шум [88].

Полупроводниковые материалы, например германий и кремний, чувствительны к радиации. Нейтронное облучение в большой степени воздействует на кристаллическую решетку, вызывая ее нарушения, которые приводят к сокращению времени жизни неосновных носителей. Гамма-радиация производит большей частью поверхностные изменения. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы [89]:

а) полупроводниковые триоды с узкой базой (т. е. высокочастотные) лучше переносят воздействие нейтронной радиации, так как они обладают меньшей массой, подвергающейся облучению. Полупроводниковые триоды с узкой базой дают возможность неосновным носителям, инжектированным под действием радиации, пройти через базу без рекомбинации. Отсутствие рекомбинационных дефектных сечений удлиняет срок службы полупроводниковых триодов;

б) не совсем точно установлено, влияет ли лучшая обработка поверхности на стойкость полупроводниковых триодов против гамма-облучения. Высокочастотные типы полупроводниковых триодов под действием гамма-облучения ведут себя не лучше других;

в) более высококачественные типы полупроводниковых триодов изменяются сильнее под действием радиации. Кремниевые полупроводниковые триоды реагируют на воздействие радиации менее, чем германиевые.

Если отсутствует кислород, то воздействие ультрафиолетового излучения на различные материалы, в том числе и на пластические, не сказывается. Его воздействие на некоторые пластики в присутствии кислорода можно уменьшить добавлением в материалы ультрафиолетовых ингибиторов [86].

Хотя вероятность встречи с метеорами даже малого размера очень невелика, все же следует, при выборе способа установки аппаратуры на космических объектах учитывать возможность воздействия на нее микрометеоров. Попадание микрометеоров на какое-либо тело вызывает появление на его поверхности множества мелких углублений, которые могут сильно ухудшить характеристики таких элементов, как солнечные батареи и т. п., а также оптических систем. Как показывает опыт запуска космических объектов, вредное воздействие наблюдается даже при столкновении с частицами, вес которых не превышает  $10^{-16}$  г [87].

Применение подшипников и смазочных материалов в условиях космоса связано со специфическими трудностями. Так, под влиянием радиации в вакууме происходит возгонка отдельных компонентов смазочных материалов и холодная сварка деталей подшипников, а также химические изменения их материалов. Сухие металлические подшипники в обычных условиях работают с использованием воздушной подушки; в условиях вакуума этот воздушный слой отсутствует и в соприкасающихся металлических частях начинаются процессы диффузии (холодной сварки), приводящие к заклиниванию движущихся деталей. Действие графитовых смазок, широко применяющихся в приборостроении, зависит от связанной воды или адсорбированного атмосферного кислорода и азота. В вакууме графитовые составы, лишенные воды, кислорода и азота, приобретают абразивное действие. Для работы в вакууме был испытан и рекомендован смазочный состав, изготовленный из дисульфида молибдена [86].

С целью повышения эксплуатационных характеристик подшипников на космических объектах рекомендуется применять [86]:

1) системы принудительной подачи малолетучей смазки для восполнения ее потерь;

2) материалы типа тефлон, которые обладают антифракционным действием. Известны подшипники для космических объектов с шариками из стеллита, бегунами из пирокерама и обоймой из тефлона;

3) для шариков специальные покрытия из мягких и тягучих металлов (барий, золото или серебро), которые служат смазкой в процессе их истирания.

Вибрации, ускорения, удары при запуске и посадке космических объектов и состояние невесомости в процессе полета также воздействуют на материалы и элементы. Ускорения и удары нарушают регулировку сбалансированных элементов (реле и т. п.), приводят к появлению перенапряжений в материалах конструкций и блоков, а иногда и полному их разрушению. Вибрации опасны вследствие возможности возникновения механических резонансных колебаний. Как показывают эксперименты, резонансные частоты мелких деталей весом 0,3—11,3 г с длиной выводов 30 мм и диаметром их 0,65—1,07 мм лежат в пределах от 200 до 450 гц. При уменьшении длины выводов до 12 мм резонансная частота повышается до 1000—1500 гц [87].

При выборе материалов для изготовления деталей аппаратуры АУС космических объектов весьма важно знать, будет ли эта аппаратура непосредственно подвергаться воздействию внешних условий космического пространства или она будет защищена обшивкой корабля. При длительной работе разница в условиях эксплуатации оказывает существенное влияние на выбор материала.

Для работы непосредственно в космосе, т. е. вне корпуса, рекомендуют [86] применять следующие материалы: трифлуоромонохлороэтиленовый полимерный диэлектрик; силикатную массу; окись алюминия; кремнийорганические смолы; закись кремния, нанесенную в вакууме; остеклованный материал кремниевых солнечных батарей; плавленное кварцевое стекло; ячеистый стеклопластик; золото; хромат цинка; алюминиевую краску; эпоксидную краску из двуокиси титана; эпоксидную краску из черной окиси железа; алюминий; нержавеющей сталь.

В изделиях, находящихся в негерметизированных отсеках внутри корпусов космических объектов, т. е. под защитой оболочки, помимо перечисленных материалов применяют тефлон, эпоксидное покрытие, непластифицированный полиэтилен, бериллий, титан, нейлон, полиизоцианатный пенопласт и эпоксидные стеклопластики [86]. Материалы, находящиеся в негерметизированных отсеках, защищены обшивкой от воздействия рентгеновского и ультрафиолетового излучения. В особых случаях, например во время вспышек на Солнце, в обшивке корпуса космического объекта под действием

радиации может возникнуть вторичное рентгеновское излучение, способное вызвать вредную ионизацию диэлектрических материалов. Учитывая это, для некоторых видов чувствительной аппаратуры уместно применять защиту из свинца.

В герметизированных отсеках корпуса космического объекта (в особенности если они заполнены гелием или азотом) при соблюдении некоторых предосторожностей можно применять почти все электротехнические материалы. Для сохранения герметизации стенки таких отсеков рекомендуется делать из алюминия, поскольку он менее проницаем для газов, чем сталь.

Надежность большинства элементов бортовой аппаратуры космических объектов существенно зависит от температуры, регулирование которой поэтому является одной из важнейших задач. Отсутствие системы терморегулирования приводит к очень большой неравномерности нагрева и охлаждения и выходу аппаратуры из строя. По данным, опубликованным в США и относящимся к спутникам военного назначения, при их запуске и полете температура различных частей изменяется в пределах от  $-55^{\circ}$  до  $+650^{\circ}$  С [87]. Причины этого указывались выше.

В современной аппаратуре все большее число радиоламп, за исключением генераторных, заменяется полупроводниковыми триодами, в связи с чем резко сокращается количество тепла, выделяемого аппаратурой. В дальнейшем следует стремиться к таким режимам работы элементов и к таким их типам, у которых потребление (а следовательно, и выделение тепла) минимальны.

Нагрев лучами Солнца, по-видимому, в настоящее время является основным фактором, воздействующим на температуру спутника и, следовательно, влияющим решающим образом на его надежность. Если космический объект ориентирован, то лучи Солнца будут нагревать только одну его сторону. Температурные условия, таким образом, во вращающихся и невращающихся спутниках различны. В вращающемся спутнике, наполненном инертным газом и с оболочкой, имеющей высокий коэффициент отражения, повышение температуры будет сравнительно незначительным.

Значительное ограничение на конструкцию системы терморегулирования накладывает весовыми характеристиками и габаритными размерами космических объектов. С этой точки зрения выгоднее применять так называемую пассивную систему терморегулирования — отражающие и поглощающие тепло покрытия, обладающие специально подобранными спектральными характеристиками. Применять более эффективную активную систему терморегулирования, приводящую к увеличению веса, целесообразно на кораблях, имеющих на



борту космонавтов. Следует, однако, заметить, что применение эффективной системы терморегулирования в некоторых случаях дает возможность снизить вес элементов аппаратуры за счет обеспечения оптимального режима их работы и тем самым в какой-то степени скомпенсировать вес системы терморегулирования.

Для обеспечения надежности аппаратуры космических АУС требуется провести следующие мероприятия при ее разработке и изготовлении:

- 1) граничные испытания всех узлов аппаратуры;
- 2) применение элементов, рекомендованных для космической аппаратуры со специальным отбором;
- 3) обеспечение регулирования температуры;
- 4) обеспечение надежной защиты от радиации всех видов;
- 5) выбор тепловых и электрических режимов всех элементов, облегченных по сравнению с номинальными;
- 6) целесообразное резервирование.

В последнее время разрабатываются пневматические элементы, заменяющие электронные. Их преимуществом, в частности для космических применений, является нечувствительность к вибрациям, инерционным перегрузкам и различным видам излучения.

---

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОТКАЗОВ

## § 8.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ПОИСК ОТКАЗОВ

Опыт эксплуатации АУС показывает, что время отыскания отказавших элементов составляет более чем третью часть [90] продолжительности простоя системы, вызванного ее отказом. Разработка методов эффективного, т. е. весьма быстрого и при минимальных затратах, обнаружения отказавших элементов является важной задачей всей проблемы надежности АУС. Действительно, надежность систем возможно увеличить не только за счет снижения количества отказов, но также и за счет ускорения восстановления ресурса надежности. При этом необходимо уменьшать время восстановления неизбежных отказов. Это возможно сделать прежде всего за счет сокращения времени поиска отказавшего элемента для последующей замены его или ремонта.

Задачу обнаружения отказавших элементов наиболее целесообразно решать методами последовательного анализа или проверки гипотез [91]. Для применения этого метода система должна быть разомкнута.

Рассмотрим АУС, функциональная схема которой в разомкнутом состоянии показана на рис. 8.1. На этой схеме  $x_1$  и  $x_2$  — первичные воздействия;  $a, b, c, d$  и  $e$  — функциональные

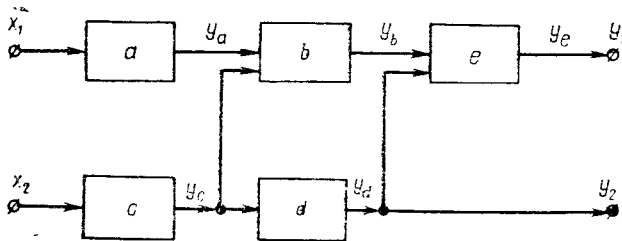


Рис. 8.1. Функциональная схема разомкнутой АУС

элементы;  $y_a, y_b, y_c, y_d, y_e$  — реакции элементов. Необходимая реакция каждого элемента будет получена при безотказной его работе и при подаче на его входы требуемых воздей-

ствий. Реакции системы  $y_1 = y_e$  и  $y_2 = y_d$  будут получены при первичных воздействиях  $x_1$  и  $x_2$  и безотказной работе всех ее элементов.

Заметим, что каждый функциональный элемент схемы может состоять из более мелких элементов (узлов) и т. д. Поэтому поиск отказов будет происходить по уровням: от системы к функциональному элементу, к узлу, устройству и простейшим или неделимым элементам, таким как электронные лампы, конденсаторы или сопротивления (рис. 8.2). Для

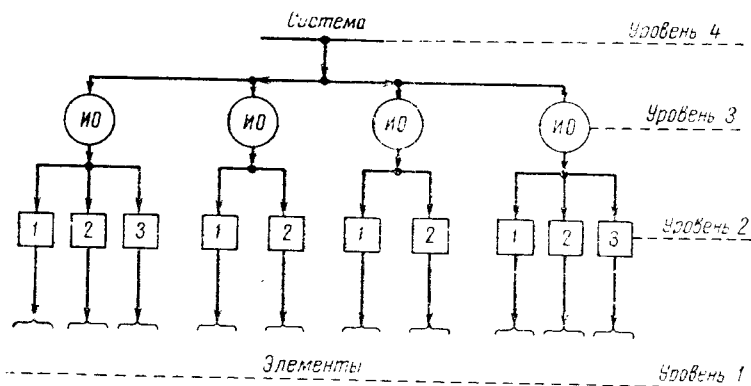


Рис. 8.2. Схема уровней поиска отказов

каждого уровня применяется свой способ проверки. В случае резервированной системы отдельные ее части можно проверять раздельно при разрыве соответствующих цепей.

При помощи функциональной схемы АУС определяется возможная проверка, предпринимаемая с целью отыскания отказов. Они заключаются в приложении к функциональным элементам заданных воздействий, в наблюдении реакций, в сравнении этих реакций с требуемой для каждого элемента и в оценке результатов сравнения. Проверенный элемент может оказаться безотказно работающим, если на определенные воздействия он отвечает необходимой реакцией. Отказавший элемент не вырабатывает требуемой реакции. Элементы, не охваченные данной проверкой, или непроверенные элементы, не могут быть отнесены ни к отказавшим, ни к нормально функционирующим.

Результат проверки условимся называть отрицательным, если все охваченные ею элементы оказываются нормально функционирующими; если результатом проверки явилось обнаружение отказа, будем его называть положительным. Обозначение проверки системы (узла устройства), состоящей

из  $n$  элементов, будем составлять из  $n$  разрядного двоичного числа. Каждая  $k$ -я проверка устанавливает безотказную работу или отказ группы, состоящей из  $k$  элементов. Остальные  $n - k$  элементов при этом остаются непроверенными.

В табл. 8.1 перечислены проверки системы, показанной на рис. 8.1.

Таблица 8.1

Проверка системы, показанной на рис. 8.1

Номер проверки	Наблюдаемая реакция	Необходимые воздействия	Элементы, безотказная работа которых определяет отрицательный результат проверки	Двоичное число, обозначающее проверку				
				$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
1	$Y_a$	$x_1$	$a$	0	1	1	1	1
2	$Y_b$	$Y_a Y_c$	$b$	1	0	1	1	1
3	$Y_c$	$Y_a Y_2$	$c$	1	1	0	1	1
4	$Y_d$	$Y_c$	$d$	1	1	1	0	1
5	$Y_e$	$Y_b Y_d$	$e$	1	1	1	1	0
6	$Y_b$	$Y_c Y_1$	$ab$	0	0	1	1	1
7	$Y_b$	$Y_a Y_2$	$bc$	1	0	0	1	1
8	$Y_b$	$Y_1 Y_2$	$abc$	0	0	0	1	1
9	$Y_d$	$Y_2$	$cd$	1	1	0	0	1
10	$Y_e$	$Y_a Y_c Y_d$	$be$	1	0	1	1	0
11	$Y_e$	$Y_c Y_a Y_1$	$abe$	0	0	1	1	0
12	$Y_e$	$Y_a Y_d Y_2$	$bce$	1	0	0	1	0
13	$Y_e$	$Y_d Y_1 Y_2$	$abce$	0	0	0	1	0
14	$Y_e$	$Y_b Y_c$	$de$	1	1	1	0	0
15	$Y_e$	$Y_b Y_2$	$cde$	1	1	0	0	0
16	$Y_e$	$Y_a Y_c$	$bde$	1	0	1	0	0
17	$Y_e$	$Y_c Y_1$	$abde$	0	0	1	0	0
18	$Y_e$	$Y_a Y_2$	$bcde$	1	0	0	0	0
19	$Y_e$	$Y_1 Y_2$	$abcde$	0	0	0	0	0

Ноль в  $i$ -м разряде обозначения проверки указывает, что  $i$ -й элемент системы охватывается данной проверкой и является годным, если результат проверки отрицательный. При положительном результате проверки делается вывод, что отказал по меньшей мере один из элементов, имеющих ноль в разряде обозначения проверки. Единичка в  $i$ -м разряде обозначения проверки указывает на то, что  $i$ -й элемент данной проверкой не охвачен.

Ясно, что возможных проверок системы, состоящей из  $n$  элементов, существует столько, сколько может быть образовано  $n$ -значных двоичных чисел. Из них заведомо можно исключить лишь проверку, обозначенную двоичным числом со всеми значащими разрядами, так как она не увеличивает

информации о состоянии системы, не выявляет наличия или отсутствия отказа. Поэтому число возможных результативных проверок будет

$$k = 2^n - 1.$$

В табл. 8.1 приведено только 19 проверок. Количество возможных проверок для рассматриваемой системы

$$k = 2^5 - 1 = 31.$$

Остальные 12 проверок можно заменить комбинациями из первых 19. Например, совместный результат проверок 11001 и 10001 эквивалентен результату проверки 10001.

Каждая из пяти первых проверок табл. 8.1 относится только к одному элементу и поэтому имеет в своем обозначении только один нуль. Положительный результат такой проверки указывает на отказ соответствующего элемента.

Поиск отказавшего элемента может выполняться по двум существенно отличающимся схемам: комбинационной и последовательной. В первом случае элементы разделяются на безотказно работающие и отказавшие после некоторого количества проверок. Порядок осуществления проверок при комбинационной схеме поиска безразличен, поскольку окончательные выводы зависят от комбинации результатов проверок. Малая эффективность комбинационного поиска становится очевидной, если предположить, что отказ системы вызван отказом только одного элемента или отказом небольшой доли элементов, так как и при этом требуется осуществление всех проверок.

При последовательной схеме поиска каждая последующая проверка определяется по результатам предыдущей. Результаты проверки анализируются сразу же после ее осуществления.

По комбинационной схеме обычно производятся контрольные приемочные испытания, так как для них требуется некоторое количество обязательных проверок, порядок осуществления которых безразличен. Наиболее эффективной при отыскании отказов оказывается схема последовательного поиска. Она и рассматривается далее.

Качественные различия между последовательно совершаемыми проверками удобно обозначать информационными состояниями, фиксирующими безотказно работающие и непроверенные элементы. При этом упрощается построение схемы последовательного поиска, в которой каждое последующее информационное состояние получается из предыдущего в зависимости от результатов проверки, их разделяющей. Типовой узел такой схемы показан на рис. 8.3. Из таких узлов составляются ветви или пути схемы поиска, начиная

от исходного и кончая последним информационным состоянием. После показанного на рис. 8.3 информационного состояния  $C_{k-1}$  следует проверка  $\bar{P}_k$ , приводящая к состоянию  $C_k$  при отрицательном результате и к состоянию  $\bar{C}_k$  — при положительном результате этой проверки.

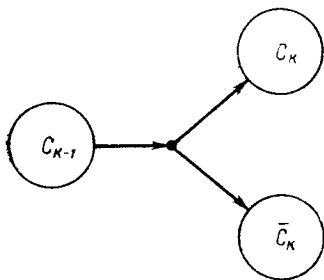


Рис. 8.3. Типовой узел схемы последовательного поиска

После получения конечного информационного состояния о каждом из  $n$  элементов будет известно, относится ли он к безотказно работающим или к отказавшим. Так как и конечное состояние обозначается  $n$ -разрядным двоичным числом, то в общем случае имеется  $2^n$  возможных конечных состояний. Количество типовых узлов в полной схеме поиска будет определяться количеством проверок  $k = 2^n - 1$ . Это означает, что даже при небольшом количестве элементов схема последовательного поиска получается весьма сложной.

Она значительно упрощается, если предположить, например, что в проверяемой системе имеется только один отказавший элемент. При этом допущении количество последних информационных состояний сокращается до  $n$ , а количество узлов в схеме поиска до  $k'_1 = n - 1$ .

Действительно, если имеется  $n$  непроверенных элементов в начальном информационном состоянии, то любая одиночная проверка разделит их на две подгруппы  $n_1$  и  $n_2$ . Применительно к рассматриваемой системе (рис. 8.1) начальное состояние  $C_0$  можно обозначить пятиразрядным двоичным числом 11111 (рис. 8.4). Первая проверка, например обозначаемая числом 11001, делит пять непроверенных элементов на две подгруппы  $n_1 = 2$  и  $n_2 = 3$ . Далее эти подгруппы будут подразделяться до тех пор, пока первоначальная группа, состоящая из  $n$  непроверенных элементов, не окажется разделенной на  $n$  подгрупп по одному непроверенному элементу в каждой. При этом каждый символ последующего информационного состояния будет отделен в ветви схемы поиска от символа предыдущего состояния символами, обозначающими проверку.

Упрощенная схема поиска может применяться несколько раз подряд, если обнаружение одного отказавшего элемента и его замена или ремонт не приводят к получению нормальной реакции системы. Нормальная реакция будет указывать на отказ нескольких элементов, но наличие более чем одного

отказавшего элемента не делает невозможным отыскание по крайней мере одного из них.

На рис. 8.4 начальное состояние  $C_0$  обозначено 11111, так как до первой проверки все пять элементов системы не проверены. Первая проверка  $\Pi_9$ , предусмотренная данной

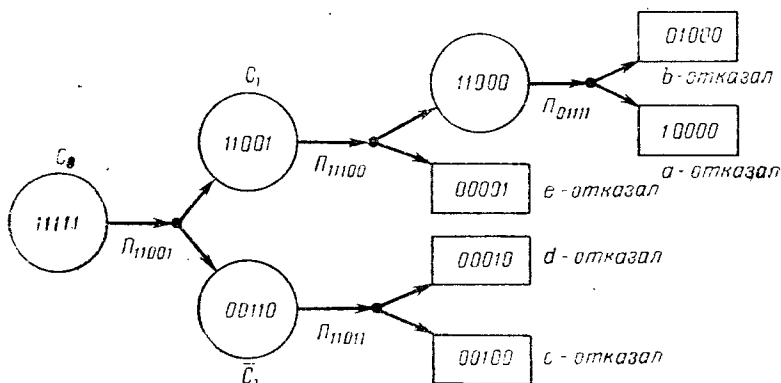


Рис. 8.4. Упрощенная схема последовательного поиска

схемой (проверка 9, табл. 8.1), должна выявить работоспособность элементов  $c$  и  $d$ ; поэтому она обозначена числом 11001. При отрицательном результате проверки 11001 элементы  $c$  и  $d$ , обозначенные в ее символе нулями, признаются безотказно работающими. Так возникает первое информационное состояние  $C_1$  для отрицательного результата проверки, обозначенное символом 11001. Если результат проверки положителен, то один из элементов  $c$  или  $d$  должен быть отнесен к отказавшим. Так как рассматриваемая система является основной, то элементы  $a$ ,  $b$  и  $e$  следует считать безотказно работающими. Это информационное состояние  $\bar{C}_1$  для положительного результата обозначено символом 00110.

После состояния 11001, определенного по отрицательному результату проверки 11001, может производиться любая из проверок  $\Pi_{11000}$ ,  $\Pi_{11000}$ ,  $\Pi_{11010}$  или  $\Pi_{11110}$ , разделяющих непроверенные элементы  $a$ ,  $b$  и  $e$  на две подгруппы. При этом предполагается, что элементы  $c$  и  $d$  работают безотказно.

Упрощенная схема последовательного поиска в основных системах характеризуется следующими свойствами: схема имеет одно начальное состояние, обозначаемое  $n$ -разрядным двоичным числом, причем  $n$  соответствует количеству эле-

ментов, контролируемых на данном уровне; схема содержит  $n$  конечных состояний, обозначаемых  $n$  разрядными двоичными числами, состоящими из одной единицы и  $n - 1$  нулей; количество необходимых проверок в такой схеме, независимо от ее структуры,  $k = n - 1$ . Одна и та же проверка в такой схеме не появляется более одного раза на одном и том же пути от начального до данного последнего состояния. Проверка может повторяться на различных путях, т. е. при отыскании различных отказов.

Обозначение информационного состояния, соответствующего отрицательному результату проверки, получается логическим (поразрядным) умножением обозначения предыдущего состояния на обозначение проверки. Это последующее состояние помещается в верхнюю ветвь узла, обозначающего проверку, и называется *верхним*.

Обозначение информационного состояния, соответствующего положительному результату проверки, получается логическим (поразрядным) умножением обозначения предыдущего состояния на обратный код обозначения проверки, получаемый заменой в нем нулей единицами, а единиц нулями. Это последующее состояние помещается в нижнюю ветвь узла, обозначающего проверку, и называется *нижним*.

Определим максимальное количество проверок для системы, состоящей из  $n$  элементов при всех возможных вариантах схемы проверки. Каждая схема использует лишь  $n - 1$  проверок из всех возможных. Допуская отказ лишь одного элемента, следует из общего количества  $2^n$  возможных проверок исключить проверку, обозначаемую только единицами, и проверку, обозначаемую только нулями. Указанное допущение, кроме того, означает, что полезной будет только половина из оставшихся  $2^n - 2$  проверок, так как при этих условиях любая проверка  $P_k$  увеличит на столько же количество информации о состоянии устройства, на сколько увеличит его проверка  $P'_k$ , обозначение которой является обратным кодом обозначения  $P_k$ . Следовательно, количество существенно различных полезных проверок

$$k = 2^{n-1} - 1.$$

Может случиться, что не все эти проверки можно применить к данной системе или данному уровню. Например, если система состоит из четырех элементов, соединенных по основной схеме, то невозможно проверить отказ одновременно и первого и третьего элементов.

Если дана совокупность из  $l < 2^{n-1} - 1$  осуществимых проверок, то необходимо определить ее достаточность для обнаружения отказа любого из  $n$  элементов. Пусть, например,



имеется совокупность из  $l = 6$  проверок для системы, состоящей из  $n = 5$  элементов

$$\begin{array}{ll} \Pi_1 = 10010, & \Pi_4 = 10110, \\ \Pi_2 = 01110, & \Pi_5 = 10101, \\ \Pi_3 = 00101, & \Pi_6 = 11000. \end{array}$$

Анализируя обозначения проверок необходимо исследовать возможность отыскания любого отказавшего элемента при любой последовательности перечисленных проверок. Пусть исследуется возможность отыскания отказавшего элемента  $b$ . Перепишем каждое обозначение проверки или его обратный код таким образом, чтобы во всех обозначениях второй разряд заполнялся нулем, а затем произведем поразрядное сложение единиц. Получим:

$$\begin{array}{r} \Pi_1 = 10\ 010 \\ \Pi_2 = 10\ 001 \\ \Pi_3 = 00\ 101 \\ \Pi_4 = 10\ 110 \\ \Pi_5 = 10\ 101 \\ \Pi_6 = 00\ 111 \\ \hline 40\ 434 \end{array}$$

Этот результат указывает на избыточность совокупности из  $l = 6$  проверок, так как совокупность проверок для отыскания  $i$ -го отказавшего элемента будет достаточной уже в том случае, когда во всех разрядах полученной суммы, кроме второго, будут отсутствовать нули. В рассматриваемом примере для отыскания отказавшего элемента  $b$  достаточно трех первых проверок.

## § 8. 2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ПОИСК В СЛУЧАЕ НЕСКОЛЬКИХ ОТКАЗАВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В § 8.1 была рассмотрена последовательная схема упрощенного поиска, полученная при допущении только одного отказавшего элемента в проверяемой системе. Рассмотрим теперь применение упрощенного поиска к некоторым особым случаям, когда условие только одного отказавшего элемента не соблюдается.

Когда все элементы оказываются безотказно работающими, результаты всех проверок будут отрицательными, а поиск пойдет только по верхнему пути (верхним информационным состоянием) к некоторому особому элементу. Таким особым элементом для схемы поиска, изображенной на рис. 8.4, будет элемент  $b$ .

При упрощенной схеме поиска вывод об отказе особого элемента делается только на том основании, что все осталь-

ные элементы в результате проверок оказались безотказно работающими, а один элемент должен быть отказавшим.

В случае, когда по каким-либо признакам известно, что отказало несколько элементов, поиск отказа усложняется. Теперь при каждой проверке необходимо убеждаться в том, что наличие нескольких отказавших элементов не привело к ошибочной оценке безотказно работающего элемента. Если указанные ошибки исключаются, то все отказавшие элементы можно обнаружить многократным поиском по одной и той же упрощенной схеме. При этом каждый обнаруженный отказавший элемент необходимо восстанавливать или заменять перед последующим поиском. В этом случае должны быть изменены обозначения информационных состояний и проверок. Теперь нули в обозначении состояния системы при положительном результате проверки должны относиться к непроверенным элементам. При этом не существенно, что не эти элементы определили положительный результат проверки, существенно то, что и среди них могут быть отказавшие элементы. Принятие этих элементов за непроверенные не будет влиять на результаты последующих проверок только при условии, что их безотказная работа не обязательна для отрицательного результата любой из оставшихся последующих проверок. Иначе говоря, если установлено, что в данной группе элементов есть отказавшие, то результаты дальнейших проверок должны быть независимыми от работоспособности элементов, не входящих в данную группу.

На рис. 8.5 показана упрощенная схема последовательного поиска в случае нескольких отказавших элементов. В обозначениях информационных состояний подчеркнуты нули, относящиеся к непроверенным элементам, а в обозначениях проверок подчеркнуты единицы, соответствующие подчеркнутым нулям в обозначениях состояний. Чтобы наличие нескольких отказавших элементов не влияло на отыскание любого из них, достаточно в обозначении каждой проверки иметь единицы, соответствующие каждому нулю в обозначении предыдущего нижнего состояния. Знаком  $x$  на схеме (рис. 8.5) обозначены безотказно работающие элементы, определенные предыдущими и данной проверкой. В обозначении последующего верхнего состояния в разряде, соответствующем нулю обозначения предыдущего верхнего состояния, можно ставить любой знак — единицу или нуль.

Количество возможных проверок для случая нескольких отказавших элементов составит  $2^n - 1$ . Так как не все из этих проверок могут оказаться осуществимыми, то необходимо иметь метод определения достаточности заданной

совокупности возможных проверок  $l_1 < 2^n - 1$  для нахождения любого отказавшего элемента.

Обращаясь к схеме, изображенной на рис. 8.5, замечаем, что при положительных результатах всех проверок в обозначении нижнего конечного состояния два разряда заняты

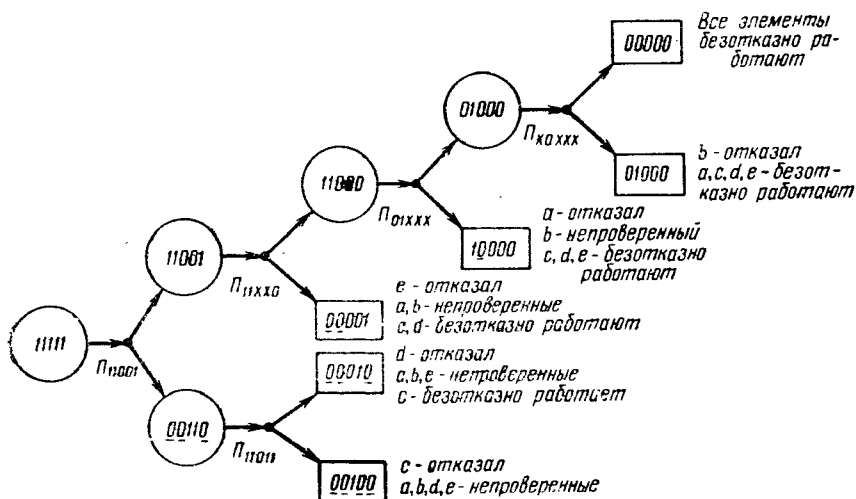


Рис. 8.5. Упрощенная схема последовательного поиска в случае нескольких отказавших элементов

единицами, а остальные — подчеркнутыми нулями. Это означает, что следующей необходимой проверкой должна быть проверка, в обозначении которой всем подчеркнутым нулям и одной из единиц предыдущего состояния соответствуют единицы.

Указанное обстоятельство дает возможность сформулировать необходимое условие достаточности в общем: заданная совокупность возможных проверок  $l_1$  должна содержать хотя бы одну, двоичное обозначение которой только в одном разряде имеет нуль.

Действительно, если это условие удовлетворяется, то данная проверка всегда будет иметь положительный результат, так как всегда возможно отыскать один определенный отказавший элемент, отмеченный нулем. Исключая указанную проверку из заданной совокупности, а обнаруженный отказавший элемент — из двоичных обозначений остальных проверок, возможно получить новую совокупность проверок  $l_1 - 1$ , но уже для  $n - 1$  элементов.

Для того чтобы новая совокупность проверок могла быть достаточной в общем, в ней необходимо иметь по

крайней мере одну проверку, двоичное обозначение которой содержит только один нуль. Многократное применение указанного приема дает возможность показать достаточность в общем исходной совокупности проверок, если в каждой преобразованной совокупности образуется проверка только с одним нулем в ее обозначении.

Пусть, например, возможные проверки определяют следующую их совокупность:  $P_1 = 11001$ ,  $P_2 = 10011$ ,  $P_3 = 11011$ ,  $P_4 = 00111$ . Двоичное обозначение проверки  $P_3$  содержит только один нуль, обозначающий элемент  $c$  из группы элементов  $abcde$  (рис. 8.1). Исключив проверку  $P_3$  из первоначальной совокупности проверок, а элемент  $c$  — из обозначений проверок, получим первую преобразованную совокупность для элементов  $abde$ :

$$P_{11} = 1101, P_{21} = 1011, P_{41} = 0011.$$

Далее

$$P_{22} = 101, P_{42} = 001$$

и, наконец,

$$P_{43} = 01,$$

т. е. достаточность исходной совокупности доказана.

В рассмотренных случаях под информационным состоянием системы до и после проверки понималось лишь определенное количество сведений об отказавших, непроверенных и безотказно работающих элементах, различное на разных уровнях. Вообще же применение информационных состояний в схемах поиска отказов обеспечивает значительно большие возможности использования различной информации о состоянии проверяемой системы. Так, при наличии характеристик надежности элементов, можно еще до начала проверок подсчитать вероятности отказов элементов и вероятность отказа системы из-за отказа каждого элемента. Схема поиска должна быть построена с учетом этих расчетов или предположений.

Наличие внешних признаков отказа должно быть также учтено при определении исходного информационного состояния. Если эти признаки с очевидностью указывают на отказ элемента  $c$ , то любая проверка, не охватывающая элемент  $c$  сразу же, не будет эффективной.

Вероятностный подход к решению задачи поиска отказавших элементов расширяет понятие проверки. Проверка может рассматриваться при этом как операция, изменяющая вероятность безотказной работы элементов и системы.

При составлении схем поиска необходимо учитывать стоимость проведения проверок по той или иной из них, определяемую затратами труда, амортизацией контрольно-измерительной аппаратуры, потерями за счет простоя отка-

завшей системы и т. п. В простейших случаях для каждой проверки можно определить ее стоимость. Тогда стоимость отыскания отказавшего элемента равна сумме стоимостей всех проделанных с этой целью проверок. При этом стоимость данной совокупности проверок не зависит от последовательности, в которой они выполняются. Однако в более сложных случаях на практике обнаруживается заметная зависимость между стоимостью проведения данной совокупности проверок и последовательностью их выполнения. Так возникает задача о построении оптимальной схемы поиска отказавших элементов.

### § 8.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОИСКА ОТКАЗОВ

Индикация того или иного отказавшего элемента обычно может быть осуществлена несколькими последовательно-стями проверок. Не все возможные проверки обладают достаточной эффективностью, поэтому не всякая их последовательность обеспечит отыскание отказа с наименьшими затратами и в наименьшие сроки. Для повышения эффективности индикации отказов следует из всех возможных проверок отбирать только необходимые и проделывать их в совершенно определенной последовательности, т. е. оптимизировать схему поиска отказов.

Наиболее очевидным критерием при определении наилучшей схемы поиска является минимальное значение средней стоимости обнаружения отказа. Среднюю стоимость можно определять из выражения

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^n C_i P_i, \quad (8.1)$$

где  $C_i$  — суммарная стоимость всех проверок, необходимых для отыскания  $i$ -го отказавшего элемента и предусмотренных схемой поиска;

$P_i$  — вероятность того, что отказ системы вызван отказом  $i$ -го элемента.

Чем меньше  $\bar{C}$ , тем лучше схема поиска.

Следует, однако, иметь в виду практические трудности применения критерия минимальной средней стоимости, возрастающие при увеличении сложности проверяемой системы. Предположим, что отказ системы, состоящей из  $n$  элементов, вызван отказом только одного элемента и это заведомо известно. Определим количество возможных схем поиска  $Z(n)$ . Выше было показано (§ 8.1), что количество проверок для этого случая равно  $2^{n-1}$ . Пусть все эти проверки осуществимы. Если при определении количества воз-

можных схем поиска для любого числа проверок  $k < n$  воспользоваться определением количества способов выбора  $k$  единиц из  $n$ , то нижний предел для величины  $Z(n)$  будет

$$Z(n)_{\text{мин}} = n! F(n), \quad (8.2)$$

где

$$F(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{Z(k)}{k!} \frac{Z(n-k)}{(n-k)!} = \\ = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-k} F(k) F(n-k). \quad (8.3)$$

Зависимость  $F(n)$  построена в логарифмическом масштабе на рис. 8.6 [98]. Из этого рисунка следует, что угол между касательной к характеристике  $\lg F(n)$  и осью абсцисс стремится при увеличении  $n$

к постоянной величине, т. е. для больших значений  $n$  функция  $F(n)$  может быть аппроксимирована уравнением

$$F(n) \approx A_1 \beta^n, \quad (8.4)$$

где  $A_1$  — постоянный коэффициент, а  $\beta = 1,78$ .

Таким образом, если число элементов системы  $n > 10$ , то

$$Z(n)_{\text{мин}} \approx A_1 n! 1,78^n. \quad (8.5)$$

При расчете величины  $Z(n)$  для любых  $n$  учитываются все возможные схемы поиска, полученные перестановкой проверок. Количество различных схем поиска при использовании одних и тех же проверок  $Y(n)$  также оказывается показательной функцией  $n$

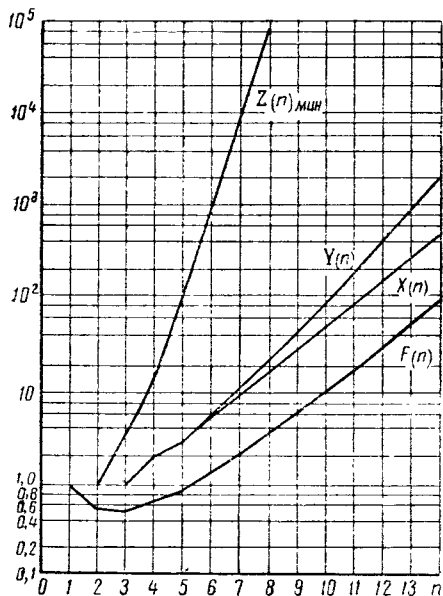


Рис. 8.6. К определению количества схем поиска отказов

(рис. 8.6). Функция  $Y(n)$  при больших  $n$  аппроксимируется уравнением [91]

$$Y(n) = A_2 2,2^n. \quad (8.6)$$

Количество схем поиска, отличающихся не только последовательностью, но и числом проверок, используемых для отыскания одних и тех же отказавших элементов,  $X(n)$  при  $n > 10$  определяется формулой

$$X(n) \approx A_2 1,84^n. \quad (8.7)$$

Зависимости  $Y(n)$  и  $X(n)$  также изображены на рис. 8.6.

Соотношения (8.5) — (8.7) показывают затруднительность оценки схем поиска по минимальной средней стоимости. Например, для системы, состоящей из 10 элементов, существует около  $34,4 \cdot 10^6$  схем проверок. Если предположить, что средняя стоимость проверки по каждой схеме может быть подсчитана за  $0,125$  сек, то и в этом случае потребуется 500 дней, чтобы подсчитать среднюю стоимость проверки для каждой из  $Z(10)$  схем.

Задачу оптимизации поиска отказавших элементов практически можно решать только при некоторых допущениях. Для определения минимальной средней стоимости поиска при равновероятных отказах элементов системы и одинаковой стоимости проверок можно пользоваться, например, методом средней точки. Этот метод заключается в том, что при каждой проверке оставшиеся непроверенными элементы делятся на две группы, содержащие примерно одинаковое количество элементов.

Возможен и более общий подход к таким проверкам. Если система состоит из  $n$  элементов, причем

$$n = 2^m \div l, \quad (8.8)$$

где

$$0 \leq l < 2^m,$$

и заведомо известно, что отказал только один элемент, то возможен следующий порядок проверки: для каждого информационного состояния, для которого количество непроверенных элементов  $n_1 = 2^{m_1} \div l_1$ , выбирается любая проверка, делящая элементы на две группы таким образом, чтобы каждая из них содержала по меньшей мере  $2^{m_1-1}$  элементов. Многократное повторение этого приема оптимизирует последовательность проверок. Эта последовательность может быть реализована многими схемами поиска с одним и тем же результатом.

Приближаясь к определению оптимальной схемы поиска отказов, усложним задачу, допустив, что вероятности отказов элементов системы неодинаковы. Найдем в этом случае способ оптимизации схемы поиска для получения минимальной средней стоимости отыскания отказавшего элемента. Очевидно и в этом случае для системы, состоящей из  $n$  эле-

ментов, существует  $Z(n)$  схем поиска. Однако для определения оптимальной схемы нет необходимости в рассмотрении всех  $Z(n)$  возможных.

Если из  $Z(n)$  схем поиска исключить обозначения элементов (§ 8.1), то останется уже только  $Y(n)$  возможных структур этих схем. Среди них найдутся различные структуры, для которых требуется одно и то же количество проверок для отыскания каждого отказавшего элемента; средние стоимости поиска при таких структурах будут также одинаковы. Различные же средние стоимости свойственны только  $X(n)$  структурам. Далее следует определить структуры из совокупности  $X(n)$  с минимальной средней стоимостью. Это можно сделать при помощи методики оптимального кодирования [92]. В соответствии с ней оптимальная схема поиска определяется в результате выполнения следующих операций.

Элементы системы располагаются в порядке убывания вероятности их отказа. На рис. 8.7 показан пример такого

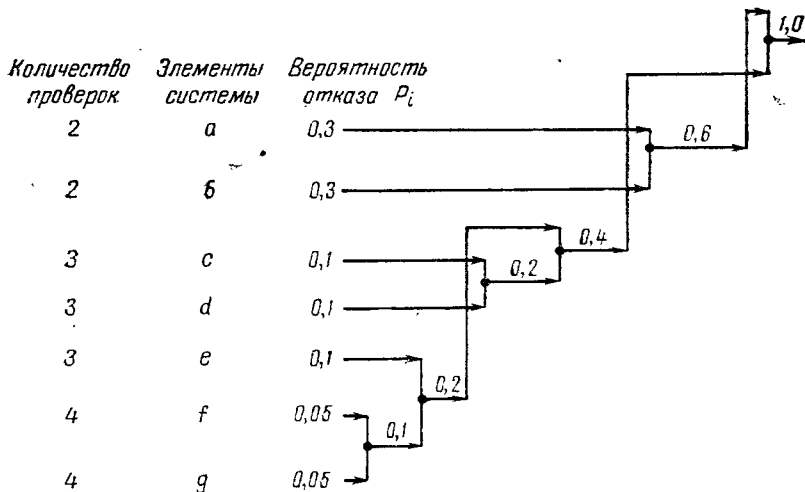


Рис. 8.7. Пример определения оптимальной схемы поиска

расположения для системы, схема которой приведена на рис. 8.1. Два последних элемента группируются в один. Далее подгруппа этих элементов принимается за один с вероятностью отказа, равной сумме вероятностей их отказов. Эта операция прделывается многократно. Перед каждым преобразованием совокупности элементов и вероятностей необходимо проверять расположение элементов, в том числе



полученных в результате объединения, в порядке убывания вероятности отказа. При нарушении этого порядка вследствие объединения элементов необходимо осуществлять соответствующие их перестановки (рис. 8.7). Преобразование совокупности элементов и вероятностей их отказов продолжается до тех пор, пока не останется один «объединенный элемент» с вероятностью отказа, равной единице.  $\square$

По схеме поочередного объединения элементов можно определить количество необходимых проверок для отыскания каждого элемента в случае его отказа. Для этого достаточно подсчитать количество «объединений» рассматриваемого элемента с другими на «пути» от данного элемента до последнего «объединенного» с вероятностью отказа, равной достоверности. Оно и будет соответствовать необходимому количеству проверок. Любая схема поиска, которая обеспечит отыскание отказавших элементов при том же общем количестве проверок, будет иметь наименьшую среднюю стоимость.

Схема поиска, структура которой определена в соответствии с построением, выполненным на рис. 8.7, показана на рис. 8.8. В соответствии с формулой (8.1) при стоимости

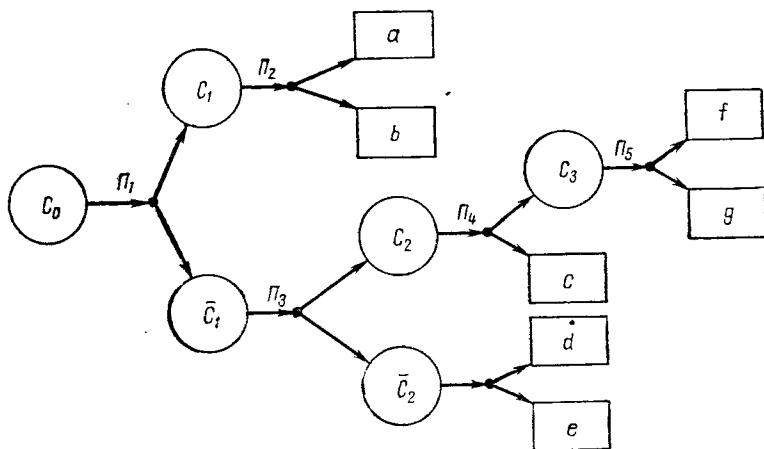


Рис. 8.8. Пример схемы поиска

проверки, равной  $C_0$ , приведенная величина минимальной средней стоимости в рассмотренном примере

$$\bar{C} = C_0(0,3 \cdot 2 \cdot 2 + 0,1 \cdot 3 \cdot 3 + 0,05 \cdot 4 \cdot 2) = 2,5.$$

Это следует из рис. 8.7, по которому, например, для элементов  $a$  и  $b$ ,  $P_i = 0,3$ ; при этом требуется две проверки и т. д.

#### § 8.4. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ОТКАЗАВШИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Оптимизация поиска отказавших элементов означает прежде всего целесообразную его систематизацию, т. е. целесообразный выбор и проведение в определенной последовательности совокупности проверок. Каждая проверка из выбранной совокупности служит для определения последующего информационного состояния отказавшей и проверяемой системы. При систематизированном поиске каждая проверка должна выявить отсутствие (отрицательный результат) или наличие (положительный результат), по крайней мере, одного из возможных отказов. После ее проведения некоторые из возможных отказов могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Информация, получаемая после каждой предыдущей проверки, увеличивает вероятность обнаружения отказа последующей проверкой.

При выборе последующей проверки должны быть учтены:

- а) взаимосвязь между непроверенными элементами;
- б) относительные вероятности отказов элементов;
- в) относительные затраты времени на проверку возможных причин отказа;
- г) принятый критерий эффективности проверки.

В результате содержанием оптимальной схемы поиска отказов является, во-первых, перечень операций, входящих в состав проверки, и, во-вторых, последовательность проверок.

Систематизированный поиск отказов может быть построен, например, на основе вероятностно-временного критерия. Для него необходимо знать относительные частоты или относительную вероятность отказов и затрат времени на выполнение проверок различных элементов.

В качестве примера рассмотрим процесс отыскания отказов в комбинированном полупроводниково-магнитном усилителе следящей системы. Последовательность действий оператора при этом может быть следующей: оценка отклонений выходного сигнала от идеального, определенного функционалом усилителя; анализ условий возникновения отказа; планирование наиболее эффективных проверок, обеспечивающих обнаружение отказа в минимально короткий промежуток времени. После того как отказ усилителя будет установлен, для быстрой локализации отказавшего элемента его поиск необходимо начать с выполнения проверки, харак-

теризующейся наибольшим значением принятого критерия эффективности. Примем в качестве такого критерия величину

$$H_k = \frac{Q_k}{t_k}, \quad (8.9)$$

где  $t_k$  — время, необходимое для проведения проверки,  $Q_k$  — априорная вероятность отказа проверяемого элемента.

Другого вида критерий может быть составлен с помощью теории информации [90].

В рассматриваемом случае естественно положить вероятность отказа предварительного (полупроводникового) усилителя  $Q_n$  большей, чем вероятность отказа усилителя мощности (магнитного)  $Q_m$ . Пусть  $Q_n = 0,8$ ;  $Q_m = 0,2$ . Будем исходить из того, что для проверки полупроводникового и магнитного усилителей необходимо затрачивать приблизительно одинаковое время, обозначаемое соответственно  $t_n$  и  $t_m$  и равное 2 час. При этих условиях значение критерия эффективности проверки полупроводникового усилителя

$$H_n = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ 1/час,}$$

а значение критерия эффективности проверки магнитного усилителя

$$H_m = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ 1/час.}$$

Таким образом, в соответствии с выбранным критерием целесообразнее проверку усилителя начинать с проверки предварительной (полупроводниковой) ступени.

Следуя изложенному принципу, далее необходимо рассчитать значения критерия эффективности каждой возможной проверки и проводить их в порядке убывающих значений  $H_k$ . В результате систематизированный таким образом поиск приводит к последовательному исключению возможных отказов и определению действительного отказа. В рассмотренном примере оптимальную последовательность проверок оказалось возможным определить после того, как отказ устройства был локализован в ограниченной группе элементов.

Время, необходимое для расчетов эффективности проверок, в очень сложной системе может оказаться чрезмерно большим, несмотря на то, что большинство отказов будет обнаруживаться после этого достаточно скоро. Поэтому рассмотренный метод практически не может быть применен к очень сложным системам. Если для всех проверок затра-

чиваемое время одинаково, а вероятности отказов всех элементов равны, систематизированный поиск вырождается в случайную последовательность проверок.

Другим возможным приемом является логический прием систематизации, получивший название метода «средней точки».

Рассмотрим его применение к системе, состоящей из двенадцати элементов, соединенных по основной схеме (рис. 8.9). Из самого названия метода следует, что в случае его реализации каждая проверка должна проводиться над «средней точкой» системы, ее половины, четверти и т. д. Первая проверка системы должна быть произведена в точке схемы между шестым и седьмым элементами. При этом проверяется безотказная работа всех элементов от первого до шестого. Если выходной сигнал указанной «полусистемы» оказывается находящимся в пределах допусков, то она признается нормально функционирующей. Отказавшей признается «полусистема», состоящая из элементов с седьмого по двенадцатый, а результат проверки считается отрицательным. Поэтому вторая проверка предпринимается в точке схемы между девятым и десятым элементами. Если, напротив, первая проверка имела положительный результат, т. е. показала наличие отказа в первой полусистеме, вторая проверка производится в точке схемы между третьим и четвертым элементами. Для рассматриваемой системы потребуется четыре проверки для охвата одиннадцати элементов и одна — подтверждающая отказ последнего — двенадцатого элемента, т. е. всего пять проверок.

Систематизация поиска отказавшего элемента той же системы по критерию (8.9) может потребовать в лучшем случае одну, а в худшем — двенадцать проверок. При отсутствии сведений о  $t_k$  и  $Q_k$  или при  $t_1 = t_2 = \dots = t_{12}$  и  $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{12}$  потребовалось бы в среднем шесть проверок, т. е. при определенных условиях логическая систематизация поиска оказывается более эффективной. При независимости элементов и наличии сведений по величинам  $t_k$  и  $Q_k$  предпочтительной оказывается эмпирическая систематизация поиска.

Таким образом, метод «средней точки» дает возможность систематизировать поиск отказавших элементов в тех случаях, когда вероятности отказов  $Q_k$  и время проверок  $t_k$  равны или неизвестны; он приводит к сокращению числа необходимых проверок.

В тех случаях, когда известны априорные вероятности отказов, их поиск целесообразнее систематизировать не разбиением системы, а разбиением вероятности. Так, если эле-

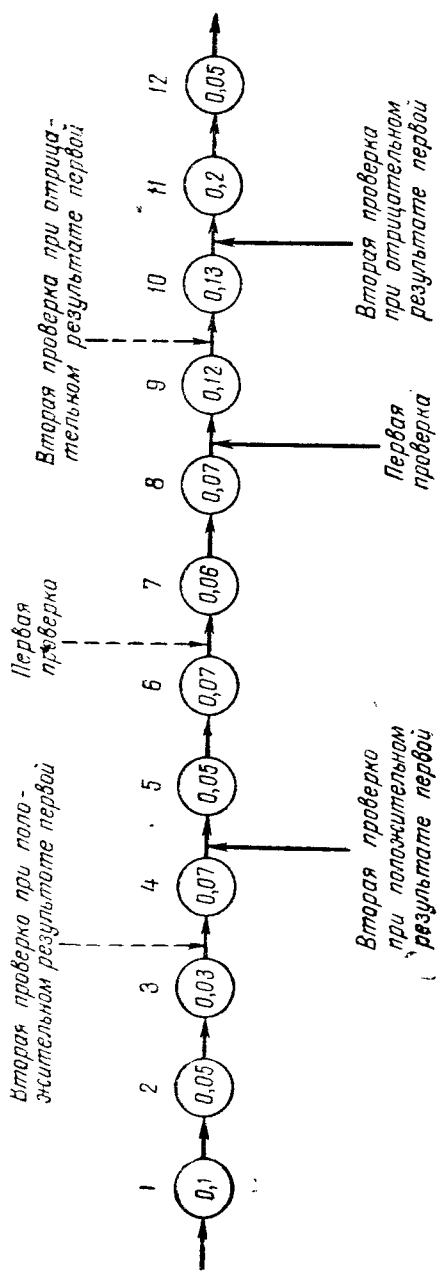


Рис. 8.9. Пример проверки по методу «средней точки»

менты рассматриваемой системы имеют вероятности отказов, обозначенные на рис. 8.9, а длительности проверок предполагаются одинаковыми, то первую проверку следует проводить в точке половинной вероятности отказа системы, т. е. между восьмым и девятым элементами. Если первая проверка будет иметь отрицательный результат, то отказ следует искать среди группы элементов с девятого по двенадцатый, т. е. вторую проверку необходимо проводить между десятым и одиннадцатым элементами. Если первая проверка имела положительный результат и показала отказ в группе элементов с первого по восьмой, вторая проверка производится в точке схемы между четвертым и пятым элементами.

Аналогичным образом организуется поиск отказавших элементов при одинаковых вероятностях отказов и различных временах проверок.

Метод «средней точки» не исключает оптимизацию поисковой схемы, построенной на его основе. Пусть отказавшая система состоит из восьми элементов, соединенных по основной схеме (рис. 8.10). Пользуясь методом «средней точки», достаточно провести четыре проверки — 1, 2, 3, 4, и отказавший элемент будет найден. Характер уже локализованного отказа может быть определен одной из подтверждающих проверок 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. На рис. 8.10 обозначены информационные состояния до и после проверок. За априорные вероятности отказов приняты относительные частоты появления отказов. Вероятности информационных состояний являются вероятностью того, что данную проверку придется провести; они определяются как суммы вероятностей отказов, охватываемых ими элементов. Эта схема построена лишь на разбиении системы и не учитывает ни вероятностей отказов элементов, ни, тем более, критериев эффективности проверок. При этом менее эффективные проверки оказываются проведенными ранее, чем более эффективные, тогда как их просто следовало бы пропустить.

Схему поиска, построенную методом «средней точки», можно привести к оптимальной, если при определении последовательности проверок руководствоваться уменьшением критерия эффективности (8.9). При этом, конечно, должны быть учтены особенности системы. Реализацией указанного пересмотра последовательности проверок является схема, показанная на рис. 8.11.

Каждый из рассмотренных приемов построения рациональной схемы поиска отказов может быть применен с наибольшей эффективностью только при соблюдении совершенно определенных условий. В самом общем виде сформулировать эти условия не представляется возможным.

Однако можно и необходимо дать некоторые рекомендации, относящиеся к применению этих приемов. Так, систематизация поиска отказов на основе критерия (8.9) может успешно применяться при независимых элементах и наличии информации о необходимых затратах времени на проверки и ве-

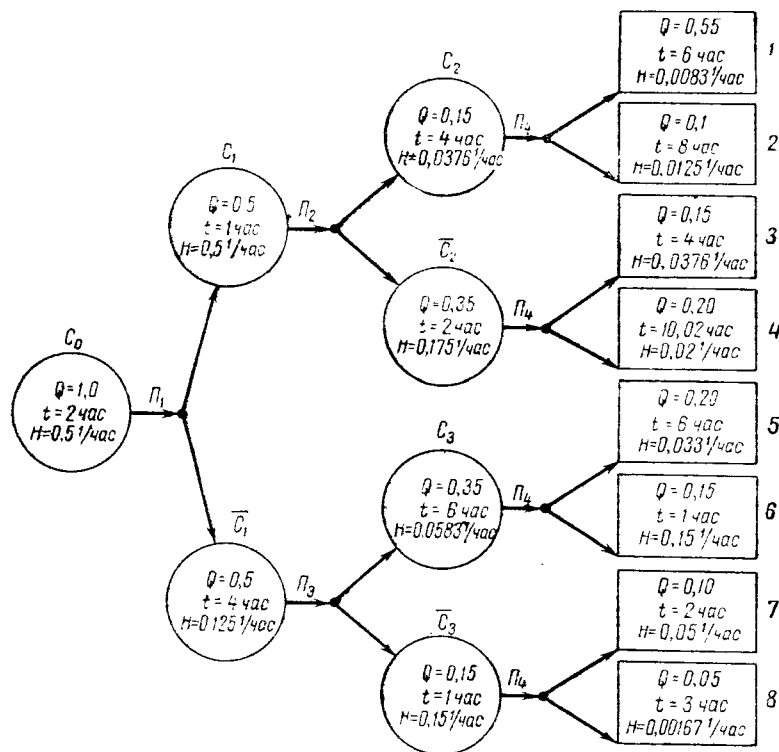


Рис. 8.10. Пример схемы поиска по методу «средней точки»

роятностях появления отказов. Наоборот, метод «средней точки» удобен при отсутствии информации о временах и вероятностях. Если особенности системы допускают, то оптимальным будет метод «средней точки», учитывающий эффективность проверок.

Следует упомянуть идею самонастраивающегося обнаружителя случайных отказов элементов систем. Основанием для этого является устройство, называемое вероятностным селектором параметров, оно располагает элементы системы в ряд по вероятностям отказов, заложенным в него [93].

Добиваясь того, чтобы распределение вероятностей селектора совпадало с распределением вероятностей отказов элементов, можно получить устройство с оптимально систематизированной схемой поиска отказов.

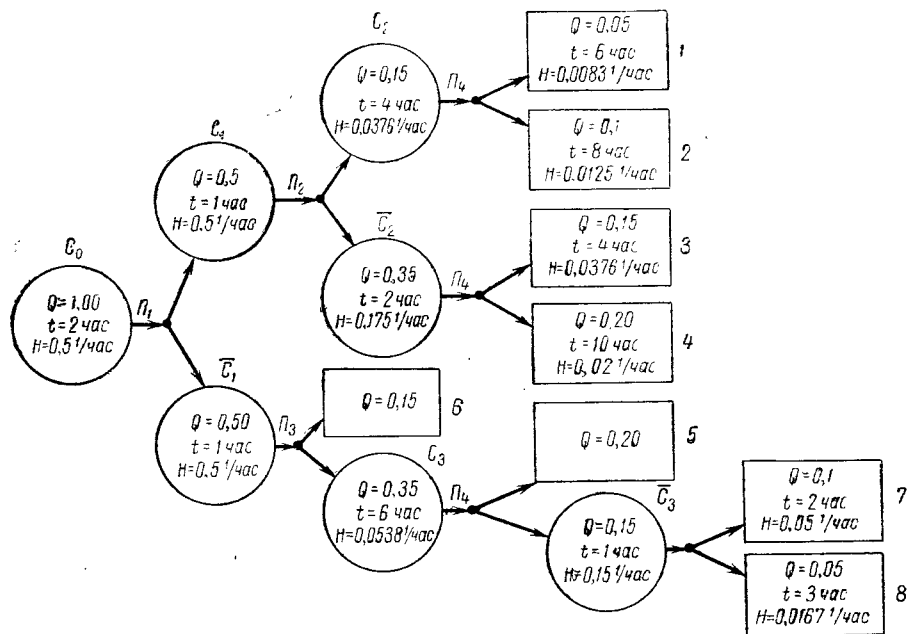


Рис. 8.11. Оптимальная схема поиска по методу «средней точки»

## § 8.5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

Для индикации безотказной работы АУС их рабочие параметры, входные и выходные сигналы необходимо непрерывно контролировать. Отклонение контролируемых сигналов от заданных уровней вызывает срабатывание индикаторов отказов. В этих случаях необходимо прежде всего определить, какой же именно сигнал из всей совокупности контролируемых сигналов вышел из пределов допуска. Эта задача подобна задаче отыскания отказавшего элемента.

Средства, методы и приемы отыскания отказов отличаются большим разнообразием. Это объясняется прежде всего многообразием автоматических управляющих систем, принципов и методов, реализуемых в них, технических средств реализации. Однако при всем их множестве, методам индикации свойственны и некоторые общие признаки, определяемые общностью задач проверки.



Современные системы автоматического контроля по виду связи с проверяемой АУС, целевому назначению и принципам построения можно разбить на шесть основных групп:

- 1) внешние автономные системы контроля;
- 2) внешние системы контроля с датчиками, находящимися в контролируемой аппаратуре;
- 3) внутренние системы контроля с общими коммутационно-индикаторными блоками и необходимыми датчиками;
- 4) внутренние системы контроля с автономными контрольными приборами;
- 5) системы для автоматического отыскания отказавших элементов;
- 6) системы автоматической индикации отказов и автоматического подключения резерва.

Внешние автономные системы контроля применяются обычно при проверке навигационных систем и радиолокационного оборудования. В состав этих систем входит автономная контрольно-измерительная установка с необходимыми индикаторами. Проверка основана на использовании излучаемой энергии.

Внешние системы контроля с датчиками, находящимися в контролируемой аппаратуре, применяются при проверке сложных комплексов АУС, например бортовой аппаратуры современных ракет. В состав этих систем обычно входят автоматическая испытательная установка и встроенные в контролируемую систему датчики. Испытательная установка подключается к проверяемой аппаратуре посредством специальных кабелей и разъемов.

Внешние системы контроля обеспечивают проверку основных параметров аппаратуры, входных и выходных сигналов функциональных элементов. Наиболее совершенные системы дают возможность обнаруживать отказавшие узлы, элементы и детали (электронные лампы, сопротивления, переключатели и пр.). При этом применяются сменные программы проверок, записанные на перфокартах, перфолентах или магнитных лентах. Программа, определяющая содержание проверок и последовательность их проведения, может изменяться в зависимости от особенностей контролируемой аппаратуры. Результаты проверок могут регистрироваться.

Внутренние системы контроля с общими коммутационно-индикаторными блоками (рис. 8.12) применяются для контроля параметров и проверки безотказной работы блоков и узлов систем. В их состав входят различные встроенные датчики *ВД*, генераторы *ВГ*, коммутаторы *ВК* и прочие элементы, конструктивно принадлежащие системе управления, функционально — системе проверки, и коммутационно-измерительный блок *КИБ*, работающий по

определенной программе. Такие системы обеспечивают непрерывный контроль всех основных параметров аппаратуры, а также отыскание отказавших блоков и элементов.

Внутренние системы контроля с автономными приборами (рис. 8.13) отличаются тем, что в них

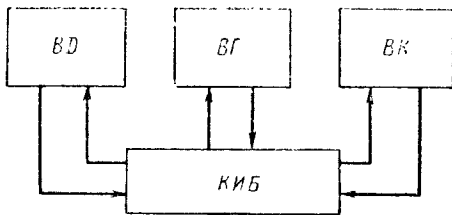


Рис. 8.12. Внутренняя система контроля с общим коммутационно-индикаторным блоком

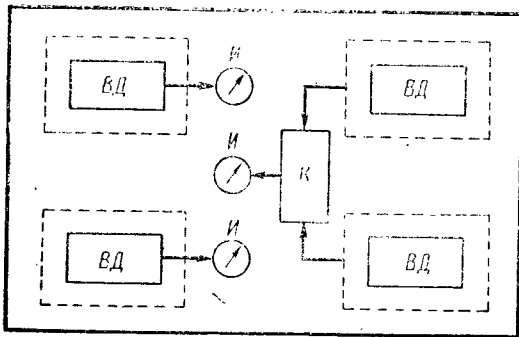


Рис. 8.13. Внутренняя система контроля с автономными контрольными приборами

помощью специальной схемы сравнения напряжений (компаратора). Выходные сигналы в виде напряжений постоянного тока от всех сравнивающих устройств подводятся к специальному коммутатору, опрашивающему в определенной последовательности сравнивающие устройства и подающему сигнал от них на специальный тестер, обнаруживающий отказавший элемент.

Принципиальная схема сравнивающего устройства показана на рис. 8.14, а [94]. Устройство имеет два канала и может контролировать два независимых сигнала. Кроме контролируемых сигналов, на каждый канал подается отрицательное опорное напряжение  $U_{оп}$  от внешнего источника. Постоянная составляющая проверяемого сигнала сравнивается с

каждый встроенный датчик *ВД* имеет индикатор *И*, который либо непрерывно показывает значение контролируемого параметра, либо же подключается через коммутатор *К*. В некоторых случаях эти системы обеспечивают лишь допускowy контроль по принципу «в норме» — «не в норме».

Системы автоматического отыскания отказавших элементов работают по специальным программам, задаваемым магнитной записью, перфокартами или перфолентами. При этом каждый элемент АУС может контролироваться, например, с

опорным напряжением. Если напряжение сигналов превышает опорное, то конденсаторы  $C_2$  и  $C_4$  заряжаются таким образом, что полярности их обкладок имеют такие знаки, которые показаны на схеме. Заряд конденсаторов пропорционален разности сравниваемых напряжений. Если напряжение входных сигналов оказывается меньше опорных напряжений,

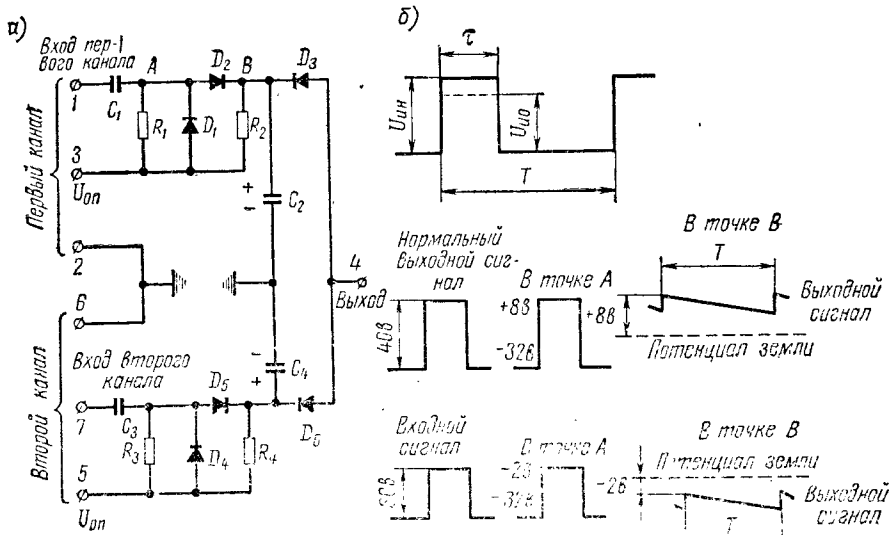


Рис. 8.14. К описанию устройства сравнения напряжений:

а) — принципиальная схема, б) — эпюры напряжений

то полярность напряжений на конденсаторах  $C_2$  и  $C_4$  меняется на обратную, а величина этого напряжения будет пропорциональна новой разности сравниваемых напряжений. В зависимости от этого выходное напряжение сравнивающего устройства имеет также два значения. Если контролируемый элемент работает безотказно и его выходной сигнал не ниже предельно допустимого уровня, то выходное напряжение сравнивающего устройства равно нулю. В случае отказа контролируемого элемента его выходной сигнал становится меньше предельно допустимого и на выходе сравнивающего устройства появляется отрицательное напряжение. Контролируемый сигнал подается в первый канал через цепочку  $R_1C_1$ . Ее постоянная времени должна быть значительно больше длительности  $\tau$  самого широкого контролируемого импульса. Аналогично выбирается постоянная времени цепи  $R_3C_3$ . Эпюры напряжений (рис. 8.14) поясняют работу схемы. Диод  $D_1$  и сопротивление  $R_1$  предназначены для выделения поло-

жительной постоянной составляющей сигнала, соответствующей по величине отрицательному опорному напряжению  $U_{оп}$ . Выделенный сигнал через диод  $D_2$  заряжает конденсатор  $C_2$ . Постоянная времени цепи  $R_2C_2$  должна быть много больше периода следования контролируемых импульсов. Если конденсатор  $C_2$  заряжен положительно относительно земли, то диод  $D_3$  имеет обратное смещение, и выходной сигнал устройства равен нулю. Если же конденсатор  $C_2$  заряжается отрицательно относительно земли, то диод  $D_3$  получает прямое смещение. Контролируемый сигнал при этом будет замыкаться через сопротивление  $R_2$ , а напряжение на выходе понизится относительно потенциала земли на величину разности сравниваемых напряжений. Второй канал работает аналогично первому.

Рассмотренная схема контролирует сигналы по минимальному уровню. Однако, изменяя полярности выходных сигналов устройства, его можно применить и для контроля сигналов по максимальному уровню. Помещая на выходе устройства фильтры верхних частот, можно контролировать время нарастания сигналов.

Для систем, в которых выходные сигналы различных элементов возможно свести с помощью рассмотренного устройства сравнения к напряжению, расшифровывающему отказ, нетрудно применить специальные анализаторы этих напряжений, осуществляющие автоматическую индикацию отказов [94]. Некоторые справочные данные по системам автоматического контроля, выпускаемым в США, приведены в [94].

Особый интерес представляют системы автоматической индикации отказов и автоматического подключения резерва. По тому, какие манипуляции совершаются в этих системах над контролируруемыми, эталонными и выходными сигналами, их можно разделить на следующие три группы: системы сравнения с эталонным сигналом, системы введения контрольного сигнала, системы сравнения выходных сигналов.

К измерительно-контрольным устройствам, предназначенным для автоматического обнаружения отказов и для подключения резерва (ПИО, § 7.2), предъявляются два основных требования: во-первых, они не должны оказывать заметного влияния на работу контролируемой системы, и, во-вторых, они должны отличаться высокой надежностью, чтобы общая надежность системы существенно повышалась при оснащении ее такими индикаторами. ПИО будет работоспособен при условии развязки входов контролируемых и переключаемых систем, блоков или элементов, так как только

при этом отказ одного звена системы не будет нарушать условия безотказной работы других.

Рассмотрим принципиальные возможности построения ПИО перечисленных выше групп. В первом случае обнаружить отказ системы или отдельного ее блока можно по их выходному сигналу. Возможности автоматического подключения резерва рассматривались в § 5.7. В примерной схеме, изображенной на рис. 8.15, ПИО сравнивает выходной сигнал устройства до и после переключателя  $\Pi$  для того, чтобы отказ переключателя не вызывал отказа устройства. Выходной сигнал снимается с блока  $B_a$  через переключатель  $\Pi$  до тех пор, пока оба входных сигнала индикатора отказов одинаковы. В противном случае к выходу устройства подключается резервный блок  $B_b$ . Это может произойти, если либо основной блок  $B_a$ , либо индикатор отказов, либо и блок  $B_a$  и ПИО откажут. Блок  $B_a$  должен иметь несколько выходных сигналов, определяемых рабочими режимами, чтобы ПИО обнаруживал отказы при всех режимах его работы. Схема ПИО, показанная на рис. 8.15, содержит детектор и сумматор сигналов  $ДС$ , усилитель с устройством сравнения  $УУС$  и многоконтактный переключатель  $\Pi$ . Каждый сигнал, поступающий в ПИО с выхода блока  $B_a$ , детектируется по амплитудному значению. Затем постоянные уровни суммируются. Если сигналы, приходящие на входы ПИО, находятся в норме, то обе сетки дифференциального усилителя имеют нулевой потенциал относительно катода. При отказе блока  $B_a$  произойдет изменение амплитудных значений сигналов и перераспределение потенциалов сеток дифференциального усилителя. Изменение потенциала сетки более чем на  $\pm \Delta U_c$  ( $\Delta U_c$  определяется чувствительностью электромагнитного реле  $P_1$ , обмотка которого включена в цепь нагрузки балансного усилителя) вызовет срабатывание реле  $P_1$ . Последнее своими нормально открытыми контактами  $1P_1$  включит обмотку возбуждения многоконтактного реле  $P_2$ , производящего переключение выходов системы к блоку  $B_b$ . При срабатывании реле  $P_1$  включается также индикатор отказа ИО и соответствующий резервный элемент. В случае непоступления сигналов с блока  $B_a$  разбалансировка усилителя и срабатывание реле  $P_1$  будут вызваны опорным напряжением. Нетрудно видеть, что принципиально такой ПИО может быть выполнен на любое число сигналов.

Во втором случае обнаружение отказа производится с помощью специального контрольного сигнала, вводимого в систему. При этом экспериментально снимается, например, амплитудно-фазовая характеристика системы и выясняется, находится ли она в пределах допусков. Контрольный сигнал может вводиться либо периодически, либо по мере необхо-

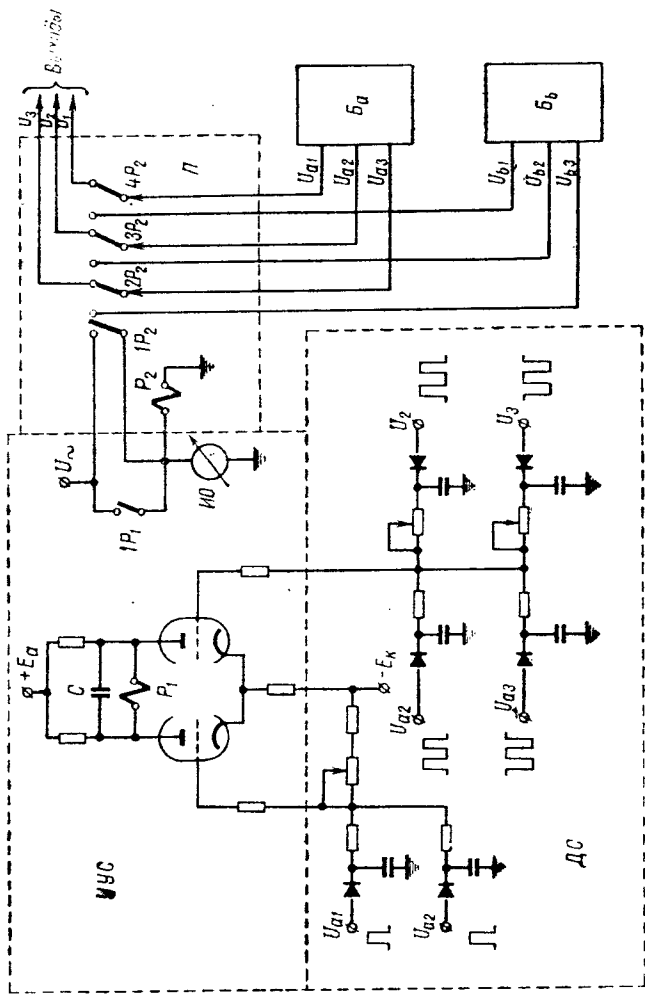


Рис. 8.15. Пример схемы ПИУ

димости. Он должен обладать селективностью, т. е. он не должен влиять на все прочие устройства АУС, однозначно показывая либо безотказную работу, либо отказ проверяемого узла или блока. Для этого, например, частота контрольного сигнала должна совпадать со средней частотой полосы пропускания контролируемого звена и лежать вне пределов полосы пропускания всех прочих звеньев. Метод контрольного сигнала особенно эффективен при проверке следящих систем.

В третьем случае отказы можно обнаружить также сравнением выходных сигналов по схеме, показанной на рис. 8.16. Здесь  $B_a$  и  $B_b$  — блоки контролируемой резервированной

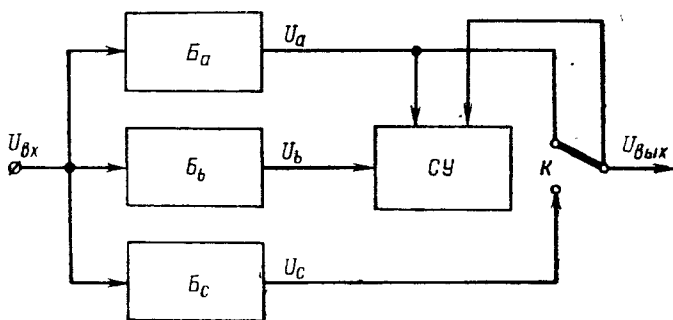


Рис. 8.16. Схема обнаружения отказов посредством сравнения выходных сигналов

системы; блок  $B_c$  может быть либо идентичным  $B_a$  и  $B_b$ , либо представлять собой их электронную модель. Если сравнивающее устройство СУ обнаруживает отклонение сравниваемых сигналов независимо от того, отказало ли звено  $B_a$ ,  $B_b$  или ключ  $K$ , то выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$  будет сниматься с блока  $B_c$ . Эта схема работоспособна при условии развязки входов  $B_a$ ,  $B_b$  и  $B_c$ , так как только при этом отказ одного звена не будет нарушать условий безотказной работы других. В отличие от ПИО, работающего по методу сравнения рабочего сигнала с эталонным, в данном случае нет необходимости знать абсолютное значение выходного сигнала, так как здесь ПИО реагирует на разность сигналов  $U_a$  и  $U_b$ . ПИО этого типа очень удобен для применения в цифровых вычислительных машинах и в импульсных АУС.

Представляет значительный интерес создание самонастраивающихся переключающих индикаторов отказов сравнивающего типа.

Выясним возможности построения автоматически резервированной системы с различной кратностью резервирования. ПИО, предназначенный для работы в такой системе, должен находить и отключать отказавшее звено, заменяя его очередным резервным. Рассмотрим принцип его действия в случае  $\chi = 2$ , предполагая все три резервируемые системы идентичными. Сравнимые координаты этих систем с точностью до  $\epsilon$  могут считаться в каждый момент времени равными, пока все системы работают безотказно. При отказе рабочей системы ее координаты будут отличаться от соответствующих координат безотказно действующих двух других. Например, если рассматривать напряжения на входах усилителей  $U_{вх}$ , то при отказе первой системы  $U_{вх_1} \neq U_{вх_2}$ ,  $U_{вх_1} \neq U_{вх_3}$ , но  $U_{вх_2} = U_{вх_3}$ . Следовательно, из трех разностей  $U_{вх_1} - U_{вх_2}$ ,  $U_{вх_2} - U_{вх_3}$  и  $U_{вх_3} - U_{вх_1}$  только вторая  $U_{вх_2} - U_{вх_3} = 0$ , а первая  $U_{вх_1} - U_{вх_2} \neq 0$  и третья  $U_{вх_3} - U_{вх_1} \neq 0$ . При отказе второй системы  $U_{вх_1} - U_{вх_2} \neq 0$ ,  $U_{вх_2} - U_{вх_3} \neq 0$ , но  $U_{вх_3} - U_{вх_1} = 0$ . При отказе третьей  $U_{вх_1} - U_{вх_2} = 0$ , но  $U_{вх_2} - U_{вх_3} \neq 0$  и  $U_{вх_3} - U_{вх_1} \neq 0$ . Эти признаки могут быть положены в основу работы ПИО.

Если все три разности входных напряжений усилителей равны нулю, то ПИО должен фиксировать исправную работу всех трех систем, определяя для первой рабочий режим, а для второй и третьей — режим облегченного резерва. При отказе первой системы ПИО должен обнаружить этот отказ, анализируя соответствующие разности сигналов, и включить резервную вторую, определив для первой режим ремонта. При отказе второй системы и завершении восстановления первой, ПИО включает резервную третью, при отказе третьей и завершении восстановления второй отказавшей — первую и т. д. ПИО, работающий по такой схеме, будет автоматически осуществлять циклическое резервирование [41, 42].

Введем упрощающие обозначения:  $A_1 = U_{вх_1} - U_{вх_2}$ ,  $A_2 = U_{вх_2} - U_{вх_3}$ ,  $A_3 = U_{вх_3} - U_{вх_1}$ . Так как в реальной системе, подверженной влиянию различных возмущений, величины  $A_i \neq 0$ , то можно допустить существование равенств  $A_i = 0$  с точностью до  $\epsilon$ , определяемой чувствительностью соответствующих воспринимающих элементов. Если все  $|A_i| < \epsilon$ , то система исправна. Если два значения  $|A_i| > \epsilon$ , то рабочая система отказывает.

При этих условиях достаточно просто может быть определена логическая и структурная схема ПИО. Так, обозначая через  $F$  управляющую функцию, будем понимать под  $F_1$  функцию включения первого звена при отказе третьего, под



$F_2$  — функцию включения второго звена при отказе первого и под  $F_3$  — функцию включения третьего звена при отказе второго.

Вводя соответствующие обозначения, запишем символами двоичной арифметики таблицу функций (табл. 8.2), которую требуется реализовать в схеме.

Таблица 8.2

Переключающие функции ПИО при  $\lambda=2$

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0

Пользуясь этой таблицей и так называемыми минимальными многочленами [95], по правилам алгебры логики составим алгебраическое выражение для искомых управляющих функций:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \bar{A}_1 A_2 A_3 \\ F_2 &= A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 \\ F_3 &= A_1 A_2 \bar{A}_3 \end{aligned} \right\} \quad (8.10)$$

Эти выражения получаются достаточно простыми, так как каждая функция описывается лишь одним минимальным многочленом.

Построить логическую схему рассматриваемого ПИО в соответствии с этими выражениями не трудно. Полная структурная схема ПИО будет отличаться от логической лишь добавлением вычитающих элементов, на выходах которых с точностью до  $\epsilon$  образуются значения  $[A_i]$ . Эта схема показана на рис. 8.17.

Эту схему можно минимизировать за счет исключения элементов  $I_i$  и выполнения элементов  $I$  по схеме с тремя входами. Однако минимизация логической схемы может привести к неоправданному усложнению ПИО.

Пользуясь аналогичными обозначениями для случая  $\lambda=3$ , получим  $A_1 = U_{вх_1} - U_{вх_2}$ ,  $A_2 = U_{вх_2} - U_{вх_3}$ ,  $A_3 = U_{вх_3} - U_{вх_4}$  и  $A_4 = U_{вх_4} - U_{вх_1}$ . Тогда таблица переключающих функций примет следующий вид (табл. 8.3):

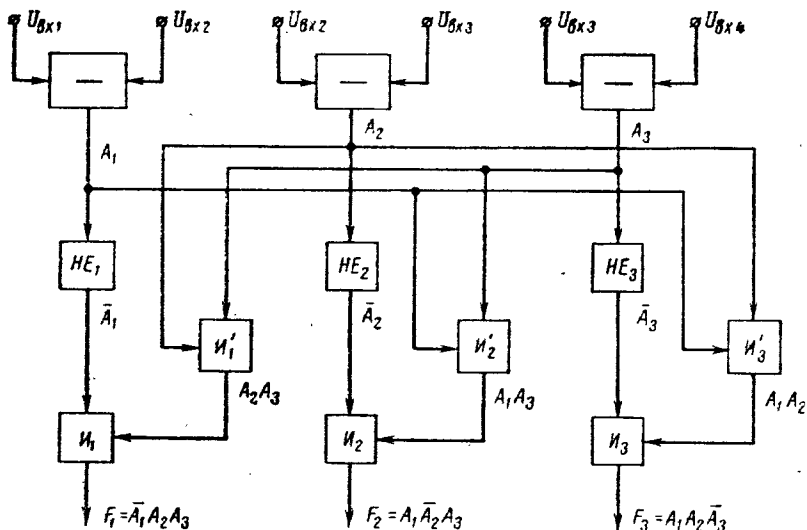


Рис. 8.17. Схема ПИО системы с кратностью резервирования  $\lambda = 2$

Таблица 8.3

Переключающие функции ПИО при  $\lambda = 3$

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
1	0	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1
0	0	1	1	1	0	0	0

Соответствующие минимальные многочлены

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 A_4 \\ F_2 &= A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 A_4 \\ F_3 &= A_1 A_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 \\ F_4 &= \bar{A}_1 A_2 A_3 \bar{A}_4 \end{aligned} \right\} \quad (8.11)$$

Логическая схема ПИО при  $\lambda = 3$  также может быть составлена из обычных логических элементов. В минимизированном варианте она показана на рис. 8.18. Нетрудно видеть, что эта схема отличается лишь увеличением ее порядка, который, как и в предыдущем случае, на единицу больше кратности резервирования, т. е.

$$v = \lambda + 1. \quad (8.12)$$

Для случая  $\lambda = 4$   $A_1 = U_{вх1} - U_{вх2}$ ,  $A_2 = U_{вх2} - U_{вх3}$ ,  $A_3 = U_{вх3} - U_{вх4}$ ,  $A_4 = U_{вх4} - U_{вх5}$  и  $A_5 = U_{вх5} - U_{вх1}$ . По аналогии с предыдущими системами переключающих функций имеем

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \bar{A}_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 A_4 A_5 \\ F_2 &= A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3 A_4 A_5 \\ F_3 &= A_1 A_2 \bar{A}_3 \bar{A}_4 \bar{A}_5 \\ F_4 &= \bar{A}_1 A_2 A_3 \bar{A}_4 \bar{A}_5 \\ F_5 &= \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3 A_4 \bar{A}_5 \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

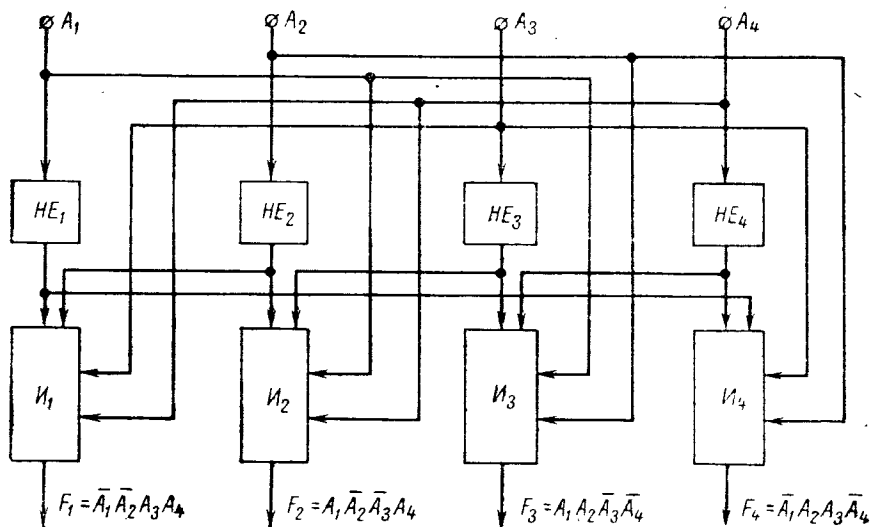


Рис. 8.18. Минимизированная схема ПИО системы с краткостью резервирования  $\lambda = 3$

Легко видеть, что и в этом случае схема ПИО будет отличаться от предыдущей только увеличенным на единицу порядком ( $\nu = 5$ ).

Из рассмотренных примеров следует, что:

1) число элементов  $n$ , образующих переключающие функции  $F_i$ , для любой кратности резервирования  $\lambda > 1$  определяется соотношением

$$n = \lambda + 1 = m, \quad (8.14)$$

где  $m$  — общее число систем, находящихся в резервном соединении;

2) число переключающих функций  $N$  для любой кратности резервирования  $\lambda > 1$  определяется аналогичной формулой

$$N = \lambda + 1 = m; \quad (8.15)$$

3) порядок схемы ПИО равен числу элементов переключающих функций или числу самих переключающих функций, т. е. числу систем, находящихся в резервном соединении.

Из изложенного следует также алгоритм самонастройки ПИО, приводящей к изменению его структуры и обеспечивающей нормальное его функционирование. Именно после отказа первой (работающей) системы схема ПИО соответствующим переключением должна быть переведена в структурное состояние, соответствующее новой уменьшенной на единицу кратности резервирования. При отказе следующих систем порядок схемы ПИО всякий раз будет уменьшаться на единицу. Восстановление отказавшей системы должно приводить к получению структурного состояния схемы ПИО, соответствующего увеличенной на единицу кратности резервирования, т. е. к увеличению порядка схемы ПИО.

Можно видеть, что при таком алгоритме самонастройки обеспечивается нормальное функционирование ПИО и при одновременном отказе (или восстановлении) нескольких систем.

Реализация указанного алгоритма может быть осуществлена простой коммутацией соответствующих цепей. Покажем это на примере схемы, изображенной на рис. 8.17. При отказе первой системы, например, достаточно отключить линию  $A_1$  от выхода первого вычитающего элемента, а при отказе второй системы — линию  $A_2$  от выхода второго вычитающего элемента. Соответственно при восстановлении отказавших систем линии  $A_i$  должны восстанавливаться.

Таким образом, введение ПИО в автоматические управляющие системы дает возможность эффективно решать задачу обнаружения отказов. Быстрое и точное обнаружение отказов повышает удобство эксплуатации систем и увеличивает тем самым их надежность.

## § 8.6. ИНДИКАТОР ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Многие устройства дискретных управляющих систем собраны на таких широко распространенных элементах электронных схем как триггер, мультивибратор, одновибратор, блокинг-генератор и пр. Очень часто число этих элементов оказывается чрезвычайно большим.

Трудности индикации отказов в таких устройствах заключаются в том, что они могут вызываться сбоем (§ 1.3) перечисленных элементов. Например, при сбое одного из тригге-

ров счетчика или регистра последние будут продолжать работать после его восстановления, однако информация, полученная с них, будет ложной, т. е. фактически эти устройства окажутся отказавшими.

Индикатор отказов, предназначенный для автоматического обнаружения сбоев в различного вида триггерных схемах на полупроводниковых триодах, может состоять из трех основных частей: эталонной пересчетной или любой другой (двоичный счетчик, декада, регистр и пр.) схемы (ЭС), сравнивающего (СУ) и регистрирующего (РУ) устройств (рис. 8.19) [107, 108, 109].

Эталонная схема должна быть аналогична проверяемой, но только выполненной на более стабильных элементах и работающей в условиях, заведомо исключающих появление их сбоев.

Сравнивающее устройство является основным звеном индикатора отказов. В простейшем виде блок-схема СУ изображена на рис. 8.20.

Проверяемая и эталонная схемы запускаются от одного тактового генератора. В исходное состояние, одинаковое для обеих схем, их приводит сигнал сброса; в этом состоянии правые половины триггеров открыты, левые закрыты.

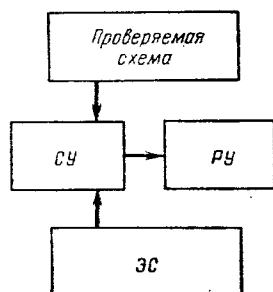


Рис. 8.19. Схема автоматического индикатора сбоев триггерных схем

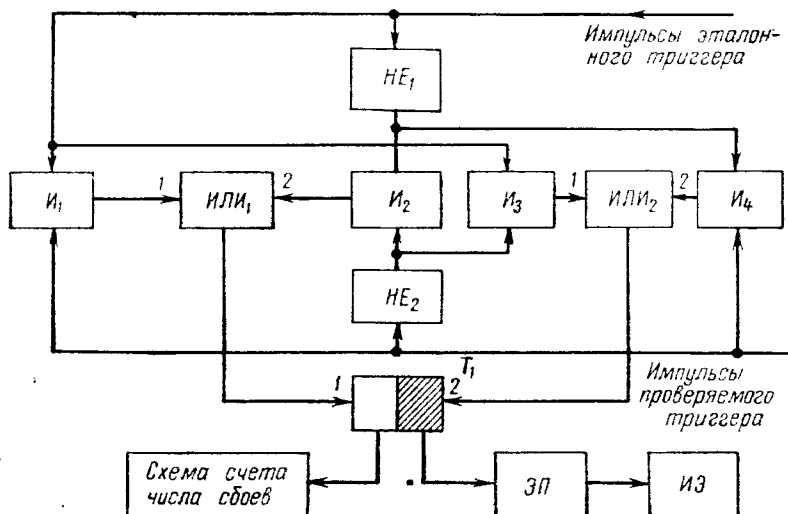


Рис. 8.20. Блок-схема сравнивающего устройства

С момента включения схем и до отключения тактового генератора работа проверяемой схемы при отсутствии сбоев ее элементов не будет отличаться от работы эталонной.

В этом случае эпюры напряжений на соответствующих одинаковых коллекторных сопротивлениях триггеров будут идентичными (рис. 8.21, а, б). При наличии одиночных случайных сбоев элементов

проверяемой схемы эпюры напряжений проверяемого и эталонного триггера будут различными (рис. 8.21, а, в, г, д).

Схема СУ управляется отрицательными импульсами. При отсутствии сбоев проверяемого триггера, когда он работает в фазе с эталонным, на вход 1 ячейки ИЛИ<sub>1</sub> (рис. 8.20) с выхода ячейки И<sub>1</sub> поступают импульсы отрицательной полярности с длительностью, равной длительности импульсов, снимаемых с

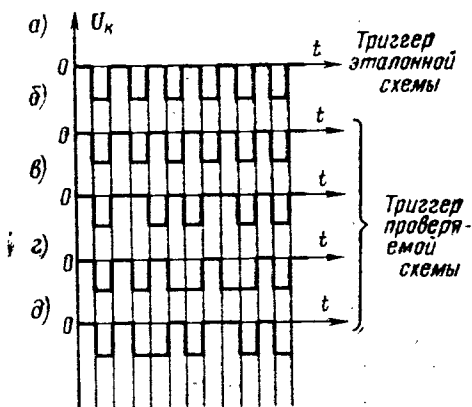


Рис. 8.21. Примерные эпюры напряжений эталонного и проверяемого триггеров

коллекторов равнозарядных триггеров проверяемой и эталонной схем. Это происходит при отрицательной фазе импульсов триггеров. При положительной фазе импульсов триггеров, работа которых сравнивается, импульсы отрицательной полярности подаются на вход 2 ячейки ИЛИ<sub>1</sub> с выхода ячейки И<sub>2</sub>, управляемой импульсами отрицательной полярности, которые получают на выходах инверторов соответственно ячеек НЕ<sub>1</sub> и НЕ<sub>2</sub>.

С выхода ячейки ИЛИ<sub>1</sub> отрицательные импульсы подаются на открытую половину триггера Т<sub>1</sub>, собранного по схеме с отдельными входами. Эти импульсы не вызывают срабатывания триггера Т<sub>1</sub>, в результате чего будет появляться сигнал устойчивой работы проверяемого триггера, фиксируемого индикаторным элементом (ИЭ), развязанным с первым выходом триггера посредством эмиттерного повторителя (ЭП).

При сбое проверяемого триггера рабочей схемы он будет работать в противофазе с равнозарядным эталонным. Поэтому сигнала на выходах ячеек И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> и ИЛИ<sub>1</sub> не будет. Теперь при отрицательной фазе сигнала эталонного триггера и положительной фазе (противофазе) проверяемого триггера будет срабатывать ячейка И<sub>3</sub>, а при положительной фазе

сигнала эталонного триггера и отрицательной фазе (противофазе) проверяемого — ячейка  $I_4$ .

Сигналы с ячеек  $I_3$  и  $I_4$  подаются соответственно на входы 1 и 2 ячейки  $ИЛИ_2$ , а выходной отрицательный импульс ячейки  $ИЛИ_2$  будет воздействовать через вход 2 (запертую половину) триггера  $T_1$  и опрокинет его. Сигнал на выходе триггера  $T_1$  явится сигналом отказа — сбоя проверяемого элемента контролируемой схемы. Выходной элемент  $СУ$  — триггер  $T_1$  — будет находиться в состоянии, указывающем на отказ, до тех пор, пока не произойдет восстановление отказавшего элемента после второго сбоя, приводящее к срабатыванию ячеек  $I_1$ ,  $I_2$  и  $ИЛИ_1$ , т. е. к исчезновению сигнала отказа на выходе  $T_1$ .

Выход  $T_1$  связан с пересчетной схемой, автоматически подсчитывающей число сбоев контролируемого элемента за время проверки. В случае появления непрерывающегося отказа, требующего замены проверяемого триггера, пересчетная схема будет считать непрерывно сбой, следующие с тактовой частотой.

Рассмотренное  $СУ$  имеет существенный недостаток, который легко заметить, если иметь в виду, что реальные нагруженные триггеры вырабатывают не  $\Pi$ -образные, а трапециевидные импульсы с конечной крутизной фронтов. Вследствие этого при устойчивой работе проверяемого элемента, когда его сигнал находится в фазе с аналогичным сигналом эталонного элемента, на выходах ячеек  $I_3$  и  $I_4$  могут появляться паразитные отрицательные импульсы с длительностью, примерно равной длительности фронтов, и амплитудой, равной  $0,6 \div 0,7$  от амплитуды сравниваемых импульсов.

Аналогичные паразитные импульсы могут появиться на выходах ячеек  $I_1$  и  $I_2$  при неустойчивой работе проверяемой схемы, т. е. при сбоях контролируемого триггера, когда его сигнал находится в противофазе с сигналом эталонного элемента.

В первом случае наличие паразитных сигналов может вызывать срабатывание выходного триггера, т. е. появление ложного сигнала сбоя, во втором — ложного сигнала устойчивой работы, т. е. в обоих случаях приводит к отказам самого индикатора.

Блок-схема усовершенствованного  $СУ$ , свободного от указанного недостатка, показана на рис. 8.22. Здесь импульсы эталонного триггера через эмиттерный повторитель  $ЭП_1$  подаются на дифференцирующую цепь  $ДЦ_1$ . Остроугольные импульсы обеих полярностей, связанные с фронтами импульсов триггера, с выхода  $ДЦ_1$  идут по двум каналам на входы ячейки отрицания  $НЕ_1$  и эмиттерного повторителя  $ЭП_3$ .

Эмиттерный повторитель на положительные импульсы не реагирует, поэтому на выходе  $ЭП_3$  будут повторены лишь отрицательные импульсы  $ДЦ_1$ . Последние через усилитель  $У_1$  поступают на вход линии задержки  $ЛЗ_2$  и с ее выхода на ячейку  $И_2$ . На второй вход ячейки  $И_2$  через  $ЭП_7$  приходят отрицательные импульсы с проверяемого триггера. Отри-

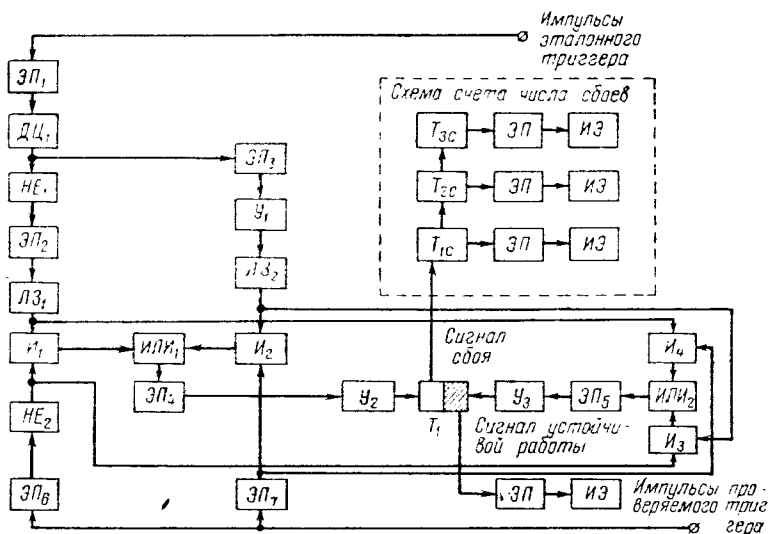


Рис. 8.22. Схема усовершенствованного сравнивающего устройства

цательные импульсы с выхода  $ИЛИ_2$  через  $ЭП_4$  и  $У_2$  приходят на открытую половину  $T_1$  выходного триггера  $СУ$  и не перебрасывают его, а вырабатывают лишь сигнал устойчивой работы. Так осуществляется проверка триггера при отрицательной фазе сигнала.

Элемент  $НЕ_1$  наоборот реагирует лишь на положительные импульсы, снимаемые с выхода  $ДЦ_1$ . Отрицательные импульсы, полученные на выходе  $НЕ_1$ , через  $ЭП_2$  проходят на  $ЛЗ_1$  и далее на вход ячейки  $И_1$ , на второй вход которой через  $ЭП_6$  и  $НЕ_2$  приходят отрицательные импульсы, соответствующие положительным импульсам проверяемого триггера. Отрицательные импульсы с выхода  $И_1$  через  $ИЛИ_1$ ,  $ЭП_4$  и  $У_2$  также воздействуют на открытую половину  $T_1$ , оставляя триггер в начальном состоянии, соответствующем отсутствию сигнала сбоя. Так осуществляется проверка триггера при положительной фазе сигнала.

При сбое проверяемого триггера, как было показано выше, сигнала на выходе ячейки  $ИЛИ_1$  не образуется. При отрица-



тельной фазе сигнала эталонного триггера и положительной фазе (противофазе) проверяемого триггера сработает ячейка  $I_3$ , а при положительной фазе сигнала эталонного триггера и отрицательной фазе (противофазе) проверяемого — ячейка  $I_4$ .

Сигнал с ячеек  $I_3$  и  $I_4$  через ячейку ИЛИ<sub>2</sub>, ЭП<sub>5</sub> и  $У_3$  будет подан на запертую половину  $T_1$  и перебросит его в состояние, при котором появится сигнал сбоя.

На  $T_1$  воздействует только первый импульс ячейки ИЛИ<sub>2</sub>, ко всем последующим импульсам, поступающим с выхода этой ячейки, триггер  $T_1$  будет нечувствителен до тех пор, пока второй сбой не перебросит его в исходное состояние.

С выходом  $T_1$  связана пересчетная схема с индикаторными элементами. Она автоматически подсчитывает число сбоев контролируемого элемента и обеспечивает считывание этого числа за время проверки.

Недостаток первой схемы здесь устраняется дифференцированием импульсов эталонного триггера и сдвигом с помощью линий задержек ЛЗ<sub>1</sub> и ЛЗ<sub>2</sub> остроконечных импульсов примерно на четверть периода колебаний тактового генератора. При этом остроконечные импульсы оказываются расположенными приблизительно посередине длительности прямоугольных, что полностью исключает краевой эффект и появление паразитных и ложных сигналов, характерных для первой схемы СУ.

Принципиальная электрическая схема автоматического индикатора отказов элементов дискретных систем, выполненного в соответствии с усовершенствованной блок-схемой (рис. 8.22), приведена на рис. 8.23.

Описанная схема СУ с дифференцирующей цепью и двумя линиями задержки не является единственно возможной. На рис. 8.24 показана, например, блок-схема, а на рис. 8.25 — принципиальная схема СУ, надежная работа которого обеспечивается соответствующим сдвигом импульсов тактового генератора, поступающих в СУ, относительно импульсов, запускающих эталонную и проверяемую схемы. Сдвинутые посредством ЛЗ импульсы являются как бы стробирующими в соответствующих логических элементах И. В остальном действие этого СУ аналогично работе, рассмотренного ранее.

На рис. 8.26 показан вариант схемы индикатора отказов релейных устройств. Индикатор предназначен для быстрой последовательной проверки замыкания контактов реле и сигнализации о состоянии проверяемого устройства [96]. Эта схема работает следующим образом: пусковой импульс ПИ отпирает триггер  $T_1$  и проходит в схему совпадения  $I_1$ . При подаче синхронизирующего импульса с тактового генератора ТГ сигнал с выхода  $I_1$  подается в возбудитель  $B_1$ . Последний переводит распределитель  $P_1$  из исходного положения в по-

ложение «О». Возбудитель и распределитель собраны на лампах тлеющего разряда. Катоды распределителя присоединены к проверяемым контактам ПК.

Если контакты в цепи катода лампы «О» замкнуты, то сигнал через ячейку  $I_2$  проходит усилитель  $У_5$  и через ячейку

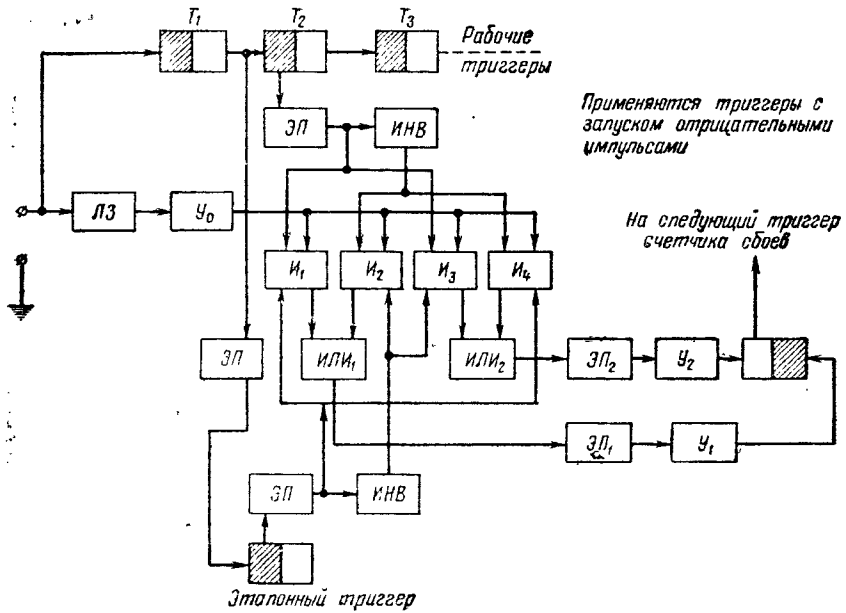


Рис. 8.24. Вариант блок-схемы усовершенствованного сравнивающего устройства

НЕ подается на триггер  $T_2$ . Следующие импульсы тактового генератора переводят распределитель в положение 1, 2, 3 и т. д. При переходе распределителя в положение  $11$  очередной импульс проходит в усилитель  $У_1$ , переводящий триггер  $T_1$  в исходное состояние. При этом ячейка  $I_1$  перестает пропускать импульсы тактового генератора, а система проверки отключается до подачи нового пускового сигнала. Индикация безотказной работы контактов осуществляется при помощи тиратронов.

После каждого цикла проверки в ячейку совпадения  $I_3$  подается с катода  $10$  распределителя эталонный импульс ЭИ. Если при этом число замкнутых контактов равно, например, единице, то триггер  $T_2$  опрокинется один раз и ячейка  $I_3$  будет иметь на выходе нулевой сигнал, так как она окажется запертой. В том случае, когда число замкнутых

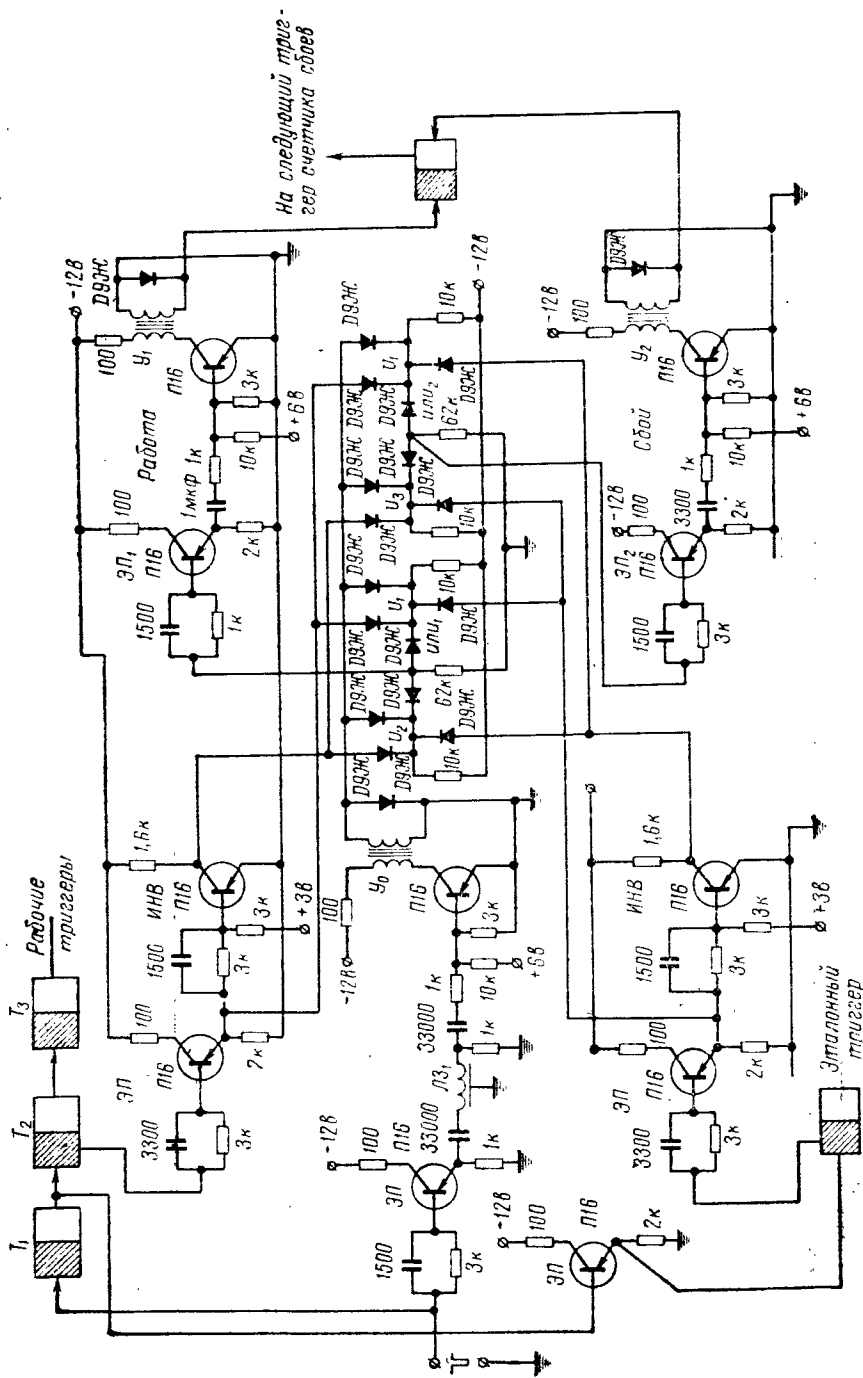


Рис. 8.25. Вариант принципиальной схемы усовершенствованного сравнивающего устройства



контактов оказывается больше единицы или равно нулю, ячейка  $I_3$  открыта, а индикаторный элемент  $ИЭ_1$  (тиратрон) горит.

Если число замкнутых контактов превышает единицу, то на триггер  $T_2$  вслед за первым импульсом придет следующий. Этот импульс опрокинет  $T_2$  и через ячейку  $I_4$  воздействует на индикаторный элемент (тиратрон)  $ИЭ_2$ , показывающий, что число замкнутых контактов превышает единицу. В конце цикла проверки триггер  $T_2$  возвращается в исходное положение посредством импульса, поступающего через усилитель  $У_3$  от триггера  $T_1$ . Присоединение к выходу ячейки  $I_4$  соответствующего счетчика может обеспечить счет числа замкнутых контактов.

Скорость работы описанной схемы ограничена быстродействием л мп тлеющего разряда.

В [110] рассмотрены задачи синтеза логических схем контроля состояния сложных систем методами теории информации, а также задачи минимизации числа признаков, характеризующих состояние системы. Индикация отказов методами контрольных посылок и квитирования, т. е. посылки того сигнала, передача которого нарушается данным отказом, рассмотрена в [111].

Интенсивность отказов некоторых элементов <sup>1</sup>

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Адаптеры волноводов . . . . .	9,31	3,475	0,139
Аккумуляторы . . . . .	19,3	7,2	0,40
Акселерометры . . . . .	7,5	2,8	0,35
Акселерометры тензометрического типа . . . . .	21,4	8,0	1,00
Амортизаторы . . . . .	3,37	1,0	0,3
Амортизаторы кольцевые . . . . .	0,073	0,0375	0,02
Антенны . . . . .	3,52	2,0	0,48
Антенные переключатели . . . . .	5,38	4,0	3,23
Арматура различная . . . . .	0,121	0,087	0,0035
Баки . . . . .	2,52	1,5	0,48
Батареи заряжаемые . . . . .	14,29	1,4	0,5
Вентили соленоидные . . . . .	19,7	11,0	2,27
Вентиляторы . . . . .	3,57	2,4	0,89
Вентиляторы вытяжные . . . . .	9,0	0,225	0,21
Вентиляционные каналы . . . . .	1,3	0,5125	0,21
Вибраторы . . . . .	0,80	0,5	0,4
Воздуходувки . . . . .	4,38	2,237	0,090
Воздуходувки нулевого типа . . . . .	5,879	3,0	0,121
Волноводы гибкие . . . . .	4,54	2,845	1,135
Волноводы жесткие . . . . .	1,92	1,1	0,59
Выводы высокочастотные . . . . .	4,225	2,6375	1,131
Выключатели автоматические . . . . .	0,40	0,1375	0,045
Выключатели тепловые . . . . .	0,50	0,3	0,25
Выпрямители селеновые . . . . .	1,60	1,1625	0,32
Генераторы звуковой частоты . . . . .	0,56	0,35	0,14
Генераторы переменного тока . . . . .	2,94	0,7	0,033
Генераторы постоянного тока . . . . .	6,27	0,9	0,30
Генераторы эталонные . . . . .	2,5	0,9375	0,045
Гиромеханизмы . . . . .	7,23	4,90	0,85
Гнезда коммутационные . . . . .	0,02	0,01	0,002
Головки (магнитные) записываю- щие и стирающие . . . . .	0,26	0,18	0,13
Датчики:			
бета-лучей . . . . .	21,30	14,00	6,70
высоты . . . . .	7,50	3,397	1,67
давления . . . . .	6,6	3,5	1,7
оптические . . . . .	6,66	4,7	2,70
температуры . . . . .	6,4	3,3	1,5
уровня жидкости . . . . .	3,73	2,6	1,47
Двигатели вентиляторов . . . . .	5,5	0,2	0,05
Двигатели гидравлические . . . . .	7,15	4,3	1,45
Двигатели шаговые . . . . .	0,71	0,37	0,22
Держатели плавких предохра- нителей . . . . .	0,10	0,02	0,008

<sup>1</sup> По материалам VII национального симпозиума по надежности и контролю качества, состоявшегося в США в 1961 г. [97].

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Держатели радиоприцелов . . . . .	6,53	2,437	0,01
Диафрагмы . . . . .	9,0	6,00	0,10
<b>Диоды:</b>			
германиевые . . . . .	0,38	0,3	0,23
кремниевые . . . . .	0,25	0,2	0,15
кремниевое-карбидные . . . . .	0,55	0,02	0,009
селеновые . . . . .	0,6	0,2	0,11
Дифференциалы . . . . .	0,168	0,004	0,012
Дроссели насыщения . . . . .	0,32	0,14	0,12
Дроссели низкой частоты . . . . .	0,280	0,175	0,070
Заделка соединительных межблоч- ных проводов . . . . .	0,27	0,05	0,041
Зажигатели игнитронов . . . . .	0,81	0,02	0,01
Зажимы . . . . .	0,0009	0,0005	0,0003
Зуммеры . . . . .	1,30	0,60	0,05
Изоляторы . . . . .	0,08	0,05	0,03
Изоляторы проходные . . . . .	0,08	0,05	0,02
Изоляция . . . . .	0,72	0,50	0,011
Инверторы . . . . .	110,0	40,0	10,70
Каналы охлаждения магнетрона . . . . .	3,0	0,075	0,04
Катушки . . . . .	0,088	0,050	0,036
<b>Катушки:</b>			
аиодных дросселей . . . . .	0,031	0,02	0,009
дросселей . . . . .	0,100	0,02	0,01
дросселей фильтров высокой частоты . . . . .	0,25	0,03	0,012
индуктивности . . . . .	0,05	0,01	0,005
индуктивности высокого наптя- жения . . . . .	0,031	0,02	0,011
индуктивности эталонные . . . . .	0,73	0,4	0,07
настроечные . . . . .	0,091	0,04	0,02
обмоток двигателей . . . . .	0,2856	0,15	0,0142
усилителей . . . . .	0,045	0,03	0,01
Клапаны . . . . .	0,20	0,1	0,03
Клапаны . . . . .	8,0	5,1	2,00
<b>Клапаны:</b>			
впускные . . . . .	5,33	3,4	1,33
запорно-выпускные . . . . .	10,2	6,5	1,98
контрольные . . . . .	8,10	5,0	2,02
ножевые . . . . .	7,4	4,6	1,08
обратные . . . . .	14,1	5,7	3,27
переключающие . . . . .	1,62	0,5	0,26
перепускные . . . . .	8,13	5,88	1,41
последовательного действия . . . . .	8,1	4,6	2,10
предохранительные . . . . .	8,94	5,7	2,24
разгрузочные . . . . .	19,0	10,8	1,98
регулируемые . . . . .	19,8	8,5	1,00
резервуарные . . . . .	10,8	6,88	2,70

Наименование элементов	Интенсивность отказов 10 <sup>-6</sup> час <sup>-1</sup>		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Клапаны:			
селекторные . . . . .	19,7	16,0 <sup>а</sup>	3,70
спускные и обратные . . . . .	15,31	5,7	3,41
трехходовые . . . . .	7,41	4,6	1,87
челночные . . . . .	9,76	6,9	2,89
четырёхходовые . . . . .	7,22	4,6	1,81
шаровые . . . . .	7,7	4,6	1,11
Клистроны надежные . . . . .	6,00	3,0	—
Кожухи:			
адаптеров радиоприцелов . . . . .	0,347	0,1837	0,02
защитные . . . . .	0,061	0,038	0,015
пылезащитные . . . . .	0,01	0,006	0,002
рукояток . . . . .	1,8	0,9	0,10
Коллекторы . . . . .	4,85	2,9	0,97
Конденсаторы:			
бумажные . . . . .	0,034	0,025	0,016
бумажные до 600 в . . . . .	0,04	0,0125	0,01
высокой надежности нейлоновые на 300—600 в . . . . .	0,014	0,01	0,006
высокой надежности фарфоро- вые . . . . .	1,02	0,09	0,04
керамические . . . . .	0,213	0,1	0,063
керамические до 600 в . . . . .	0,133	0,0625	0,040
масляные . . . . .	0,48	0,30	0,12
переменной емкости . . . . .	0,28	0,1625	0,09
переменной емкости керамиче- ские . . . . .	0,35	0,155	0,08
постоянной емкости до 600 в . . . . .	0,018	0,01	0,001
постоянной емкости свыше 600 в . . . . .	0,486	0,2	0,027
постоянной емкости свыше 1000 в . . . . .	2,385	1,325	0,1325
слюдяные . . . . .	0,132	0,075	0,018
слюдяные до 600 в . . . . .	0,066	0,0375	0,009
слюдяные высококачественные фольговые . . . . .	0,076	0,045	0,014
слюдяные посеребренные . . . . .	0,141	0,083	0,025
слюдяные пуговичные . . . . .	0,057	0,03	0,003
танталовые . . . . .	0,83	0,600	0,27
танталовые полярные из трав- ленной фольги . . . . .	2,20	0,100	0,07
танталовые фольговые неполяр- ные . . . . .	2,00	0,100	0,08
танталовые фольговые полярные . . . . .	2,10	0,100	0,075
электролитические . . . . .	0,054	0,035	0,003
Контактные щетки . . . . .	1,11	0,1	0,04
Кристаллодержатели . . . . .	0,10	0,02	0,01
Кристаллы . . . . .	0,14	0,10	0,04
Кристаллы:			
высокой частоты . . . . .	0,6	0,3	0,025
генераторов колебаний . . . . .	1,1	0,60	0,10



Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Кристаллы:			
детекторов . . . . .	0,371	0,2	0,03
кремниевые (диоды) . . . . .	0,28	0,20	0,08
магниево-медисульфидные . . . . .	0,07	0,05	0,02
селеновые . . . . .	0,42	0,3	0,12
Кулачки . . . . .	0,004	0,002	0,001
Лампы:			
накаливания . . . . .	32,0	8,0	5,20
неоновые . . . . .	18,8	10,25	4,50
приемные . . . . .	2,0	1,2	—
приемные газоразрядные . . . . .	6,5	3,9	—
приемные миниатюрные . . . . .	5,7	3,08	—
приемные по техническим требованиям для армии и флота США . . . . .	2,6	1,7	—
приемно-передающие . . . . .	7,93	5,0	2,10
Лампы электронные надежные:			
диод . . . . .	1,49	0,8	—
диод двойной . . . . .	1,87	1,0	—
диод двойной (1/2) . . . . .	1,37	0,6	—
для усиления мощности . . . . .	32,0	20,0	—
пентод . . . . .	2,8	1,6	—
тетрод . . . . .	2,9	1,6	—
Лампы электронные промышленные:			
диод . . . . .	2,20	0,80	0,24
диод двойной . . . . .	1,89	1,0	0,38
диод двойной (1/2) . . . . .	1,04	0,60	0,32
для усиления мощности . . . . .	40,0	20,0	12,0
мощные . . . . .	13,5	10,0	3,8
мощные по техническим требованиям для армии и флота США . . . . .	9,45	7,0	2,17
тетрод . . . . .	2,9	1,6	0,88
триод . . . . .	2,26	1,3	0,67
триод двойной . . . . .	3,88	2,0	1,17
триод двойной (1/2) . . . . .	1,74	1,0	0,52
Лампы электронные разных типов:			
0А3 . . . . .	1,43	0,66	0,39
2039А . . . . .	35,46	12,0	6,71
2С51 . . . . .	9,00	6,0	4,89
4Х150 . . . . .	9,71	5,8	1,76
5R4 . . . . .	211,0	170,0	121,0
6АН6 . . . . .	2,78	2,6	1,15
6АК5 . . . . .	5,31	3,5	1,71
6АК5W . . . . .	5,11	3,35	1,68
6АЛ5 . . . . .	13,8	9,9	5,77
6АQ5 . . . . .	8,73	4,0	1,07
6АR6 . . . . .	33,3	26,0	12,9

Наименование элементов	Интенсивность отказов 10 <sup>-6</sup> час <sup>-1</sup>		
	наибольшая	средняя	наименьшая
6A57G . . . . .	4,41	2,0	1,4
6BA6 . . . . .	11,7	8,6	4,81
614WA . . . . .	3,4	2,0	1,30
6L6/1622 . . . . .	3,29	2,8	1,37
6B6 . . . . .	5,11	3,3	1,66
6X4 . . . . .	7,90	5,0	2,05
6X5 . . . . .	14,62	11,5	7,91
12AT7 . . . . .	13,36	8,9	6,43
12AT7WA . . . . .	8,56	5,4	4,18
12AU7 . . . . .	17,4	13,0	7,3
5651 . . . . .	3,48	2,2	1,32
5654 . . . . .	3,47	2,86	1,41
5670 . . . . .	2,67	2,0	0,84
5685 . . . . .	11,4	7,7	3,17
5725/6A56 . . . . .	2,89	2,6	1,14
5276 . . . . .	14,1	9,9	5,8
5767/2021 . . . . .	8,81	4,02	1,09
5749 . . . . .	6,07	3,5	1,98
5751 . . . . .	2,58	2,0	1,55
5575 . . . . .	3,46	2,2	1,31
5814 . . . . .	2,89	1,2	0,95
5814A . . . . .	2,13	1,03	0,52
5881/5936 . . . . .	3,17	2,8	1,34
5933 . . . . .	3,09	2,7	1,28
5998 . . . . .	2,71	1,0	0,87
6005 . . . . .	12,3	8,0	3,5
6080WA . . . . .	31,6	23,4	11,7
6082 . . . . .	34,1	28,8	13,2
6095 . . . . .	4,40	2,0	0,47
6096 . . . . .	5,85	3,35	1,10
6098 . . . . .	16,7	11,29	7,39
6201 . . . . .	8,88	5,9	4,29
6306 . . . . .	6,13	3,6	2,01
6621 . . . . .	30,7	22,0	11,3
6829 . . . . .	2,96	1,5	1,11
<b>Лампы электронные сверхмини- турные:</b>			
диод . . . . .	2,2	1,1	—
диод двойной . . . . .	2,21	1,3	—
диод двойной (1/2) . . . . .	1,7	0,85	—
тетрод . . . . .	3,62	2,15	0,69
триод . . . . .	2,91	1,75	—
триод двойной . . . . .	4,31	2,6	0,78
триод двойной (1/2) . . . . .	2,29	1,34	0,41
Ливзы из поляроида . . . . .	27,7	6,925	1,21
Линии задержки переменные . . . . .	4,62	3,00	0,22
Линии задержки постоянные . . . . .	0,25	0,1	0,08
Магнетроны надежные . . . . .	350,0	150,0	7,0
Магнетроны перестраиваемые на- дежные . . . . .	5500,0	3000,0	45,0

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Магниты . . . . .	7,11	5,65	2,02
Манометры . . . . .	7,8	4,0	0,135
Мультиплексеры . . . . .	6,01	1,2	0,82
<b>Муфты:</b>			
магнитные . . . . .	0,93	0,6	0,45
соединительные вращения . . . . .	0,049	0,025	0,001
соединительные управления . . . . .	3,21	1,6375	0,065
фрикционные . . . . .	0,94	0,3	0,07
Нагреватели камер сгорания . . . . .	6,21	4,0	1,112
Насосы . . . . .	24,3	13,5	2,7
<b>Насосы:</b>			
вакуумные . . . . .	16,1	9,0	1,9
с гидравлическим приводом . . . . .	45,0	14,0	6,4
с механическим приводом . . . . .	31,3	13,5	3,33
с пневматическим приводом . . . . .	47,0	14,7	6,9
с электрическим приводом . . . . .	27,4	13,5	2,9
Обтекатели антенные . . . . .	5,22	3,0	0,78
Основания литые . . . . .	0,70	0,175	0,015
Охладители . . . . .	7,0	4,20	1,40
Передачи винтовые . . . . .	0,098	0,05	0,002
Передачи зубчатые . . . . .	0,20	0,12	0,0118
Переключатели волноводные . . . . .	0,71	0,48	0,26
Переключатели микроволновые ламповые . . . . .	9,0	5,0	—
Поглотители радиоволн . . . . .	1,20	0,687	0,028
Подавители шумов . . . . .	0,16	0,09	0,02
Подавители электрических помех . . . . .	0,95	0,3	0,10
Подвесы Кардана . . . . .	12,0	2,5	1,12
<b>Подшипники:</b>			
игольчатые . . . . .	1,0	0,5	0,02
роликовые качения . . . . .	1,0	0,5	0,02
скольжения . . . . .	0,42	0,21	0,008
шариковые высокоскоростные тяжелой серии . . . . .	3,53	1,8	0,072
шариковые низкоскоростные легкой серии . . . . .	1,72	0,875	0,035
Поршни гидравлические . . . . .	0,35	0,2	0,08
Потенциометры . . . . .	12,5	3,0	0,70
<b>Потенциометры:</b>			
композиционные . . . . .	0,30	0,10	0,04
проиолочные . . . . .	2,05	1,4	0,65
проволочные миниатюрные . . . . .	2,00	1,2	0,72
проволочные миниатюрные $R =$ $= 10 \text{ ком}$ . . . . .	1,92	1,19	0,53
проволочные миниатюрные $R =$ $= 10 \div 20 \text{ ком}$ . . . . .	2,02	1,21	0,81

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
<b>Потенциометры:</b>			
проволочные миниатюрные	2,04	1,23	0,88
<i>R</i> = 20 ком . . . . .			
с приводом от двигателя . . . . .	12,60	5,485	1,71
счетно-решающие . . . . .	14,70	5,0	1,18
угольные пленочные . . . . .	0,75	0,25	0,10
функциональные . . . . .	15,7	7,0	4,4
<b>Предохранители плавкие . . . . .</b>	0,82	0,5	0,30
<b>Преобразователи напряжения . . . . .</b>	52,2	35,0	23,2
<b>Преобразователи термистерные . . . . .</b>	28,00	15,0	10,0
<b>Прерыватели . . . . .</b>	0,80	0,5	0,31
<b>Провода соединительные межблочные . . . . .</b>	0,12	0,015	0,008
<b>Приводы:</b>			
антенн . . . . .	10,04	5,7	1,36
постоянной скорости пневматические . . . . .	6,2	2,8	0,3
ременные . . . . .	15,0	3,875	0,142
следающие . . . . .	33,6	12,5	0,86
узкого назначения . . . . .	9,6	3,6	0,17
широкого назначения . . . . .	18,5	6,9	0,60
<b>Прокладки . . . . .</b>	0,015	0,0012	0,0005
<b>Прокладки:</b>			
кольцевые . . . . .	0,03	0,02	0,01
пробковые . . . . .	0,077	0,04	0,003
пропиточные . . . . .	0,225	0,1375	0,05
резиновые . . . . .	0,03	0,02	0,011
сеточные . . . . .	0,908	0,05	0,0022
феноловые . . . . .	0,07	0,05	0,01
<b>Противовесы большие . . . . .</b>	0,545	0,3375	0,13
<b>Противовесы малые . . . . .</b>	0,03	0,0125	0,05
<b>Пружины . . . . .</b>	0,221	0,1125	0,004
<b>Пружины калиброванные . . . . .</b>	0,42	0,22	0,009
<b>Пружины простые возвратные . . . . .</b>	0,022	0,012	0,001
<b>Пускатели . . . . .</b>	16,1	10,0	3,03
<b>Разъемы штепсельные для блоков . . . . .</b>	0,70	0,175	0,10
<b>Регуляторы:</b>			
давления и расхода жидкости . . . . .	5,54	2,14	0,70
расхода гелия . . . . .	5,26	2,03	0,65
расхода жидкого кислорода . . . . .	7,78	3,00	0,96
расхода сжатого воздуха . . . . .	6,21	2,40	0,77
<b>Резервуары:</b>			
для гелия . . . . .	0,126	0,07	0,039
малые высокого давления . . . . .	0,144	0,08	0,044
малые нормального давления . . . . .	0,324	0,18	0,10
<b>Реле времени:</b>			
пневматические . . . . .	6,80	3,5	1,15
электрохимические . . . . .	2,57	1,5	0,79

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Реле времени электронные . . . . .	1,80	1,2	0,24
Реостаты . . . . .	0,19	0,13	0,07
Ретрансляторы . . . . .	45,0	30,0	20,0
Рукоятки . . . . .	0,10	0,075	0,02
Светофильтры . . . . .	0,80	0,20	0,12
Сельсины . . . . .	0,61	0,35	0,09
Сельсины решающих устройств . . . . .	1,94	1,1125	0,29
Секторы зубчатые . . . . .	1,8	0,9125	0,051
Сервомоторы . . . . .	0,35	0,23	0,11
Соединения:			
гибкие . . . . .	1,348	0,6875	0,027
жесткие . . . . .	0,049	0,025	0,001
паяные . . . . .	0,05	0,004	0,0002
Соленоиды . . . . .	0,55	0,05	0,036
Сопла переменного сечения . . . . .	3,71	0,55	0,045
Сопла постоянного сечения . . . . .	2,11	0,15	0,01
Сопротивления:			
композиционные . . . . .	0,15	0,043	0,017
пленочные . . . . .	0,058	0,03	0,017
постоянные . . . . .	0,07	0,03	0,01
постоянные многоваттные . . . . .	0,065	0,028	0,009
прецизионные секционирован- ные . . . . .	0,292	0,125	0,041
проволочные . . . . .	1,165	0,087	0,046
проволочные мощные . . . . .	0,076	0,04	0,021
проволочные прецизионные . . . . .	0,114	0,16	0,032
проволочные точные . . . . .	0,191	0,091	0,052
тиристовые . . . . .	0,153	0,10	0,047
угольные пленочные . . . . .	0,57	0,25	0,11
Стабилизаторы напряжения магнит- ных усилителей . . . . .	0,69	0,5	0,37
Стабилизаторы напряжения уголь- ные . . . . .	13,16	9,65	6,09
Стабилитроны . . . . .	0,3	0,15	0,08
Стабиловольты . . . . .	7,1	0,35	0,13
Стабиловольты надежные . . . . .	0,68	0,35	—
Схемы:			
блоков высокой частоты . . . . .	2,43	1,4	0,37
блоков промежуточной частоты . . . . .	1,06	0,4	0,26
задержки импульсов . . . . .	0,96	0,6	0,24
формирования импульсов высо- кого напряжения . . . . .	4,92	3,075	1,23
Счетчики электрические . . . . .	5,77	1,375	1,35
Тахометры . . . . .	0,55	0,3	0,25
Тензометры . . . . .	15,0	11,6	1,01
Теплообменники . . . . .	18,6	15,0	2,21
Термисторы . . . . .	1,40	0,6	0,20

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Термостаты . . . . .	0,14	0,06	0,02
Тиратроны большой мощности . . . . .	41,0	15,0	13,0
Тиратроны малой мощности . . . . .	15,0	6,0	3,5
Тиратроны надежные большой мощности . . . . .	14,3	5,0	—
Тиратроны надежные малой мощности . . . . .	3,7	2,0	—
Тиратроны сверхминиатюрные большой мощности . . . . .	11,05	6,5	1,95
Тиратроны сверхминиатюрные малой мощности . . . . .	4,41	2,6	0,79
Транзисторы . . . . .	1,02	0,61	0,38
Транзисторы в усилителях . . . . .	0,84	0,5	0,31
Транзисторы германиевые . . . . .	1,91	0,9	0,60
Транзисторы германиевые разных типов:			
2N1302 . . . . .	0,879	0,414	0,276
2N1303 . . . . .	0,709	0,334	0,223
2N1304 . . . . .	0,879	0,414	0,276
2N1305 . . . . .	0,700	0,334	0,223
2N1306 . . . . .	0,879	0,414	0,276
2N1307 . . . . .	0,709	0,334	0,223
2N1308 . . . . .	0,879	0,414	0,276
2N1309 . . . . .	0,709	0,334	0,223
Транзисторы кремниевые . . . . .	0,86	0,5	0,27
Транзисторы кремниевые разных типов:			
2N117 . . . . .	1,44	0,84	0,45
2N118 . . . . .	1,44	0,84	0,45
2N119 . . . . .	1,44	0,84	0,45
2N120 . . . . .	1,44	0,84	0,45
2N332 . . . . .	1,03	0,6	0,32
2N334 . . . . .	1,11	0,6	0,025
2N335 . . . . .	1,11	0,6	0,025
2N336 . . . . .	1,11	0,6	0,025
2N337 . . . . .	0,67	0,5	0,16
2N338 . . . . .	0,67	0,5	0,16
2N339 . . . . .	0,67	0,5	0,14
2N340 . . . . .	0,67	0,5	0,14
2N341 . . . . .	0,67	0,5	0,14
2N342 . . . . .	0,67	0,5	0,14
2N343 . . . . .	0,67	0,5	0,14
2N696 . . . . .	0,84	0,7	0,084
2N697 . . . . .	0,84	0,7	0,084
2N497 . . . . .	0,84	0,74	0,21
2N498 . . . . .	0,84	0,74	0,21
2N656 . . . . .	0,84	0,74	0,21
2N657 . . . . .	0,84	0,74	0,21

Наименование элементов	Интенсивность отказов $10^{-6} \text{ час}^{-1}$		
	наибольшая	средняя	наименьшая
Тензисторы, работающие в ключевом режиме . . . . .	0,71	0,4	0,10
Трансформаторы . . . . .	0,62	0,2	0,07
Трансформаторы:			
выходные . . . . .	2,08	1,04	0,46
звуковой частоты . . . . .	0,04	0,02	0,01
импульсные высокого напряжения . . . . .	0,235	0,15	0,065
импульсные низкого напряжения . . . . .	0,235	0,15	0,065
прецизионные . . . . .	0,814	0,2625	0,092
промежуточной частоты . . . . .	0,31	0,1	0,035
разделительные . . . . .	0,093	0,03	0,011
регулируемые . . . . .	0,31	0,1	0,035
силовые . . . . .	2,08	1,04	0,46
силовые высокого напряжения . . . . .	1,88	0,94	0,47
силовые низкого напряжения . . . . .	0,60	0,3	0,13
Турбины . . . . .	16,67	10,0	3,33
Умформеры . . . . .	5,46	2,8	1,15
Уплотнения вращающиеся . . . . .	1,12	0,7	0,25
Уплотнения скользящие . . . . .	0,92	0,3	0,11
Устройства решающие . . . . .	0,07	0,04	0,02
Фильтры механические . . . . .	0,8	0,3	0,045
Фильтры электрические . . . . .	3,00	0,345	0,140
Цилиндры:			
гидравлические . . . . .	0,12	0,008	0,005
двигателей . . . . .	0,81	0,007	0,005
пневматические . . . . .	0,013	0,004	0,002
Шарики термометров . . . . .	3,30	1,0	0,05
Шариры . . . . .	4,0	2,4	0,8
Шестерни цилиндрические прямозубные . . . . .	4,3	2,175	0,087
Шланги . . . . .	3,22	2,0	0,05
Шланги высокого давления . . . . .	5,22	3,9375	0,157
Шкалы электронно-лучевых трубок . . . . .	0,780	0,4875	0,195
Щитки присоединительные . . . . .	1,02	0,0626	0,01
Щиты подшипниковые . . . . .	0,14	0,0875	0,035
Щиты подшипниковые вращающиеся . . . . .	1,211	0,7875	0,031
Экраны высокочастотные . . . . .	0,15	0,09	0,03
Электродвигатели . . . . .	0,58	0,3	0,11
Элементы нагревательные . . . . .	0,04	0,02	0,01
Ящики соединительные . . . . .	0,58	0,40	0,28

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Келдыш. Советская наука и строительство коммунизма. «Правда», № 164 (15654) от 13 июня 1961 г.
2. В. И. С и ф о р о в. О методах расчета надежности работы систем, содержащих большое число элементов. Изв. АН СССР. Отделение технических наук, № 6, 3, 1955.
3. А. И. Берг. О некоторых проблемах кибернетики. Вопросы философии, № 5, 51, 1960.
4. Теория надежности в области радиоэлектроники. Терминология, АН СССР. Сб. рекомендуемых терминов, вып. 60, 1962.
5. F. Moskowitz. The statistical analysis of redundant systems. «IRE Interhat. Convention Rec.», 8, № 60, 78, 1960.
6. А. М. Гаврилов. Структурная избыточность и надежность работы релейных устройств. Первый Международный конгресс Международной федерации по автоматическому управлению, 3, 323, 1961.
7. С. И. Леви. Статистический контроль надежности источников света. «Светотехника», № 4, 1, 1961.
8. Л. П. Леонтьев. Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во АН Латв. ССР, 1963.
9. И. М. Маликов, А. М. Половко, Н. А. Романов, П. А. Чукареев. Основы теории и расчета надежности, изд. 2-е. Судпромгиз, 1960.
10. Э. Ф. Мур, К. Э. Шеннон. Надежные схемы из ненадежных реле. «Кибернетический сборник» № 1, 109, 1960.
11. К. М. Райерсон. Теория испытаний аппаратуры на надежность, основанная на распределении Пуассона. «Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры». Изд-во «Советское радио», 1959.
12. Б. Р. Леви. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике, изд. 2-е. Изд-во «Советское радио», 1960.
13. W. Weibull. A statistical distribution function of wide applicability. «Jorn. of Appl. Mech.» 18, 293, 1951.
14. И. В. Дунин-Барковский, Н. В. Смирнов. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. ГИТТЛ, 1955.
15. Г. Б. Линковский. Доверительные интервалы для среднего времени работы системы элементов с экспоненциальным законом надежности. «Электросвязь», № 9, 69, 1961.
16. T. L. Burnett, B. A. Wales. System reliability confidence limits. Proc. of the seventh nat. symp. on RQC, N. Y., 118, 1961.
17. А. Н. Шуклин. Теория вероятностей и экспериментальное определение характеристик сложных объектов. Госэнергоиздат, 1959.
18. A. F. Rymsha. Robot circuit tester. «Radio Electronics», 27, № 7, 55, 1956.
19. C. M. Ryerson. Reliability of electronic equipment. «Aero Digest», 71, № 5, 15, 1955.
20. C. I. Soucy. Reliability control of electronic equipment in aircraft and weapon systems: by general and management aspects. «Canadian Aeronautical Journ.» 3, 222, 1957.
21. K. E. Ports, H. R. Smith. Method for the determination of reliability. «IRE Trans.» PGRQC — 11, 65, 1957.



22. H. L. Wuerffel, D. J. Troxel. A new role for reliability stress analysis systematizing the attack on maintainability problems. «Proceedings Sekond national convention on military electronics», 6, 1958.
23. К. Хинней, К. Уолш. Радиодетали и проблема надежности. Изд-во «Советское радио», 1960.
24. Reliability increased with glass capacitors. «Missiles and Rockets», № 7, 21, 1961.
25. Н. А. Тищенко. Проблемы надежности электродвигателей. «Электричество», № 11, 7, 1961.
26. I. A. Connor. Calculations of the risk of component applications in electronic system. «IRE Trans.», PGRQC — 9, 30, 1957.
27. Я. А. Рипс. Выбор коэффициентов запаса и расчет электромагнитных механизмов заданной надежности. «Электричество» № 4, 76, 1961.
28. Строру. Статическое электричество может выводить из строя транзисторы. «Электроника», № 2, 39, 1962.
29. Р. Тарян. Проблемы кибернетики. «Природа», № 6, 62, 1959.
30. Дж. фон Нейман. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. «Автоматы». Сб. статей под ред. К. Э. Шеннона и Дж. Маккарти. ИЛ, 1956.
31. H. T. Hallowell. Industry in new age must stress quality. «Machine Design», 12, 30, 1957.
32. Б. Р. Левин. О некоторых вопросах теории надежности радиоэлектронного оборудования. «Радиотехника», № 2, 67, 1960.
33. Е. Е. Слуцкий. Таблицы для вычисления неполной Г-функции и функции вероятности  $\chi^2$ . Изд-во АН СССР, 1950.
34. Н. Г. Бруевич. Вопросы надежности и точности электронных устройств в машиностроении и приборостроении. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 1, 89, 1951.
35. Aircraft electronics are doubling up. «Engineering», 190, 426, 1960.
36. В. А. Котельников. Радиосвязь Земля — «Восток-2». «Правда», № 225 (15 715) от 12 августа 1961 г.
37. О. Нейл, Абдуг. Применение методов самонастраивающихся систем к космическим кораблям. «Вопросы ракетной техники», № 7, 35, 1961.
38. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Физматгиз, 1962.
39. М. А. Синица. Резервирование радиоэлектронной аппаратуры, «Радиоэлектронная промышленность» № 5, 10, 1958.
40. А. М. Половко, И. Е. Новиков. О резервировании с дробной кратностью. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 3, 113, 1961.
41. Э. И. Клямко. О повышении надежности вычислительных машин методом дублирования оборудования с восстановленным резервом. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 3, 73, 1960.
42. Э. И. Клямко. Надежность систем с восстанавливаемым резервом. Известия АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 3, 117, 1961.
43. W. R. Allen, L. Tick, M. M. Woodburg. Some mathematical and statistical techniques useful in reliability analysis. «Proc. of the fourth nat. symp. on RQC», N. Y., 63, 1958.
44. Х. Л. Смолицкий, П. А. Чукуреев. К вопросу об оптимальном резервировании аппаратуры. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 4, 79, 1959.
45. F. Moskowitz, I. B. McLean. Some reliability aspect of systems design. «IRE Trans.», PGRQC — 8, 27, 1956.
46. Суэзи. Постоянное резервирование в радиоэлектронных системах. «Зарубежная радиоэлектроника», № 5, 130, 1962.
47. Уидроу, Пирс, Анджелл. Рождение, жизнь и смерть микроэлектронных систем. Зарубежная радиоэлектроника, № 6, 125, 1962.

48. W. G. Brawn, S. Tierney, R. Wasserman. Improvement of electronic — computer reliability through the use of redundancy. «IRE Trans. Electron. Comput.», 10, № 3, 407, 1961.
49. А. А. Бессонов. Расчет надежности систем автоматического управления. Ленинградский механический институт. Сб. трудов, № 22. «Автоматическое управление», вып. 2, 42, 1961.
50. Н. Д. Саперштейн. К вопросу о применении интеграла Фурье при исследовании переходных процессов. Ленинградский механический институт. Сб. трудов, № 12, «Автоматическое управление», 9, 1960.
51. Д. В. Васильев, В. Г. Чуич. Расчет систем автоматического управления. Машгиз, 1959.
52. Теория следящих систем, под ред. Х. Джеймса, Н. Никольса, Р. Филлипса, изд. 2-е. ИЛ, 1953.
53. В. А. Бесекерский, В. П. Орлов, Л. В. Полонская, С. М. Федоров. Проектирование следящих систем малой мощности. Судпромгиз, 1958.
54. К. А. Ивуду. Спектральный метод расчета надежности. Ленинградский Политехнический институт. «Научно-технический информационный бюллетень», № 12, 43, 1960.
55. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических систем. Изд. АН СССР, 1951.
56. Г. Боде. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. ИЛ, 1948.
57. В. В. Корнев. О расчете передаточных функций пассивных и активных четырехполюсников. «Научно-техническая информация по приборостроению», № 3, 28, 1958.
58. Р. А. Сапожников, Н. Д. Саперштейн. Расчет переходных процессов, возникающих в линейных системах при внезапных воздействиях. Ленинградский механический институт. Сб. трудов, № 22, «Автоматическое управление», вып. 2, 6, 1961.
59. В. П. Сигорский. Анализ электронных схем. ДТВУ, 1960.
60. Н. Г. Бруевич. О надежности и точности автоматического производства. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 4, 59, 1959.
61. Г. Г. Баранов. О выборе допусков, обеспечивающих заданную точность механизмов и наименьшую стоимость их изготовления. Тр. ин-та машиноведения АН СССР. «Точность в машиностроении и приборостроении», вып. 11, 33, 1957.
62. Б. И. Рамеев. Об одном методе расчета надежности электронных схем дискретного действия. Конференция «Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения», секция универсальных и цифровых машин, ч. I, 103, 1956.
63. А. А. Бессонов. Оценки надежности радиоэлектронных устройств. Третья Всесоюзная конференция МВО СССР по радиоэлектронике. Изд. Киевского Государственного университета им. Т. Г. Шевченко, 1959.
64. А. М. Половко. О расчете надежности сложных автоматических систем. Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. «Энергетика и автоматика», № 5, 124, 1960.
65. Г. Н. Степанов. О построении усилительного оборудования необслуживаемых усилительных пунктов. «Вестник связи», № 2, 15, 1956.
66. Р. Сегаль. История разработки большой системы обработки данных TRANSAC S-2000, полностью выполненной на транзисторах. Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Сб. докладов, 249. Оборонгиз, 1960.
67. Н. Тэйлор. Проектирование надежной аппаратуры. «Вопросы радиолокационной техники», № 1, 43, 16, 1958.

68. Р. Шульц, В. Ваяц. Стандартные функциональные признаки электронной аппаратуры. «Вопросы радиолокационной техники», № 3 (33), 107, 1956.
69. А. В. Астафьев. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. Госэнергоиздат, 1959.
70. Надежность электронной аппаратуры для вооруженных сил. «Вопросы радиолокационной техники», № 3 (33), 74, 1956.
71. К. Гопкинсон. Надежные лампы и их работа в военной аппаратуре. Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Сб. докладов, 284. Оборонгиз, 1960.
72. Л. Л. Шнейдер, П. Готфрид. Разграничивающие испытания как средство улучшения надежности деталей. Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Сб. докладов, 308. Оборонгиз, 1960.
73. R. W. Hudman, R. A. Beach. The transient response of the human operator. «IRE Trans.», PGME-12, 67, 1958.
74. Т. Б. Шеридан. Экспериментальное исследование изменений передаточной функции человека-оператора во времени, I Международный конгресс Международной федерации по автоматическому управлению, 2, 854, 1961.
75. D. T. MacRuer, E. S. Krendel. The human operator as a servo system element. «Journ. Franklin Inst.», 267, 381, 1959.
76. Д. А. Ошанни, Д. Ю. Панов. Человек в автоматических системах управления. «Вопросы философии», № 5, 47, 1961.
77. Б. Ф. Ломов. Человек и техника. Изд. Ленинградского университета, 1963.
78. Н. Г. Левандовский. Изучение некоторых требований к человеку при управлении машинами по приборам. «Вестник Ленинградского университета», № 23, 74, 1959.
79. R. H. Johnson. COED — a device for the experimental study of man-machine system. «Human Factors», 3, № 1, 60, 1961.
80. R. A. Kaufman, M. I. Kaufman. Predicting human factors errors. «Engng and Industr. Psychol.», 2, 47, 1960.
81. H. L. Williams. Reliability evaluation of the human component in man-machine. «Electr. Manufacturing», 61, 78, 1958.
82. H. P. Van Cott. Human engineering. «Mach Engng», 81, 50, 1959.
83. E. Weber. Datenreduzierung durch Messwertverarbeitung. «Siemens — Zeitschr.», 34, 690, 1960.
84. Интема, Торгерсон. Совместная работа человека и вычислительной машины при принятии решений, требующих здравого смысла. «Зарубежная радиоэлектроника», № 11, 68, 1961.
85. А. И. Берг. Надежность — важнейший фактор прогресса радиоэлектроники. «Радио», № 7, 39, 1960.
86. I. Holahan, B. Kovit. Electronic component lag behind system demands. «Space Aeronautics», 34, № 6, 93, 1960.
87. Даммер. Некоторые вопросы надежности работы бортовой радиоаппаратуры космических объектов. «Зарубежная радиоэлектроника», № 9, 108, 1962.
88. Ферранти. Электрическая емкость и конденсаторы. «Электроника», № 13, 25, 1962.
89. G. W. A. Dummer, N. Criffin. Electronic equipment reliability, London, 1960.
90. Клетский. Применение теории информации к отысканию неисправностей в технических устройствах. «Зарубежная радиоэлектроника», № 9, 124, 1961.
91. В. Б. Бишоп. Индикация неисправности как проблема последовательного анализа. Проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры. Сб. докладов, 11. Оборонгиз, 1960.
92. Брюле, Джонсон, Клетский. Отыскание неисправностей в технических устройствах. «Зарубежная радиоэлектроника», № 7, 123, 1961.

93. У. Р. Эшби. Конструкция мозга. ИЛ, 1962.
94. М. Д. Лебедев. Системы автоматического контроля и отыскания неисправностей в радиоэлектронном оборудовании. «Зарубежная радиоэлектроника», № 5, 108, 1961.
95. А. А. Фельдбаум. Вычислительные устройства в автоматических системах. Физматгиз, 1959.
96. K. Enslin. Two economical circuits for highspeed checking of contact closures. «IRE Trans. Instrum.», 8, № 2, 51, 1959.
97. D. R. Earles. Reliability growth prediction during initial design analysis. Proc. of the seventh nat. symp. on RQC, N. Y., 380, 1961.
98. Ю. Г. Полляк. О погрешностях прогноза надежности, обусловленных статической зависимостью между отказами элементов. «Электросвязь» № 4, 3, 1963.
99. В. А. Луцкий. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во АН УССР, 1963.
100. Е. И. Зиземский. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. Судпромгиз, 1963.
101. Э. А. Асратян, П. В. Симонов. Надежность мозга. Изд-во АН СССР, 1963.
102. П. И. Попов, В. Г. Тереньтьев. Надежность некоторых схем для ввода резервных устройств. Московский инженерно-физический институт. «Автоматика и телемеханика», вып. III, 39, 1962.
103. Н. Е. Сафонов. Схема усилителя переменного напряжения с введением резервных устройств через анодную цепь. Московский инженерно-физический институт. «Автоматика и телемеханика», вып. III, 35, 1962.
104. В. И. Нечипоренко. Функциональные надежные электронные схемы. Гостехиздат УССР, 1963.
105. А. И. Рессин. Показатели надежности нестационарных и стационарных линейных систем автоматического управления. Изв. АН СССР Отд. техн. наук «Техническая кибернетика» № 3, 39, 1963.
106. А. А. Бессонов. О точности некорреляционного метода расчета вероятности безотказной работы автоматических управляющих систем. Ленинградский Механический институт. Сб. трудов № 29. «Автоматическое управление», вып. 3, 19, 1963.
107. А. А. Бессонов, В. А. Сиваков. Автоматический индикатор отказов элементов дискретных систем. Ленинградский Механический институт. Сб. трудов № 33, «Автоматическое управление», вып. 4, 53, 1963.
108. А. А. Бессонов. Автоматические индикаторы отказов. Передовой научно-технический и производственный опыт, № 28—63—679/15, ГОСИНТИ, 1963.
109. А. А. Бессонов, В. А. Сиваков. Тестер для автоматической индикации отказов. Изв. ВУЗ. «Приборостроение» № 2, 5, 1964.
110. И. М. Синдеев. К вопросу о синтезе логических схем для поиска неисправностей и контроля состояния сложных систем. Изв. АН СССР Отд. техн. наук. «Техническая кибернетика» № 2, 22, 1963.
111. Г. А. Шастова. Потери от ненадежности в системе передачи независимой информации местного значения при различных способах обнаружения неисправностей. «Автоматика и телемеханика», т. XXIV, 820, 1963.
112. S. Dushman. Scientific foundations of vacuum technique, John Wiley Sons, Inc., New York, 1949.
113. Environmental Effects. «Missiles and Rockets», № 12, 67, 1962.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация 6  
— комплексная 6  
Анализ последовательный 202  
Безотказность 9  
Блок 18  
Вероятность безотказной работы 14, 16, 46  
— исправного состояния 43  
— отказа 14, 16, 36  
— состояния отказа 42  
Восстанавливаемость 43  
Времени отказа средний квадрат 17  
Время восстановления 35  
— — суммарное 44  
— между отказами среднее 27, 35, 47  
— отказа 9, 15  
— — среднее 16, 33, 34  
Выборка 48  
Дисперсия 17  
Длина схемы 24  
Допуски 153  
Закон надежности экспоненциальный 33  
Запас прочности 172  
Износ 32, 37, 40, 57  
— использования 57  
— неиспользования 17  
Индикатор отказов переключающий (ПИО) 167  
— — — самоустраняющийся 231  
Инженерная психология 185  
Интенсивность отказов 32, 48, 55  
— — системы 34  
— — средняя 49  
Интервал доверительный 48  
Испытания граничные 173, 188  
— разграничивающие 175, 183  
Испытатель надежности автоматический (АИН) 51  
Испытательные установки автоматические (АИУ) 51  
— — климатические (КИУ) 51  
Итерация 119  
Коэффициент вынужденного простоя 44  
— готовности 44  
— кратности резервирования 107  
— нагрузки 70  
— надежности 159  
— эксплуатационный 58  
— эффективности резервирования 115  
Кратность резервирования 83  
Критерий надежности 15  
— эффективности проверки 219  
Матрица независимых элементов 80  
Машины информационные 9, 10  
— энергетические 8  
Мера надежности 6, 9, 15  
Метод средней точки 220  
Механизация 6  
Надежность 9, 15  
— амплитудная 132  
— в ТЗ 164  
— конструктивная 132  
— фазовая 132  
— эксплуатационная 42, 157, 186  
Наработка на отказ 27  
— суммарная 42  
Объект управляемый 7  
Опасность отказов 32  
Оператор 184  
Орган восстанавливающий (ВО) 126  
Отказ 8, 9, 10  
— внезапный 8  
— зависимый 8  
— конструкционный 8  
— независимый 8  
— неустойчивый 57  
— перемежающийся 8  
— полный 8  
— постепенный 8, 57  
— самоустраняющийся 8  
— технологический 8  
— устойчивый 8  
— частичный 8  
— эксплуатационный 8  
Переключатель идеальный 89  
— реальный 89, 122  
Плотность вероятности 15  
Принцип выбора по большинству 79  
Приработка 32, 184  
Проблема разрушаемости 191

- Продолжительность исправной ра- — невозстанавливаемая 43  
 боты 14 — ненадежная 9  
 — — — средняя 16 — органическая управляющая (ОУС) 7  
 — — — суммарная 43 — разового действия 42  
 — — — суммарная 42 — управляющая 7  
 Противоречие совершенства и на- — «человек-машина» 185  
 дежности 7 — автоматического отыскания отка-  
 Работа нормальная 32, 44 завших элементов 226  
 Работоспособность 8 — — подключения резерва 228  
 Разрегулировка 8, 58 Системы автоматической индикации  
 Распределение биномиальное 28 отказов 228  
 — Вейбулла 36 — контроля внешние автономные  
 — гамма 37 — — — с датчиками 225  
 — нормальное (Гаусса) 38 — — внутренне с автономными  
 — Пуассона 28, 35 приборами 226  
 — Релея 36 — — — с общими коммутационно-  
 — экспоненциальное 33, 37, 40 индикаторными блоками 225  
 Резерв нагруженный 103 Служба надежности 189  
 — ненагруженный 103 Совокупность генеральная 48  
 — облегченный 104 — параллельное 12  
 — циклический 108 — последовательное 12  
 Резервирование 79 — резервное 11  
 — автоматическое 45 Состояние исправное 42  
 — блочное 79 — отказа 42  
 — замещением 79, 108 Стандарт 18  
 — общее 84 Старение 78  
 — оптимальное 109 Унификация 62  
 — постоянное 79 Устранение отказа автоматическое 35  
 — профилактическое 57 Устройство дискретного действия 13  
 — путей передачи сигналов 80, 167 — непрерывного действия 13  
 — раздельное 84, 89 Флюктуация параметров 57  
 — схемное 80, 116 Формулы Мура и Шейнона 24  
 Ремонтпригодность 9, 43 Функционал обобщенный 132  
 Ресурс надежности 15 Функция распределения 10  
 Самонастройка 13, 79, 124 — сохранности 36  
 Сбой 8, 58 Частота безотказной работы 47  
 Связь обратная 11 — отказов 9  
 Сигнал входной 10 Частота отказов средняя 33  
 — выходной 10 Число отказов 9, 27  
 Система автоматическая 3 Ширина схемы 24  
 — — управляющая (АУС) 3, 7 Элемент 8  
 — избыточная 11, 80 — неделимый 10  
 — комбинированная 19 — стандартный 159  
 — многократного действия 42 Эффективность резервирования 108

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Проблема надежности . . . . .</b>	<b>5</b>
§ 1.1. Сущность и возникновение проблемы . . . . .	5
§ 1.2. Надежность автоматических управляющих систем — условие технического прогресса . . . . .	6
§ 1.3. Основные понятия учения о надежности . . . . .	8
§ 1.4. Применение теории надежности к АУС . . . . .	10
<b>Глава II. Основы теории надежности . . . . .</b>	<b>14</b>
§ 2.1. Время отказа . . . . .	14
§ 2.2. Вероятностные характеристики работы сложных систем . . . . .	18
§ 2.3. Число отказов . . . . .	27
§ 2.4. Экспоненциальный закон надежности . . . . .	31
§ 2.5. Функция сохранности . . . . .	36
§ 2.6. Влияние износа . . . . .	37
<b>Глава III. Испытание надежности . . . . .</b>	<b>42</b>
§ 3.1. Оценка надежности АУС в эксплуатации и при испытаниях . . . . .	42
§ 3.2. Определение размера выборки при испытании надежности элементов . . . . .	48
§ 3.3. Автоматизация испытаний . . . . .	50
<b>Глава IV. Надежность элементов АУС . . . . .</b>	<b>54</b>
§ 4.1. Факторы, определяющие надежность элементов . . . . .	54
§ 4.2. Надежность сопротивлений . . . . .	61
§ 4.3. Надежность конденсаторов . . . . .	70
§ 4.4. Надежность электрических машин, электромагнитных кон- такторов и реле . . . . .	71
§ 4.5. Надежность трансформаторов и дросселей . . . . .	73
§ 4.6. Надежность подшипников . . . . .	74
§ 4.7. Надежность полупроводниковых триодов . . . . .	75
<b>Глава V. Теория резервирования . . . . .</b>	<b>78</b>
§ 5.1. Системы, более надежные, чем их элементы . . . . .	78
§ 5.2. Зависимость надежности системы от способа соединения ее элементов . . . . .	80
§ 5.3. Эффективность общего и раздельного резервирования . . . . .	84
§ 5.4. Влияние надежности переключающих устройств . . . . .	89
§ 5.5. Связь законов, характеризующих надежность систем и эле- ментов, при разных способах резервирования . . . . .	94
§ 5.6. Постоянное резервирование . . . . .	98
§ 5.7. Резервирование замещением. Нагруженный, облегченный и ненагруженный резервы . . . . .	103

§ 5.8. Оптимальное блочное резервирование . . . . .	109
§ 5.9. Схемное резервирование . . . . .	116
§ 5.10. Резервирование цифровых систем . . . . .	124
<b>Глава VI. Расчет надежности АУС . . . . .</b>	<b>132</b>
§ 6.1. Конструктивная надежность . . . . .	132
§ 6.2. Составление передаточных функций электронных элементов АУС . . . . .	140
§ 6.3. Определение допусков на параметры элементов из условий надежности . . . . .	153
§ 6.4. Эксплуатационная надежность . . . . .	157
<b>Глава VII. Обеспечение надежности при проектировании, производстве и эксплуатации АУС . . . . .</b>	<b>164</b>
§ 7.1. Требования, предъявляемые к надежности в технических заданиях . . . . .	164
§ 7.2. Составление надежных схем . . . . .	166
§ 7.3. Конструктивные меры . . . . .	169
§ 7.4. Технологические меры . . . . .	182
§ 7.5. Зависимость надежности от работы оператора . . . . .	184
§ 7.6. Эксплуатационные меры . . . . .	186
§ 7.7. Организационные мероприятия . . . . .	188
§ 7.8. Обеспечение надежности космических систем . . . . .	191
<b>Глава VIII. Обнаружение отказов . . . . .</b>	<b>202</b>
§ 8.1. Последовательный поиск отказов . . . . .	202
§ 8.2. Последовательный поиск в случае нескольких отказавших элементов . . . . .	209
§ 8.3. Оптимизация поиска отказов . . . . .	213
§ 8.4. Систематизация поиска отказавших элементов . . . . .	218
§ 8.5. Автоматическая индикация отказов . . . . .	224
§ 8.6. Индикатор отказов элементов дискретных систем . . . . .	236
Приложение. Интенсивность отказов некоторых элементов . . . . .	246
Литература . . . . .	256
Предметный указатель . . . . .	261