

МИНСКОЕ ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ЗЕНИТНО-РАКЕТНОЕ
УЧИЛИЩЕ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

Х. Х. ХРИСТОВ, В. С. ПАНЧИКОВ

**СТАБИЛИЗАЦИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ**

1978

4/6/88

МИНСКОЕ ВЫСШЕЕ ИНЖЕНЕРНОЕ ЗЕНИТНО-РАКЕТНОЕ
УЧИЛИЩЕ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

Х. Х. ХРИСТОВ, В. С. ПАНЧИКОВ

СТАБИЛИЗАЦИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ

1 9 7 3

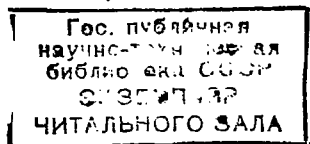
УДК 62-50:621.396.966

Настоящая работа является учебным пособием по специальным курсам, которые читаются в училище.

Работа посвящена рассмотрению некоторых вопросов, связанных со стабилизацией эффективности радиоэлектронных систем (РЭС). Показана классификация радиоэлектронных систем по сложности и связь уровней сложности с системой обслуживания. Произведен подробный анализ дестабилизирующих факторов и их влияние на деградацию системы, предложены некоторые методы стабилизации эффективности.

В учебном пособии рассмотрены также задачи и место контроля при автоматической подстройке и стабилизации параметров. В заключительной части описана методика оценки затрат на стабилизацию параметров и эффективности РЭС.

73 ~~04~~ - 4698



24

955

В В Е Д Е Н И Е

В процессе проектирования и производства радиоэлектронных систем стремятся обеспечить максимально возможную на данный период развития науки и техники их эффективность (потенциальная). При эксплуатации условия функционирования радиоэлектронных систем изменяются в довольно широком диапазоне. За счет влияния различного рода негативных факторов эффективность системы со временем изменяется, система деградирует [1]. Среди этих факторов, оказывающих значительное влияние на изменение эффективности, следует выделить те из них, которые затруднительно предусмотреть заранее при проектировании системы. В этих условиях возникают задачи поддержания эффективности радиоэлектронных систем на возможно более высоком уровне и уменьшения скорости изменения эффективности. Возможность поддержания эффективности в условиях неполной априорной информации о факторах, влияющих на эффективность, основана на применении адаптации. При этом адаптивная система активно использует текущую информацию о внешних воздействиях на систему в процессе ее работы.

В общем случае эффективность радиоэлектронных систем (РЭС) можно рассматривать как функцию структуры и параметров системы, а также среды (природные факторы, старение комплектующих элементов, противодействие противника и т. д.). Из этого следует, что поддержание эффективности на требуемом уровне возможно прежде всего за счет управления структурой и параметрами, а также стабилизации последних.

Следует отметить, что в последние годы интенсивно исследуются вопросы построения адаптивных систем автоматического регулирования. При этом в зависимости от вида и уровня адаптации различают самонастраивающиеся, самоорганизующиеся и самоалгоритмизирующиеся системы.

Адаптивность самонастраивающихся систем обеспечивается путем целенаправленного изменения параметров управляющего устройства. При этом создаются либо оптимальные статистические условия работы объекта, либо регулятора в зависимости от состояния (в текущий момент времени) среды, в которой функционирует система.

Самоорганизующиеся системы являются системами с переменной структурой. Структура может меняться по определенной программе или случайным образом, когда возможные изменения среды заранее неизвестны. При этом возможны и изменения параметров управляющего устройства. Такие системы могут включать в себя элементы самонастройки и самообучения.

Характерным для самоалгоритмизирующихся систем является то, что в них учитывается, накапливается и запоминается информация о предыстории протекающих процессов. На основе накопленного «опыта» происходит обучение системы, что выражается в изменении параметров и структуры, а также в рациональном выборе алгоритма своего поведения.

Однако вопросы адаптивного подхода при построении достаточно широкого класса радиоэлектронных систем исследованы в настоящее время еще недостаточно. Современные радиоэлектронные системы характеризует жесткость их структуры. Вместе с тем по мере усложнения аппаратуры, что вызывается возрастанием сложности решаемых задач, увеличением времени непрерывной работы, переходом к более современным методам построения (миниатюризация, модуляция и т. д.), существующие жесткие структуры становятся все более нерациональными.

Создаются предпосылки для создания систем с гибкой структурой, что позволит системам активно приспосабливаться к изменяющейся среде.

Создание адаптивных радиоэлектронных систем связано с разработкой ряда сложных проблем. Решение этих проблем требует предварительного исследования некоторых вопросов, к которым прежде всего следует отнести классификацию радиоэлектронных систем по сложности, выявления закономерностей в изменении параметров, эффективности и скоростей этих изменений, определения возможных методов стабилизации эффективности. Классификация радиоэлектронных систем по сложности позволит более целенаправленно решать вопросы адаптивности для различных классов этих систем. Выявление закономерностей изменения параметров и эффективности, а также определение скоростей этих изменений делает возможным определить целесообразный уровень адаптации рассматриваемой системы.

Под эффективностью радиоэлектронных систем понимается степень соответствия системы своему назначению. Для оценки степени соответствия определяется критерий эффективности \mathcal{E} , который является функцией структуры системы S , вектора параметров Y , дестабилизирующих факторов W , некоторого начального уровня \mathcal{E}_0 и времени t .

В первой главе производится анализ некоторых из существующих определений сложности и системы, предложена классификация радиоэлектронных систем в зависимости от уровня сложности и показана связь между различными уровнями сложности и системой обслуживания.

Вторая глава работы посвящена анализу дестабилизирующих факторов и их влиянию на деградацию системы. Рассмотрены некоторые из возможных методов стабилизации эффективности радиоэлектронных систем.

В третьей главе рассматриваются частные и обобщенные параметры радиоэлектронных систем, их взаимосвязь, причины изменения и их влияние на эффективность системы.

Четвертая глава посвящена возможностям стабилизации эффективности системы путем стабилизации ее параметров. Показана роль и место системы контроля при автоматической подстройке и стабилизации параметров.

В пятой главе предлагается методика оценки затрат на стабилизацию параметров и эффективность радиоэлектронных систем.

Для более глубокого понимания рассматриваемых вопросов в работе приводятся примеры, которые имеют чисто иллюстративный характер.

Авторы признательны доктору технических наук Широкову А. М. за ценные советы и замечания по написанию книги, а также рецензентам: доктору технических наук Мищенко В. А. и кандидату технических наук Ершову В. Н. за оказанное внимание и замечания при рецензировании рукописи, которые были с благодарностью приняты.

Глава I

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПО СЛОЖНОСТИ

§ 1.1. Определение сложности радиоэлектронных систем

Понятие сложной системы возникло из необходимости практического развития теории систем. Чтобы определить, что такое сложная система и степень ее сложности, прежде всего необходимо определить, что такое система.

Существуют различные определения системы. Следует отметить, что не все они являются полными и четкими. Но во всех определениях системы проводится идея, связанная с некоторым количеством элементов и со связями между ними.

В [9] под системой понимается совокупность элементов с определенными связями между ними.

В [6] под системой понимается специфически выделенное из окружающей среды целостное множество элементов, объединенных между собой совокупностью внутренних связей или отношений.

Согласно [18] система — это совокупность элементов, в которой все элементы настолько тесно связаны между собой, что она выступает к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Во всякой системе связь между ее составными элементами должна быть гораздо более прочной и устойчивой, чем связь каждого из этих элементов с частями других систем.

Все перечисленные определения имеют один существенный недостаток — они являются статическими, т. е. определяют систему только как совокупность элементов и связей. Чтобы определение системы было полным, нуж-

на динамическая интерпретация, которая связана с функционированием системы. Более полным в этом отношении является определение, данное в [1], где под системой понимается единое целое, реальное и представляемое, состоящее из взаимосвязанных, обладающих общим признаком, частей. Система характеризуется тремя основными свойствами: связностью, иерархичностью и динамичностью.

Перечисленные определения можно отнести ко всем видам систем: биологическим, общественным и техническим. Предметом дальнейшего рассмотрения будут технические системы, в частности, радиоэлектронные системы.

Под радиоэлектронной системой будем понимать совокупность радиоэлементов, связанных между собой таким образом, чтобы обеспечивать выполнение определенной функции.

Всякая система, в том числе и радиоэлектронная, характеризуется своей структурой. Обычно под структурой понимается внутреннее построение системы. Структура системы «определяется законом взаимосвязи элементов, способа организации, строения и функционирования системы» [6].

В дальнейшем под структурой будем понимать «...упорядоченное конечное множество агрегатов, являющееся отображением множества трехместных отношений, описывающих систему» [1].

Таким образом, структура является не простым набором элементов, функциональных блоков и подсистем, а чем-то целым, образованным взаимосвязанными частями таким образом, что каждая часть устройства зависит от других и ее значение может быть оценено только по взаимоотношениям с остальными элементами системы [1].

Определение понятия сложной системы также связано с определенными трудностями. Обычно сложность системы связывается со сложностью ее структуры, которой сопутствует сложность ее поведения. В [4] сложная система определяется как состоящая из большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение некоторой достаточно сложной функции.

Отличительными признаками сложных систем согласно [4] являются:

— наличие большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов;

— сложность функций, выполняемых системой и направленных на достижение заданной цели функционирования;

— возможность разбиения системы на подсистемы, цели функционирования которых подчинены общей цели функционирования всей системы;

— наличие управления, часто имеющего нерархическую структуру разветвленной информационной сети и интенсивных потоков информации;

— наличие взаимодействия с внешней средой и функционирование в условиях случайных факторов.

Итак, из рассмотренных определений и понятий видно, что понятия: система, структура и сложность органически и неразрывно связаны. Их нельзя рассматривать отдельно, изолированно друг от друга, поскольку они состоят в диалектическом единстве.

Система, структура и сложность являются динамическими понятиями. Они непрерывно изменяются. Изменение одного связано с изменением других или влечет за собой изменение других. Сложность структуры и структура системы являются реальным отображением достигнутого уровня развития науки и техники, степени взаимосвязи и зависимости системы от окружающей среды.

§ 1.2. Определение возможных уровней сложности РЭС

Радиоэлектронные системы являются сложными техническими устройствами. В соответствии с принятым определением их можно отнести к сложным системам. Ввиду того, что само понятие сложности включает как количественные (количество элементов и связей, уровни иерархии структуры и т. д.), так и качественные признаки (глубина связи, управление, взаимодействие и т. д.), то произвести полную, исчерпывающую классификацию радиоэлектронных систем по признаку сложности является затруднительным.

Представляется целесообразным классифицировать радиоэлектронные системы на основе количества входящих в них элементов с учетом перечисленных выше признаков сложности, объединяя количественные и качественные критерии по некоторым условным уровням.

Результаты анализа существующих радиоэлектронных средств позволяют различать следующие уровни сложности радиоэлектронных систем (рис. 1.1):

- первого порядка сложности;
- второго порядка сложности;
- третьего порядка сложности;
- четвертого порядка сложности;
- высшей сложности.

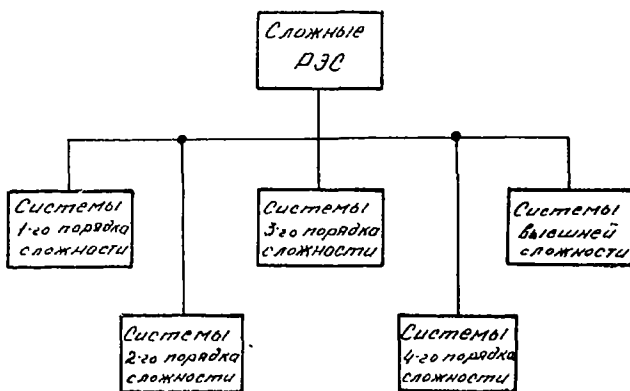


Рис. 1.1

Основным количественным признаком такой классификации может служить уровень, где количество элементов отличается от соседних уровней на порядок.

1. К системам первого порядка сложности относятся системы, состоящие из нескольких десятков элементов, которые взаимосвязаны и взаимодействуют друг с другом. Они выполняют некоторую тривиальную функцию (принимают радиосигналы и воспроизводят их, ретранслируют сигналы, воспроизводят сигналы и т. д.). Их можно разбить на подсистемы (например, УВЧ, гетеродин, детектор); управление и разветвленность информа-

ционной сети у них ограниченные, но они активно могут взаимодействовать с окружающей средой. К этому классу радиоэлектронных систем можно отнести первые образцы радиовещательных приемников, некоторые современные транзисторные радиоприемники. Они, как правило, имеют несколько электронных приборов (ламп, транзисторов).

2. К системам второго порядка сложности относятся такие, которые состоят из нескольких сотен взаимосвязанных и взаимодействующих радиоэлементов (нескольких десятков электронных приборов). К ним можно отнести современные радиовещательные приемники, телевизоры, некоторые из первых образцов РЛС, а также некоторые канцелярские ЭВМ. Эти системы выполняют более сложные функции, чем системы первой группы. Они также могут быть разбиты на подсистемы, каждая из которых может иметь ранг первой группы, управление у них более существенное (несколько каналов у телевизоров, несколько диапазонов у приемников, информационная сеть может быть несколько разветвленной (канал изображения, канал звука). Взаимодействие с внешней средой более активное.

3. РЭС третьего порядка сложности обладают несколькими тысячами взаимосвязанных и взаимодействующих элементов (несколькими сотнями электронных приборов). К ним относятся многие типы РЛС первых образцов, некоторые виды современных РЛС (высотомеры, пеленгаторы и т. д.), системы бортового оборудования летательных аппаратов, местные узлы радиовещания. Для них характерны все перечисленные признаки сложных систем в несколько ограниченном виде.

4. РЭС четвертого порядка сложности имеют несколько десятков тысяч элементов (несколько тысяч электронных приборов). К ним можно отнести современные радиолокационные станции наведения и управления подвижными объектами, современные вычислительные машины, телецентры и т. д. Таким системам присущи все перечисленные признаки сложности. Они могут выполнять несколько видов самостоятельных функций одновременно или последовательно.

5. РЭС высшей сложности имеют несколько сотен тысяч элементов (несколько десятков тысяч электронных приборов). Они могут включать в свой состав несколько сложных и ограниченно сложных систем. К ним можно отнести автоматизированные системы управления, крупные радиолокационные узлы, информационно-управляющие центры, системы оповещения и обеспечения и т. д. Их иногда называют большими системами. Отличительным признаком систем высшей сложности является разнесенность их подсистем в пространстве.

Характерным для разделения радиоэлектронных систем по таким признакам сложности является то, что каждая система высшего уровня может состоять из подсистем, которые являются системами на низшем уровне и наоборот — каждая система низшего уровня может явиться подсистемой высшего уровня.

Такая классификация удобна и тем, что с ее помощью можно проследить развитие отдельных видов систем (эволюцию вида), произвести прогноз тенденции их развития. По мере эволюции вида можно установить факт перехода системы с одного уровня на другой. При этом станет возможным более рационально распределять средства на ее построение.

Кроме того, предложенная классификация радиоэлектронных систем по сложности позволит более целенаправленно решать вопросы адаптивности этих систем. Очевидно, что для различных уровней сложности будут различными уровни, формы и методы адаптивности.

§ 1.3. Уровни сложности и система обслуживания

Опыт создания и эксплуатация радиоэлектронных систем показывает, что система их обслуживания во многом определяется уровнем сложности радиоэлектронной системы. При этом считается, что сложность РЭС зависит как от сложности решаемых задач, так и от степени взаимодействия ее с окружающей средой.

Под системой обслуживания будем понимать совокупность обслуживающего персонала, технических средств и методов, необходимых для обеспечения рабо-

госпособности конкретной технической системы и сохранение ее эффективности на заданном уровне.

Систему обслуживания можно представить в виде следующей модели (рис. 1.2).

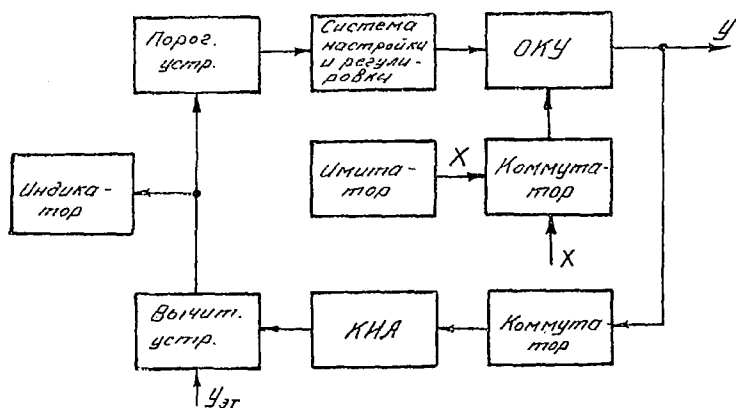


Рис. 1.2

При контроле функционирования контур является разомкнутым. Выходная величина объекта контроля и управления (ОКУ) измеряется контрольно-измерительной аппаратурой (КИА). В вычитающем устройстве измеренная величина $Y(t)$ сравнивается с эталонной и по величине разности

$$\Delta Y(t) = Y_{\text{эт}} - Y_{\text{вых}}(t) \quad (1.1)$$

делается вывод о состоянии системы, который фиксируется индикатором.

При проведении регламентных работ контур системы замыкается. Сигнал ошибки $\Delta Y(t)$ поступает как на индикатор, так и на пороговое устройство. Если величина $\Delta Y(t)$ больше допустимого значения ΔY_0 , т. е. $\Delta Y(t) > \Delta Y_0$, то выдается сигнал на систему настройки, которая приводит параметр $Y(t)$ к норме.

Такая модель применима как для процесса контроля и настройки системы по частным параметрам, так и для

процесса контроля и настройки системы по обобщенным параметрам. Отличие заключается в том, что при контроле и настройке системы по обобщенному параметру она является многоконтурной.

Таких контуров в радиоэлектронных системах может быть различное количество, а может и совсем не быть в зависимости от уровня сложности системы. От уровня сложности зависит также, в какой степени эти контуры должны автоматизироваться.

Для оценки возможности автоматизации такого контура модель, приведенную на рис. 1.2, необходимо несколько видоизменить, не нарушая ее функционального содержания и принципа действия (рис. 1.3).

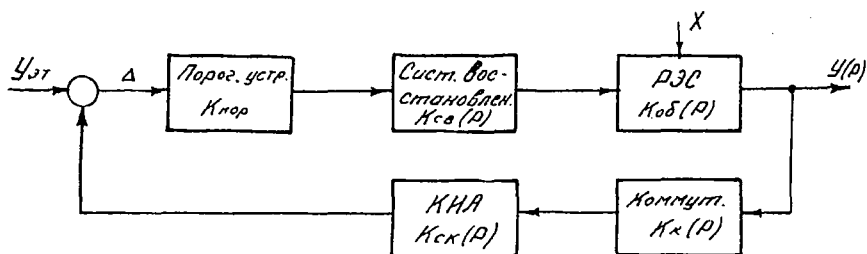


Рис. 1.3

Такая система является замкнутой системой управления с передаточной функцией

$$K_0(p) = \frac{K_{пор} K_{св}(p) K_{об}(p)}{1 + K_{пор} K_{св}(p) K_{об}(p) K_{к}(p) K_{ск}(p)}. \quad (1.2)$$

Результаты анализа радиоэлектронных систем позволяют установить качественную связь между уровнем сложности и степенью автоматизации системы обслуживания.

Системы первого порядка сложности обычно не имеют системы контроля и подстройки параметров. Этот факт обуславливается простотой физической структуры и простотой выполняемых функций, а также низкой степенью общения с окружающей средой. Количество их

частных параметров настолько мало, что даже при значительных их уходах эффективность системы мало изменяется.

Контроль таких систем производится по выходному эффекту (например, есть ли звук, есть ли изображение и т. д.), а также путем внешнего осмотра. Характерным для таких систем является очень низкая интенсивность отказов, большая долговечность, высокая степень готовности к использованию и низкая их адаптивность.

Системы второго уровня сложности являются несколько более совершенными, чем рассмотренные. Они могут иметь некоторые простые контрольные элементы (световые индикаторы, осветительные лампочки и т. д.), но основным методом контроля, как и при очень простых системах, остаются наблюдение за выходным эффектом (звук, изображение, мощность звука) и внешний осмотр. Профилактические мероприятия для этих систем, как и для предыдущих, не предусмотрены. Они имеют характер ремонта. Характерным для этого класса систем является несколько повышенная адаптивность параметров к внешней среде, что выражается в применении таких систем, как стабилизация источников питания (сглаживающие фильтры), автоматическая подстройка частоты гетеродина и автоматическая регулировка усиления.

Радиоэлектронные системы третьего уровня сложности характеризуются тем, что они содержат все современные формы контроля функционирования и профилактического обслуживания. Они оснащены большим числом контрольно-измерительных приборов. На системах проводятся периодические профилактические работы для предотвращения медленных уходов параметров за пределы допусков. Кроме того, целый ряд параметров подвергается автоматической подстройке и регулировке (электронные стабилизаторы источников питания, АРУ, стабилизация частот генераторов и приемников, стабилизация дрейфов нуля УПТ и т. д.). Это объясняется тем, что такие системы взаимодействуют значительно больше с окружающей средой (пассивной и активной), что обуславливается большим количеством составляющих элементов и более сложными функциями, которые выполняет система. В этой связи системы третьего уровня

сложности должны быть в большей мере адаптивными к окружающей среде по параметрам и в некоторой мере могут проявлять адаптивность по структуре за счет наличия элементов резервирования, ЗИП и т. д. Но в основном структура этого класса радиоэлектронных систем остается жесткой.

РЭС четвертого уровня сложности, как и системы третьего уровня, имеют большое количество контрольно-измерительной аппаратуры встроенного и невстроенного тн. а. Ввиду широкого взаимодействия таких систем с окружающей средой и большого числа сложных задач, которые они решают, возникает необходимость частого вмешательства человека в работу системы. Параметры такой системы периодически подстраиваются оператором. Наиболее быстро уходящие из них подстраиваются автоматически либо непрерывно, либо при достижении определенного уровня сигнала ошибки. Следовательно, такие системы должны обладать определенной параметрической адаптивностью. У них в известной степени развита и структурная адаптивность за счет резервирования отдельных блоков и подсистем, а также за счет введения подсистем (элементов) для борьбы с внешними помехами (помехоустойчивость). Структура сложных систем в основном жесткая. Имеются элементы гибкой структуры (перестройка отдельных узлов), но перестройка происходит зачастую вручную.

Системы высшей сложности характеризуются в основном тем же самым, чем и системы третьего и четвертого уровней.

Все рассмотренные свойства систем различных уровней сложности показаны в табл. 1.1.

Анализируя приведенные в табл. 1.1 данные, можно сделать вывод о том, что:

- по мере возрастания сложности радиоэлектронных систем возрастают и средства на обслуживание системы;
- профилактические работы используются в системах более высокого уровня сложности;
- автоматическая подстройка параметров по мере возрастания сложности находит все большее применение.

Таблица 1.1

№ п.п.	Уровень сложности	Система обслуживания				Структура		Примечание	
		Контроль функционирования	Регламентные работы (РР)	АПП	Адаптивность		жесткая		гибкая
					параметрическая	структурная			
1	Системы первого порядка сложности	-	-	-	-	-	+	-	
2	Системы второго порядка сложности	+	-	+	+	-	+	-	
		имеются элементы		имеется частично	имеются элементы				
3	Системы третьего порядка сложности	+	+	в боль- шей сте- пени, чем в (2)	+	+	+	-	
				в боль- шей сте- пени, чем в (2)	+	огра- ниче- но			
4	Системы четвертого порядка сложности	+	+	в боль- шей сте- пени, чем в (3)	+	+	+	+	очень огра- ниче- но
				в боль- шей сте- пени, чем в (3)	+	огра- ниче- но			
5	Системы высшей сложности	+	+	+	+	+	+	+	как в (4)
				как в (3) и (1)	+	огра- ниче- но			

Глава II

ДЕГРАДАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

§ 2.1. Дестабилизирующие факторы и их влияние на радиоэлектронную систему

На каждую радиоэлектронную систему влияет целый ряд факторов, действие которых направлено на снижение эффективности. В самом общем виде эффективность системы является функцией структуры системы S , параметров Y , дестабилизирующих воздействий среды W , времени t и начального уровня эффективности \mathcal{E}_0 , т. е.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t). \quad (2.1)$$

Как правило, начальный уровень эффективности постоянный и зависит от начальной структуры S_0 и номинальных значений параметров Y_0 системы, т. е.

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}(S_0, Y_0) = \text{const}. \quad (2.2)$$

Если не предусматривается модернизация системы, то структура неизменна, т. е. $S_0 = \text{const}$. При этих допущениях эффективность системы зависит от вектора параметров Y , дестабилизирующих факторов W и от времени t .

Дестабилизирующие факторы среды можно разделить условно на две группы (рис. 2.1): внешние и внутренние.

К внешним дестабилизирующим факторам относятся так называемые негативные системы [1]. Сюда входят: окружающая среда, противодействующие системы и новые системы одного вида с рассматриваемой.

В дальнейшем будут рассматриваться лишь окружающая среда и противодействующие системы.

Окружающая среда непрерывно воздействует на радиоэлектронную систему, ухудшая качество ее функционирования. Воздействия среды на систему могут быть очень медленными, порою даже незаметными на небольших отрезках времени, но они могут быть и быстрыми. Основным отрицательным результатом воздействия среды является изменение физико-химической структуры

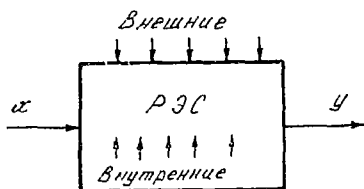


Рис. 2.1

материалов, из которых изготовлены элементы системы, что приводит к изменению параметров, а следовательно, и эффективности системы.

Противодействующие системы создаются специально для подавления рассматриваемых систем. Борьба этих двух противоборствующих систем особенно хорошо видна на примере систем военного назначения. Как правило, воздействие таких систем является кратковременным, но вероятность снижения эффективности системы очень велика.

Воздействие противодействующих систем может быть двух видов: активное и пассивное.

При активном воздействии противосистема стремится к физическому уничтожению системы или к выводу ее из строя на длительное время, разрушая отдельные ее узлы, нарушая цепи управления и т. д.

При пассивном воздействии противосистема ухудшает условия работы системы, создавая ложные сигналы и излучая помехи (активные и пассивные). Эти противодействия снижают эффективность системы на некоторое время $t_{в}$.

К внутренним дестабилизирующим факторам можно отнести такие, как старение элементов и внутренние возмущения системы.

Старение является объективным, необратимым процессом. Его нельзя замедлить, его можно только ускорить, изменяя окружающую среду. В некоторой степени со старением можно бороться, применяя параметрическую компенсацию.

Внутренние возмущения системы могут проявляться в виде внутренних помех (шумов) и в виде изменений электрических нагрузок элементов.

Внутренние помехи возникают в конструктивных элементах системы (шумы ламп, сопротивлений и т. д.). Они присутствуют неизбежно в системе. Их влияние можно снизить за счет тщательного подбора элементов при создании системы.

Электрические нагрузки можно разделить на два вида по месту действия в цепях электронных ламп: управляющие цепи и питающие цепи.

Управляющими являются цепи сеток и катода, питающими — цепи анода, накала и катода. Действия всех электрических перегрузок (а также и недогрузок) в лампах сводятся к изменению коэффициентов усиления каскадов, от которых зависит вектор параметров Y системы, а следовательно, и изменение эффективности \mathcal{E} .

Все рассмотренные дестабилизирующие факторы, влияющие на эффективность системы, можно представить в виде классификационной таблицы (рис. 2.2).

§ 2.2. Деграция радиоэлектронной системы

Система как законченная конструкция обладает максимальным, заложенным при ее создании, количеством информации. В момент вступления системы в эксплуатацию она обладает максимальной организованностью и ее эффективность также максимальна [1], т. е. при $t = 0$

$$\mathcal{E}(0) = \mathcal{E}_{\max}. \quad (2.3)$$

Но все же любая система обладает и некоторой степенью неорганизованности, которой соответствует энтропия

$$H(0) = H_{\min}. \quad (2.4)$$

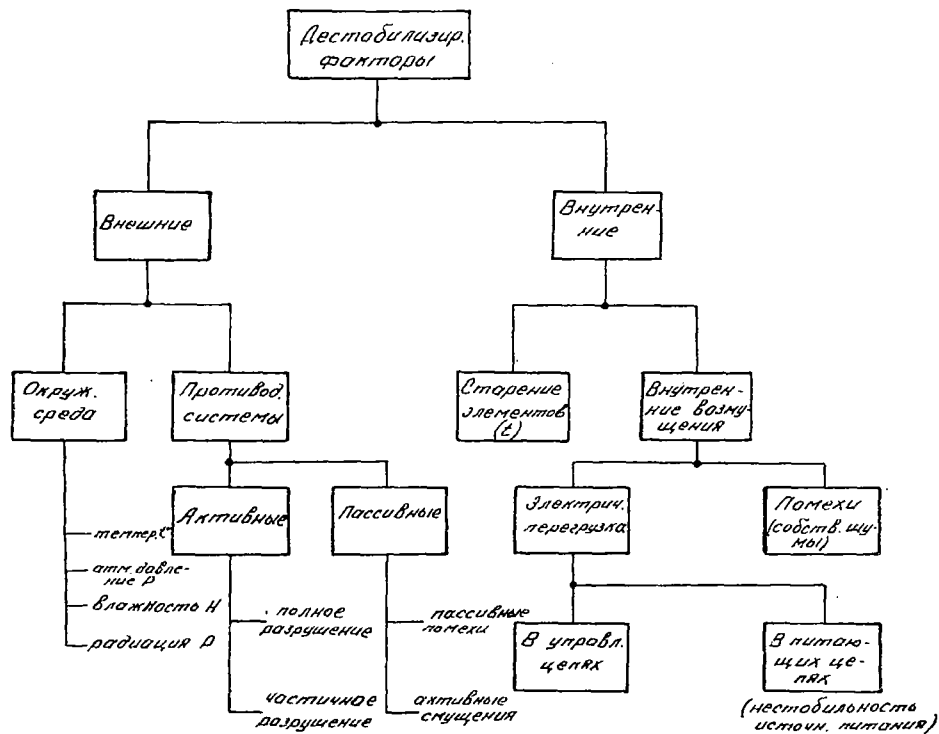


Рис. 2.2

С самого начала эксплуатации за счет действия вышерассмотренных дестабилизирующих факторов начинается возрастание степени неорганизованности системы, что приводит к снижению эффективности.

На изменение эффективности (степени неорганизованности) системы влияют суммарные воздействия двух противоборствующих групп факторов [1]:

- негативная система, снижающая эффективность;
- позитивная среда, стабилизирующая эффективность.

В результате влияния этих двух групп факторов эффективность и степень неопределенности будут изменяться в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}(t) &= \mathcal{E}(0) + \Delta \mathcal{E}_n(t) - \Delta \mathcal{E}_n(t); \\ H(t) &= H(0) - \Delta H_n(t) + \Delta H_n(t), \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где $\Delta \mathcal{E}_n(t)$ и $\Delta H_n(t)$ — увеличение и уменьшение соответствующего показателя за счет влияния позитивных факторов;

$\Delta \mathcal{E}_n(t)$ и $\Delta H_n(t)$ — уменьшение и увеличение соответствующего показателя за счет влияния негативной системы.

Так как на сегодняшний день еще не создана такая система, которая без изменения в структуре может увеличивать свою эффективность в процессе эксплуатации по сравнению с начальной $\mathcal{E}(0)$, то очевидно, что с течением времени эффективность системы будет убывать. Это равносильно возрастанию энтропии ее состояния, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\mathcal{E}(t)}{dt} &< 0; \\ \frac{dH(t)}{dt} &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Пример 2.1. Рост дезорганизации системы с течением времени можно показать на примере увеличения энтро-

пии, которая может быть вычислена через плотности вероятностей значений параметров элементов [1]:

$$H(t) = \sum_{j=1}^n \left[- \int_{-\infty}^{\infty} f_j(y, t) \log f_j(y, t) dy - \log \Delta y_j \right], \quad (2.7)$$

где n — число элементов, параметры которых влияют на эффективность системы;

Δy_j — степень точности определения состояния;

$f_j(y, t)$ — плотность распределения j -го параметра в момент времени t .

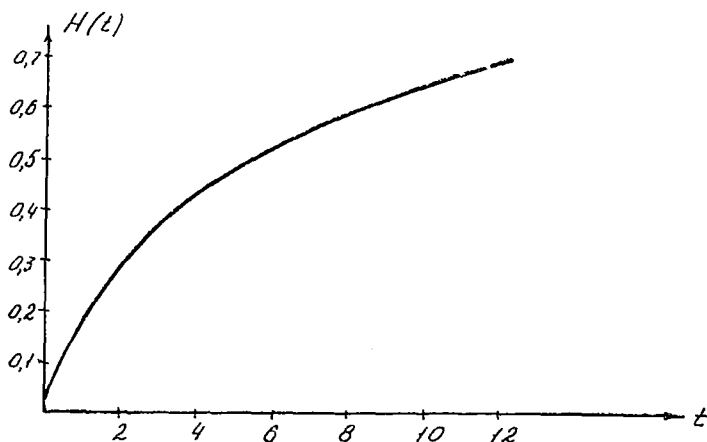


Рис. 2.3

Для нормального распределения j -го параметра энтропия будет

$$H(t) = \sum_{j=1}^n \log \frac{\sqrt{2\pi e D_j(t)}}{\Delta y_j} = \sum_{j=1}^n \log \frac{\sigma_j(t)}{\Delta y_j} \sqrt{2\pi e}. \quad (2.8)$$

При линейном возрастании дисперсии флуктуации параметров

$$D_j(t) = D_{0j}(1 + \alpha_j t) \quad (2.9)$$

возрастание энтропии определится выражением

$$H(t) = \sum_{j=1}^n \log \left[\frac{\sigma_{0j} \sqrt{1 + \alpha_j t}}{\Delta y_j} \sqrt{2\pi e} \right], \quad (2.10)$$

где α_j — скорость возрастания дисперсии j -го параметра;

D_{0j} — начальное значение дисперсии j -го параметра.

График выражения $H(t)$ (2.8) показан на рис. 2.3.

При периодическом воздействии на систему позитивной группы факторов энтропия системы будет частично уменьшаться, а затем снова будет возрастать по тому же самому закону, но только с нового, более высокого уровня (рис. 2.4).

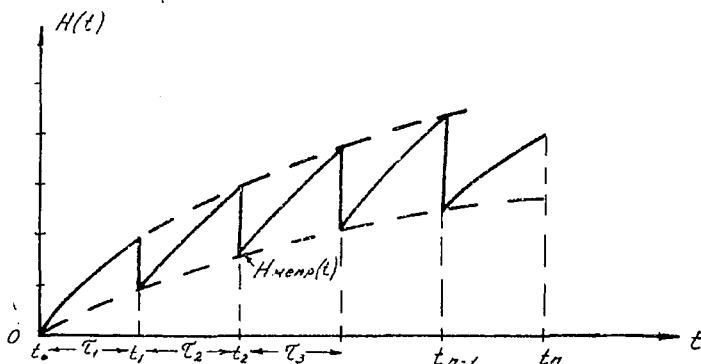


Рис. 2.4

Такую пилообразную функцию удобно записывать с помощью селектирующих функций [11]

$$H(t) = \sum_{j=1}^n H(j\tau) si_{\kappa}(t, t_{j-1}, t_j - \varepsilon), \quad (2.11)$$

$$1 \leq j \leq n; t_{j-1} \leq j\tau \leq t_j$$

где $H(j\tau)$ — функция изменения энтропии системы за время между воздействиями позитивных факторов;

ϵ — величина, учитывающая время воздействия на систему.

Аналогичным образом можно выразить закон изменения эффективности системы в процессе эксплуатации

$$\vartheta(t) = \sum_{j=1}^n \vartheta(j\tau) si_K(t, t_{j-1}, t_j - \epsilon). \quad (2.12)$$

Такая зависимость графически представлена на рис. 2.5.

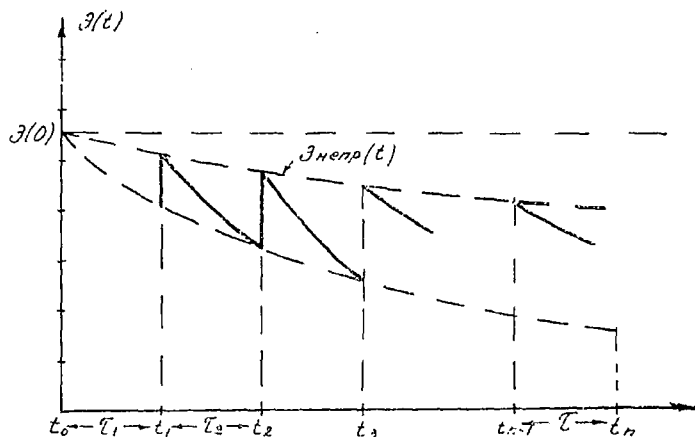


Рис. 2.5

Действие позитивных факторов не может увеличить эффективность системы до начального уровня из-за влияния необратимых процессов.

Выражения (2.11) и (2.12) определяют закон изменения неорганизованности и эффективности во времени.

Рассмотренный процесс жизни системы определенного типа и является процессом деградации системы. Перед создателями и эксплуатационниками радиотехнических систем всегда должна стоять задача создавать такие системы, которые работали бы с максимальной эффективностью. Существенный выигрыш в этом отношении может дать построение систем с параметрической и

структурной адаптацией к окружающей среде. Адаптация может иметь два возможных следствия:

— удлинение срока службы системы при одном и том же минимальном уровне эффективности;

— повышение уровня эффективности системы при одном и том же сроке службы.

§ 2.3. Возможные методы стабилизации эффективности

Для определения возможных методов стабилизации эффективности рассмотрим две взаимодействующие системы: РЭС и среду. К моменту начала взаимодействия между этими системами существует некоторая неопределенность, характеризующаяся начальной энтропией H'_0 и начальной моментной эффективностью РЭС \mathcal{E}'_0 . Чтобы система могла работать в условиях взаимодействия со средой, она должна изучить ее и адаптироваться к ней, что приведет к уменьшению степени неопределенности H'_0 до некоторого допустимого уровня H_{\min} и повышению эффективности \mathcal{E}'_0 до требуемой величины \mathcal{E}_{opt} . Другими словами, система должна решать задачу

$$\left. \begin{array}{l} \mathcal{E}'_0 \rightarrow \mathcal{E}_{\min}; \\ H'_0 \rightarrow H_{\text{opt}}. \end{array} \right\} \quad (2.13)$$

Для оценки возможной стабилизации эффективности рассмотрим следующую модель адаптивной системы (рис. 2.6).

Такая система состоит из функциональной части (объект управления) и адаптирующей части (измеритель текущей информации и устройство управления).

Противодействующие системы — среда и РЭС — являются динамическими и характеризуются следующими векторами:

— вектором управляющих воздействий

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}; \quad (2.14)$$

— вектором возмущающих воздействий среды

$$E(t) = \{e_1(t), e_2(t), \dots, e_k(t)\}; \quad (2.15)$$

— вектором выходных параметров

$$Y(t) = Y\{y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)\}, \quad (2.16)$$

причем количество входных возмущающих воздействий k может изменяться.

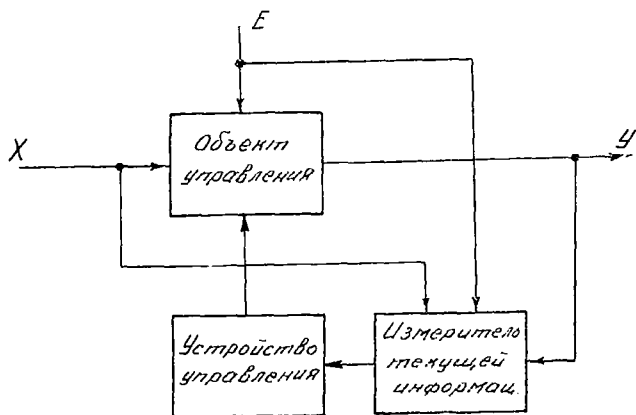


Рис. 2.6

В дальнейшем примем, что $k = \text{const}$, считая, что исчезающие воздействия $e_1(t)$ имеют величину $e_1(t) = 0$.

Алгоритм функционирования такой системы описывается уравнениями:

$$Y = Y(X, E) \text{ ---} \quad (2.17)$$

для разомкнутой системы и

$$Y = Y(X, E, Y) \text{ ---} \quad (2.18)$$

для замкнутой системы.

Из приведенных алгоритмов функционирования (2.17) и (2.18) видно, что система должна быть адаптивной как к управляющим воздействиям X , так и к возму-

щающим воздействиям. Элементы адаптации должны предусматриваться еще на этапе проектирования системы. При этом можно построить систему гиперустойчивую по отношению ко всем воздействиям среды. В настоящее время системы, как правило, имеют невысокий уровень адаптивности, что вызвано трудностями решения сложных систем уравнений (2.17), (2.18) и отсутствием априорной информации.

Адаптация может быть двух видов: параметрическая и структурная.

При параметрической адаптации система приспосабливается к среде, подстраивая свои параметры не изменяя структуру. В этом случае имеются элементы (устройства), которые реагируют только на изменение некоторого параметра системы. В современных радиоэлектронных системах можно считать элементами параметрической адаптации такие устройства, как стабилизация уровня тока и напряжения, автоматическая регулировка усиления, стабилизация дрейфа нуля в УПТ, стабилизация и автоподстройка частоты и фазы и т. д. Это сравнительно несложные устройства, синтез которых производится на основе теории автоматического управления и регулирования.

Хотя теория таких устройств разработана хорошо, они все же применяются в ограниченной степени при построении радиоэлектронных систем. Увеличение удельного веса устройств параметрической адаптации приведет к значительному снижению стоимости эксплуатации систем и снижению непроизводительного расхода ресурсов.

Структурная адаптация системы выражается в частичном изменении и перестройке структуры системы в зависимости от воздействия среды. Такие системы можно строить на основе жестких и гибких структур.

Как правило, любая система описывается совокупностью дифференциальных уравнений, число которых зависит от числа составных элементов (от числа первичных параметров). Если $y_1(t, x_{ij})$ — первичные (частные)

параметры, то система уравнений будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_1(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}); \\ y_2 &= y_2(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}); \\ &\dots\dots\dots \\ y_m &= y_m(x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mm}), \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

где x_{ij} — j -й фактор, который воздействует на i -й элемент.

Такую систему решить нетрудно, если не учитывать громоздкость вычислений при большом m . Но при этом можно широко использовать современные ЭВМ.

В векторном виде такую систему можно записать как равенство

$$Y_{(m \times 1)} = Y(X)_{(m \times m)}, \quad (2.20)$$

где $Y_{(m \times 1)} = \|y_j\|_{m,1}$ — матрица-столбец частных (первичных) параметров;

$X_{(m \times m)} = \|x_{ij}\|_{m,m}$ — матрица управляющих воздействий.

Но реализованная по такому алгоритму система практически не сможет функционировать или будет функционировать с очень низкой эффективностью, так как она не будет учитывать влияние среды, т. е. не будет обладать никакой адаптивностью. Реальная, жизнеспособная система описывается системой m дифференциальных уравнений с s неизвестными (входными) параметрами, где $m < s$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_1(t, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}, e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1\kappa}); \\ y_2 &= y_2(t, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2m}, e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2\kappa}); \\ &\dots\dots\dots \\ y_m &= y_m(t, x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mm}, e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{m\kappa}), \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

где $s = m + \kappa + 1$.

В векторной форме

$$Y_{(m \times 1)} = Y(t, X, E)_{(m \times m)}, \quad (2.22)$$

Так как число переменных может меняться, то, очевидно, и число уравнений должно меняться, что также вызывает затруднения при решении задачи.

Пока такие задачи можно решать приближенными численными методами, но сам процесс решения является очень длительным, что противоречит оперативности работы радиоэлектронных систем.

Определенные успехи в решении задачи по созданию адаптивных систем с гибкой структурой имеются в работах Эшби [20], М. Б. Игнатьева [14, 18], Л. А. Растригина [10] и др.

Создание адаптивных радиоэлектронных систем связано с известными расходами при построении, что выразится в введении структурной избыточности в систему. В этой связи возникает вопрос о пересмотре старых и разработке новых методов введения избыточности и ее научное управление на этапах создания и эксплуатации системы, что приведет к значительному повышению начального уровня эффективности системы \mathcal{E}_0 и уменьшению скорости ее убывания за счет изменения структуры S в выражение (2.1)

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, W, Y, t).$$

§ 2.4. Методы стабилизации эффективности системы и автоматического регулирования

Как отмечалось выше, в последнее время все чаще возникает необходимость обеспечения управления объектами при существенном и непредвиденном изменении их параметров и параметров входных сигналов, а также невозможность их априорного определения. Обычные системы автоматического регулирования не могут в принципе обеспечить удовлетворительных качеств управления в таких условиях, так как начальная информация недостаточна, а устройств пополнения информации они не имеют. Для выполнения подобных задач можно использовать так называемые адаптивные системы, способ функционирования которых изменяется целенаправленным образом для осуществления наилучшего управления объектом.

Адаптивные системы, у которых целенаправленно изменяются параметры управляющего устройства, называют самонастраивающимися (СНС), параметры и структуру — самоорганизующимися, параметры, структуру и алгоритм управления — самоалгоритмизирующимися [7].

В самонастраивающихся системах внимание сосредоточено либо на создании оптимальных статистических условий работы объекта, либо на создании оптимальных условий работы регулятора в зависимости от состояния (в текущий момент времени) среды, в которой функционирует система [5].

Самонастраивающиеся системы могут быть беспонковые и поисковые. Поисковые системы самонастройки являются более сложными, так как в них нужно закладывать большее количество информации. Беспонковые, наоборот, рассчитываются при условии, что известна определенная априорная информация о возможных дестабилизирующих факторах.

Самонастраивающиеся системы состоят из основного контура и контура самонастройки. Самая обобщенная модель системы показана на рис. 2.7.

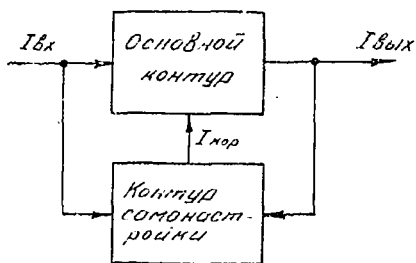


Рис. 2.7

Основной контур включает в себя объект управления и настраиваемую часть системы управления. Контур самонастройки включает в себя генератор пробных (эталонных) сигналов, сравнивающее устройство (СУ) и исполнительное устройство (ИУ).

Настраиваемая часть системы является управляющим устройством для объекта управления. Управляющее устройство (УУ) и объект управления (ОУ) включаются последовательно.

Настройку параметров управляющего устройства можно осуществлять по разомкнутому или замкнутому циклам.

Модель управления объектом по разомкнутому циклу следующая (рис. 2.8).

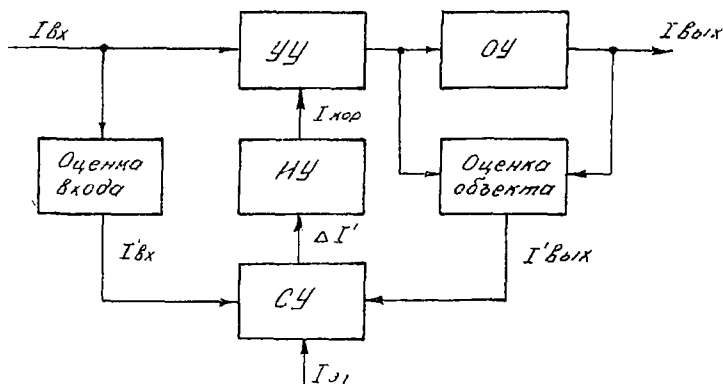


Рис. 2.8

Входная и выходная информации поступают на сравнивающее устройство. Их разность сравнивается с информацией эталонного генератора $I_{эт}$, оценивается величина $\Delta I = (I'_{вх} - I'_{вых}) - I_{эт}$ и если $|\Delta I| > I_{эт}$, выдается сигнал на исполнительное устройство для подстройки параметров управляющего устройства и объекта управления.

Процесс подстройки продолжается до тех пор, пока уровень количества информации на выходе $I_{вых}$ не примет оптимального значения, т. е. пока не выполнится условие

$$|\Delta I| \leq I_{эт}. \quad (2.24)$$

Упрощенную модель подстройки параметров по замкнутому циклу можно представить в виде рис. 2.9.

Принцип функционирования такой системы аналогичен разомкнутой с той разницей, что здесь в качестве входной информации для системы самонастройки $I'_{вх}$ используется сигнал ошибки

$$I'_{вх} = \Delta I, \quad (2.25)$$

который сравнивается с эталонной информацией $I_{эт}$ и на основании величины отклонения выходной информации система вырабатывает корректирующую информацию $I_{кор}$.

Рассмотрены так называемые самонастраивающиеся системы с эталоном. В принципе возможно построение СНС с поиском экстремума, но они являются более сложными и применимы для отыскания и поддержания параметра в экстремальном положении. Их модель функционирования может сводиться к рассмотренным уже с той разницей, что вместо эталонного генератора найдет место генератор поисковых (меняющихся) сигналов.

Самонастраивающиеся системы характеризуются следующими основными особенностями [7]:

- наличием помимо основного контура управления по меньшей мере еще одного дополнительного контура самонастройки или цепи самонастройки;
- наличием нелинейных элементов;
- наличием элементов с изменяемыми параметрами;
- наличием логических элементов.

Такие системы описываются нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, решение которых в ряде случаев затруднительно, чем и объясняется ограниченность их применения.

Нетрудно заметить, что самонастраивающиеся системы осуществляют параметрическую адаптацию радиоэлектронной системы к тем или другим дестабилизирующим факторам.

Самоалгоритмизирующиеся системы называются иногда и самообучающимися. Характерным для них яв-

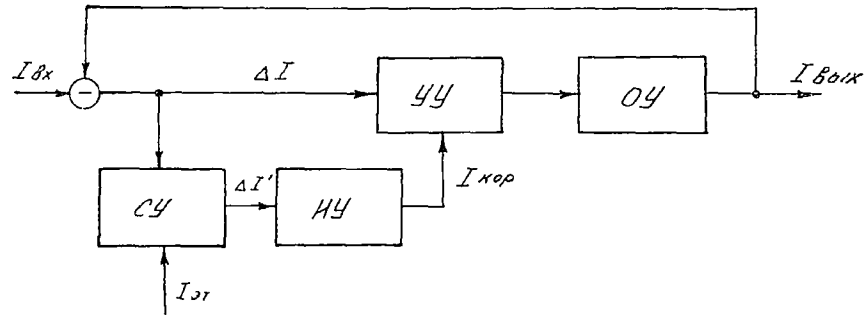


Рис. 2.9

ляется то, что в них учитывается, накапливается и запоминается информация о предыстории протекаемых в системе процессов. На основании накопленного «опыта» происходит обучение системы, что выражается в рациональном выборе алгоритма своего дальнейшего поведения. Применение таких систем, как правило, связано с использованием средств вычислительной техники. Принципы самообучения можно использовать для глобального повышения эффективности систем, а не для локального. Примерами самообучающейся системы могут служить игровые системы.

Самоорганизующиеся системы являются системами с переменной структурой. Структура может меняться по определенной программе или случайным образом, когда возможные изменения среды заранее не известны. Такие системы могут включать в себя элементы самонастройки и самообучения.

При проектировании самоорганизующихся систем в них закладывается принятый критерий эффективности и определенный набор структур, обеспечивающих наилучший режим с точки зрения эффективности.

Уравнение эффективности

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t) \quad (2.26)$$

будет учитывать изменение структуры S в зависимости от изменения вектора параметров Y , т. е.

$$S = S(Y). \quad (2.27)$$

В таком случае эффективность выразится в виде функции

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S/Y, Y, W, t), \quad (2.28)$$

где S/Y — условная структура, зависящая от изменения вектора параметров Y .

Физически первоначальную структуру S_0 в общем случае можно представить как набор элементов (функциональных ячеек), связанных друг с другом случайным образом. Эти связи могут меняться под воздействием как управляющих, так и возмущающих факторов. В процессе функционирования такой системы с помощью логического устройства производится анализ уровня эффек-

тивности системы и автоматически отыскивается наилучшая структура, обеспечивающая \mathcal{E}_{opt} .

Упрощенную модель такой системы можно представить в виде рис. 2.10.

Принцип действия такой системы заключается в следующем. Во время функционирования системы анализатор производит оценку эффективности $\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t)$, а также влияния управляющих воздействий и возмущения среды. Если $\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t) < \mathcal{E}_{\text{opt}}$, анализатор выдает управляющую информацию $I_{\text{уп}}$ на оптимизатор структуры S , который рассчитывает оптимальную для данного варианта структуру системы S_{opt} и выдает команду на исполнительное устройство для сборки (переключения) нужного варианта структуры.

Самоорганизующиеся системы являются типичным примером систем со структурной и параметрической адаптацией.

Перспективным для стабилизации параметров и эффективности радиоэлектронных систем является применение принципа инвариантности.

Принцип инвариантности заключается в компенсации влияния возмущений с целью улучшения динамических характеристик объекта, находящегося под воздействием нестационарных процессов.

Если управляющее воздействие и помеха приложены в одной точке, то решение задачи слежения на основе теории инвариантности невозможно, т. е. нельзя исключить зависимость выходного параметра от входного, когда в состав входного сигнала входит и помеха.

В обычных системах автоматического управления (рис. 2.11) связь между выходным и входным количеством информации определяется дифференциальным уравнением

$$I_{\text{вых}} [1 + K(p)] = I_{\text{вх}} K(p), \quad (2.29)$$

где $K(p)$ — передаточная характеристика разомкнутой системы.

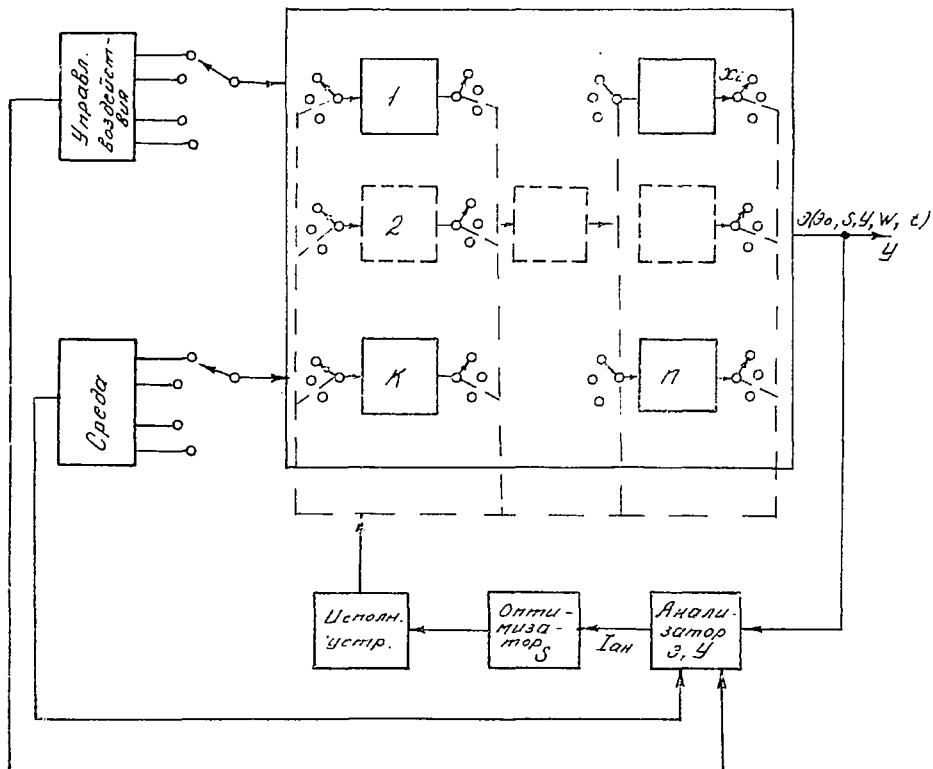


Рис. 2.10

Если в состав управляющей информации входит как полезная составляющая I_0 , так и шумы (возмущения) $I_{ш}$, т. е.

$$I_{вх} = I_0 + I_{ш}, \quad (2.30)$$

то очевидно, что выходной параметр $I_{вых}$ будет зависеть как от I_0 , так и от $I_{ш}$. Поэтому целесообразным является совместное использование методов статистической динамики с методами теории инвариантности для синтеза оптимальной системы поддержания параметров и эффективности на требуемом уровне.

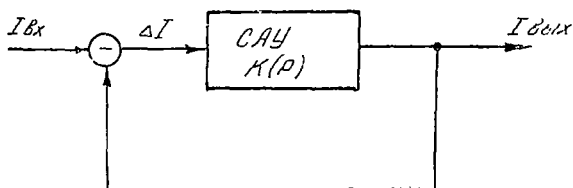


Рис. 2.11

Чтобы исключить зависимость выходной величины от входной, входную нужно вводить в двух точках системы. Для системы стабилизации параметров такую комбинированную модель можно представить в следующем виде [5] (рис. 2.12).

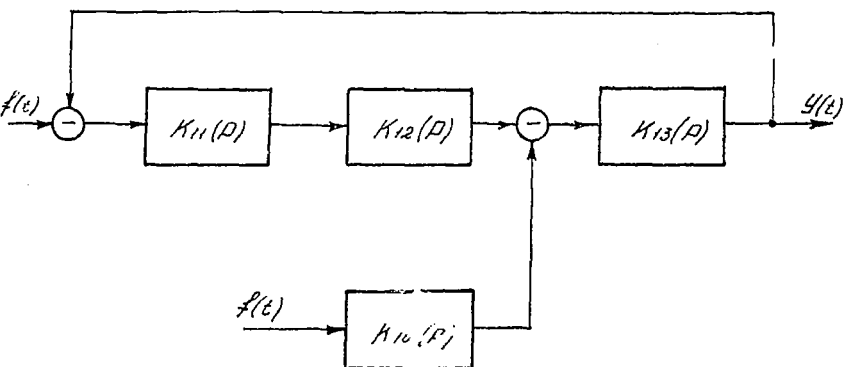


Рис. 2.12

Передачная функция такой системы будет определяться из дифференциального уравнения системы

$$Y(p) = \left[f(p) \frac{K(p)}{1 + K(p)} + f(p) \frac{K_{10}(p) K_{13}(p)}{1 + K(p)} \right], \quad (2.31)$$

или

$$Y(p) [1 + K(p)] = f(p) [K(p) + K_{10}(p) K_{13}(p)]. \quad (2.32)$$

Отсюда

$$K_0(p) = \frac{Y(p)}{f(p)} = \frac{K(p) + K_{10}(p) K_{13}(p)}{1 + K(p)}. \quad (2.33)$$

Условие полной инвариантности, т. е. полной независимости выходной величины $Y(t)$ от помехи $f(t)$ будет выполняться, когда $K_0(p) = 0$, или

$$K(p) + K_{10}(p) K_{13}(p) = 0. \quad (2.34)$$

Отсюда

$$K_{10}(p) = - \frac{K(p)}{K_{13}(p)} = - K_{11}(p) K_{12}(p). \quad (2.35)$$

Физический смысл условия полной инвариантности заключается в том, что система будет создавать такое воздействие на объект, которое полностью бы компенсировало влияние возмущающих факторов.

Реально создать такую систему невозможно, поэтому вводится инвариантность до ε , где ε некоторое бесконечно малое число. Для радиоэлектронных систем критерием ε может служить допуск на параметр регулируемого устройства.

Инвариантные системы можно успешно применять для компенсации постепенных отказов — быстрых и медленных флюктуаций параметров.

Примерами реализации принципов инвариантности могут служить [5] различные компенсаторы (например, температурный) и стабилизаторы питающих напряжений.

Г л а в а III

ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

§ 3.1. Причины изменения параметров систем

Из приведенной классификации дестабилизирующих факторов (см. рис. 2.2) можно выделить следующие из них, непрерывно влияющие на изменение параметров аппаратуры:

- окружающая среда;
- старение элементов;
- нестабильность питающих напряжений.

Остальные имеют эпизодический характер воздействия.

Рассмотрим перечисленные факторы.

Как указывалось ранее, старение является медленно протекающим во времени необратимым процессом. Одностороннее протекание процесса предполагает одностороннее, т. е. монотонное изменение параметров. Пусть имеется некоторый параметр y , который изменяется с течением времени t под воздействием процессов старения элементов, т. е. он является функцией времени

$$y = y(t). \quad (3.1)$$

Исходя из монотонности изменения параметра, его можно разложить в степенной ряд n -й степени

$$y(t) = y_0 + k_1 t + k_2 t^2 + \dots + k_n t^n.$$

Так как функция $y(t)$ изменяется сравнительно медленно, то можно ограничиться первыми двумя членами ряда

$$y(t) = y_0 + k_1 t, \quad (3.2)$$

где y_0 — постоянная составляющая параметра;
 $k_1 = \frac{dy(t)}{dt}$ — коэффициент, учитывающий скорость и
направление изменения параметра.

В реальных системах ошибка из-за старения элементов практически не учитывается. Обычно считается, что $k_1 = 0$, т. е.

$$y(t) = y_0 = \text{const.} \quad (3.3)$$

Влияние окружающей среды изучено довольно глубоко [2, 3, 19]. Оно проявляется в основном воздействием на радиоэлектронные системы таких факторов, как температура воздуха и аппаратуры, влажность, давление атмосферы, естественная и искусственная радиация и т. д.

Температура является одним из наиболее быстро меняющихся дестабилизирующих факторов. Под ее воздействием меняются как физические, так и химические свойства материалов, из которых сделаны элементы системы. Под воздействием изменяющейся температуры параметры могут либо возрастать, либо убывать в зависимости от направления изменения температуры. Изменения в структуре элемента, вызванные температурой, могут быть двух видов: обратимые и необратимые. Необратимые влияния связаны в основном с увеличением скорости старения, а следовательно, и с увеличением веса второй составляющей параметра (3.2). Обратимые воздействия остаются без последствия после прихода температуры к нормальной величине.

Влияние температуры проявляется практически немедленно, а точнее с тем небольшим запозданием, которое характеризует тепловую инерционность отдельных деталей.

В общем случае под воздействием изменения температуры t° параметр $y(t^\circ)$ изменяется по какому-то случайному закону, колеблясь вокруг номинального значения y_0 :

$$y(t^\circ) = y_0 + \Delta y(t^\circ) = y_0 + k_2 \Delta t^\circ. \quad (3.4)$$

Считается [2, 19], что параметр принимает номинальное значение y_0 при температуре окружающей среды $t^\circ = 20 \div 25^\circ\text{C}$.

Влажность и давление атмосферы оказывают влияние на изменение параметров только при длительной эксплуатации радиоэлектронных систем в этих условиях. В общем случае они тоже влияют на параметр y по некоторому случайному закону

$$\left. \begin{aligned} y(p) &= y_0 + \Delta y(p) = y_0 + k_3 \Delta p; \\ y(h) &= y_0 + \Delta y(h) = y_0 + k_4 \Delta h, \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где $y(p)$ и $y(h)$ — параметр как функция от давления и влажности атмосферы соответственно.

Параметр y также зависит от степени облучения. Наиболее сильно сказывается радиационное облучение на радиоэлектронные системы, построенные на полупроводниковых элементах.

Для этого случая

$$y(p) = y_0 + \Delta y(p) = y_0 + k_5 \Delta p, \quad (3.6)$$

где Δp — уровень радиации.

Нестабильность источников питания радиоэлектронной аппаратуры оказывает очень существенное влияние на стабильность параметров и особенно на работу электронных приборов и колебательных систем. В электронных приборах это влияние может выразиться в постоянном перемещении рабочей точки или изменении эмиссионной способности катода, а в колебательных системах может привести к нежелательным паразитным колебаниям, что неизбежно приводит к флюктуациям параметра. В итоге также получается изменение параметра $y(u)$ на некоторую величину $\Delta y(u)$, которая зависит от величины и знака отклонения питающего напряжения от номинального значения, т. е.

$$y(u) = y_0 + \Delta y(u) = y_0 + k_6 \Delta u. \quad (3.7)$$

Как уже отмечалось, в современных радиоэлектронных системах приняты меры по стабилизации источников электропитания. На повестке дня стоит вопрос об оценке эффективности и целесообразности применения существующих методов стабилизации.

Из проведенного анализа видно, что параметры y являются функциями многих переменных: старения t , температуры t° , давления атмосферы p , влажности воздуха h , уровня радиации r , стабильности питающих напряжений Δu и других нерассмотренных факторов (биологических, запыления и т. д.), т. е.

$$y = y(t, t^\circ, p, h, r, \Delta u). \quad (3.8)$$

Параметр можно представить как состоящий из некоторой постоянной составляющей y_0 , определяемой при номинальных значениях рассматриваемых факторов

$$y_0 = y(t_0, t_0^\circ, p_0, h_0, r_0, \Delta u_0) \quad (3.9)$$

и переменной составляющей $\Delta y(\cdot)$, определяющей уход параметров.

В общем случае

$$y(t, t^\circ, p, h, r, \Delta u) = y_0 + \Delta y(t, t^\circ, p, h, r, \Delta u). \quad (3.10)$$

Если считать факторы независимыми явлениями, то величина $\Delta y(\cdot)$ выразится через сумму ошибок, вносимых всеми факторами

$$y(t, t^\circ, p, h, r, \Delta u) = y_0 + \Delta y(t) + \Delta y(t^\circ) + \Delta y(p) + \Delta y(h) + \Delta y(r) + \Delta y(\Delta u), \quad (3.11)$$

или

$$y(t, t^\circ, p, h, r, \Delta u) = y_0 + k_1 \Delta t + k_2 \Delta t^\circ + k_3 \Delta p + k_4 \Delta h + k_5 \Delta r + k_6 \Delta u. \quad (3.12)$$

Свойство аддитивности ошибок в некоторых случаях, видимо, можно использовать для взаимной компенсации. В таком случае решение задачи будет сводиться к минимизации выражения ошибки, т. е.

$$k_1 \Delta t + k_2 \Delta t^\circ + k_3 \Delta p + k_4 \Delta h + k_5 \Delta r + k_6 \Delta u = \min. \quad (3.13)$$

В последнем выражении коэффициенты $k_1 + k_6$ являются частными производными параметров по соответствующим факторам. Физически они выражают скорости уходов параметра из-за влияния i -го фактора. Обычно

их называют весовыми коэффициентами отдельных составляющих ошибок.

В общем случае рассматриваемые факторы связаны между собой. Так, температура неизбежно влияет на старение и влажность, влажность на температуру и т. д. Реально это означает, что отдельные составляющие ошибки $\Delta y(t, t^\circ, p, h, \rho, \Delta u)$ коррелированы. Связь между составляющими ошибки определяется симметричной корреляционной матрицей

$$\|R_{ij}\| = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{vmatrix}. \quad (3.14)$$

С учетом корреляции факторов параметр будет

$$\begin{aligned} y(t, t^\circ, p, h, \rho, \Delta u) = \\ = y_0 + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \|R_{ij}\| y(t, t^\circ, p, h, \rho, \Delta u). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Пример 3.1. Имеется параметр радиоэлектронной аппаратуры y , номинальное значение которого $y_0 = +2,8$ в при оптимальных условиях окружающей среды. Известны весовые коэффициенты отдельных составляющих ухода параметра:

$$k_1 = -0,00001 \text{ в/сутки};$$

$$k_2 = 0,004 \text{ в/град};$$

$$k_3 = -0,0001 \text{ в/мм рт. ст.};$$

$$k_4 = -0,002 \text{ в/\%};$$

$$k_5 = 0,003 \text{ в/\rho};$$

$$k_6 = 0,007 \text{ в/\%}.$$

В некоторый момент времени t факторы среды изменились следующим образом относительно оптимальных: $\Delta t^\circ = +10$ в, $\Delta p = +40$ мм рт. ст.; $\Delta h = -8\%$; $\Delta \rho = 35$ ρ; $\Delta u = +5\%$.

Определить отклонение параметра $\Delta y(\cdot)$ от своего номинального значения. Ввиду малости веса старения по сравнению с другими факторами его можно не учитывать

$$\Delta y(\cdot) = k_2 \Delta t + k_3 \Delta p + k_4 \Delta h + k_5 \Delta \rho + k_6 \Delta u = 0,004 \times \\ \times 10 - 0,001 \cdot 40 + 0,003 \cdot 35 + 0,001 \cdot 5 + 0,002 \cdot 8 = 0,192 \text{ в};$$

$$y = y_0 + \Delta y = 2,8 + 0,192 = 2,992 \text{ в};$$

$$\frac{\Delta y}{y_0} 100\% = \frac{0,192}{2,8} 100\% \approx 7\%.$$

Следовательно, под влиянием изменения окружающей среды параметр изменился на 7%.

§ 3.2. Обобщенные и частные параметры радиоэлектронных систем

Как правило, все радиоэлектронные системы строятся по иерархическому принципу. Любая система характеризуется совокупностью параметров. В зависимости от того, какой уровень структуры характеризует параметр, параметры можно разделить на частные и обобщенные. В общем случае, как и структуру системы, параметры можно представить в виде ветвящегося дерева (рис. 3.1).

Для простоты примем, что система состоит из K подсистем, каждая подсистема состоит из m функциональных блоков, и, наконец, каждый функциональный блок состоит из n модулей (эквивалентных каскадов). При таком представлении системы каждый параметр является обобщенным для нижнего уровня и частным для высшего. Следовательно, параметры в зависимости от того, состояние какого уровня системы отражают, могут быть различной степени обобщения. Чем выше уровень, тем выше степень обобщения параметра. Параметром самой высокой степени обобщения является выходной пара-

метр системы, который в некоторых случаях может явиться показателем эффективности системы.

В общем случае каждый элемент отдельного уровня может характеризоваться не одним, а несколькими обобщенными параметрами (например, точностью, быстродействием, стабильностью, чувствительностью и т. д.). От этого иерархическая структура системы параметров не нарушается.

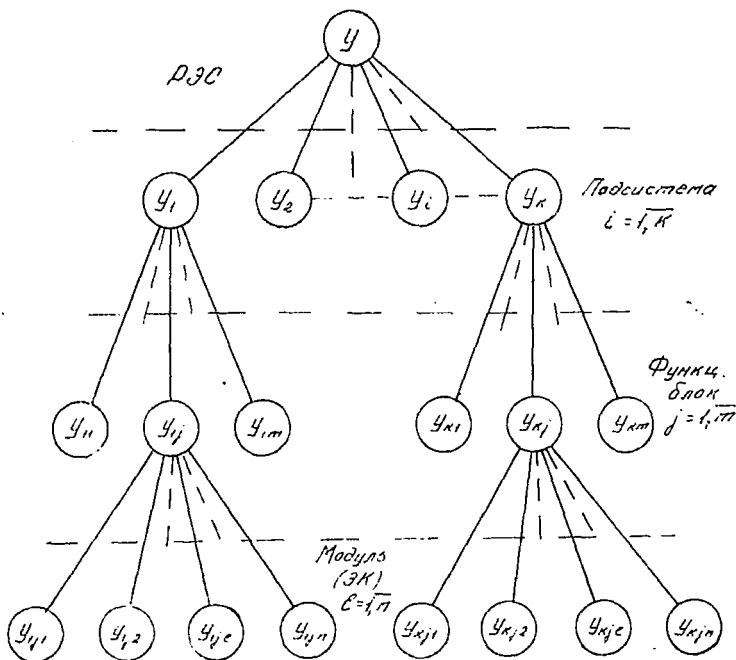


Рис. 3.1

Из представленной графической модели системы параметров нетрудно заметить, что каждый обобщенный параметр Y является функцией обобщенных параметров y_i нижнего уровня, т. е. частных параметров, которыми он определяется

$$Y = Y(y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (3.16)$$

Установление связи между обобщенными и частными параметрами позволяет решать две задачи:

— распределение поля допуска на обобщенный параметр между частными параметрами;

— производить оценку влияния изменения частных параметров на изменение обобщенного.

На самом деле каждая из этих задач является обратной другой.

§ 3.3. Влияние изменений частных параметров на обобщенные

Нестабильность частных параметров системы y_i ($i = \overline{1, n}$) оказывает влияние на стабильность обобщенных параметров высших уровней системы и в конечном счете сказывается на стабильности эффективности системы. С этой точки зрения целесообразным является произвести оценку влияния изменений частных параметров на обобщенные, т. е. рассмотреть возможности решения второй задачи, поставленной в § 3.2.

Степень зависимости обобщенного параметра Y от изменений частных Δy_i в (3.16) определяется чувствительностью Y к Δy_i . Для небольших значений отклонений Δy_i (например, в пределах допусков) выражение (3.16) может быть разложено в ряд Тейлора, при этом не учитывается влияние времени

$$Y(y_1, y_2, \dots, y_n) = Y_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y(\Delta y_1, \dots, \Delta y_n)}{\partial \Delta y_i} \Big|_{\Delta y_i=0} \Delta y_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 Y(\Delta y_1, \dots, \Delta y_n)}{\partial \Delta y_i^2} \Big|_{\Delta y_i=0} \Delta y_i^2 + \dots, \quad (3.17)$$

где $Y_0 = Y(y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0n})$ — номинальное значение обобщенного параметра, определяемое номинальными значениями частных параметров y_{0i} .

Частные производные

$$\begin{aligned}
 Z_i^{(1)} &= \left. \frac{\partial Y(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n)}{\partial \Delta y_1} \right|_{\Delta y_i = 0} \\
 Z_i^{(2)} &= \left. \frac{\partial^2 Y(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n)}{\partial \Delta y_i^2} \right|_{\Delta y_i = 0}; \\
 &\dots \\
 Z_i^{(k)} &= \left. \frac{\partial^{(k)} Y(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n)}{\partial \Delta y_i^{(k)}} \right|_{\Delta y_i = 0}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

являются функциями чувствительности 1, 2, ..., k -го порядка обобщенного параметра Y к отклонению Δy_i i -го параметра. На практике обычно можно ограничиться функцией чувствительности 1-го порядка $Z_i^{(1)}$. В таком случае с учетом обозначения (3.18) выражение (3.17) можно записать в виде

$$Y(y_1, y_2, \dots, y_n) = Y_0 + \sum_{i=1}^n Z_i^{(1)} \Delta y_i. \tag{3.19}$$

Если система состоит из последовательно соединенных элементов, то, очевидно, самому большому изменению будет подвержен параметр y_1 , так как он проходит все последующие элементы, где n преобразуется. То же самое можно сказать об его отклонении Δy_1 . На втором месте будет 2-й параметр и т. д. В таком случае обобщенный параметр будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 Y = Y_0 + \Delta y_1 K_2, \dots, K_n + \Delta y_2 K_3, \dots, K_n + \dots + \\
 + \Delta y_{n-1} K_n + \Delta y_n, \tag{3.20}
 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
 Y = Y_0 + \Delta y_1 \prod_{i=2}^n K_i + \Delta y_2 \prod_{i=3}^n K_i + \dots + \\
 + \Delta y_{n-1} \prod_{i=n-1}^n K_i + \Delta y_n, \tag{3.21}
 \end{aligned}$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — коэффициенты преобразования соответствующих элементов;

$Y_0 = X_0 K_1 K_2 \dots K_n$ — номинальное значение обобщенного параметра.

Если система состоит из параллельно соединенных элементов, то обобщенный параметр Y будет являться суммой частных параметров с соответствующими отклонениями, т. е.

$$Y = Y_0 + \sum_{i=1}^n \Delta y_i, \quad (3.22)$$

где

$$Y_0 = X_0 \sum_{i=1}^n K_i. \quad (3.23)$$

Итак, все реальные системы состоят из совокупности последовательно и параллельно соединенных цепей. Для простоты допустим, что система состоит из l параллельных цепей, каждая из которых состоит из k последовательно соединенных элементов. Очевидно, что

$$l \times k = n. \quad (3.24)$$

Для такого случая обобщенный параметр опишется уравнением

$$Y = Y_0 + \sum_{j=1}^l \left[\Delta y_{j1} \prod_{i=2}^k K_{1i} + \Delta y_{j2} \prod_{i=3}^k K_{1i} + \dots + \Delta y_{jk} + \Delta y_{21} \prod_{i=2}^k K_{2i} + \dots + \Delta y_{2k} + \dots + \Delta y_{l1} \prod_{i=2}^k K_{li} + \Delta y_{l2} \prod_{i=3}^k K_{li} + \dots + \Delta y_{lk-1} K_{lk} + \Delta y_{lk} \right], \quad (3.25)$$

где

$$Y_0 = X_0 \sum_{j=1}^l \prod_{i=1}^k K_{ji}. \quad (3.26)$$

Рассмотренные выражения показывают, что наибольшие изменения претерпевают параметры элементов, на-

ходящихся ближе ко входу системы. С этой точки зрения является целесообразным к первым параметрам (элементам) предъявить наиболее жесткие требования в отношении их стабильности.

Для удобства расчета целесообразно привести изменения всех элементов системы к изменению электрического сигнала.

Г л а в а IV

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЭС ПУТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

§ 4.1. Возможные методы стабилизации параметров

Необходимость стабилизации параметров вызвана поддержанием требуемой эффективности системы. Так как все нарушения в работе системы, как правило, начинаются с первичных параметров, то очевидно, что для поддержания эффективности на заданном уровне нужно прежде всего заставить стабилизировать эти параметры.

Принципиально возможны два пути стабилизации первичных параметров: конструктивные и структурные.

Конструктивные методы связаны с совершенствованием конструкции изделия. К ним можно отнести такие методы, как герметизация, термостатирование, применение системы охлаждения, а также применение качественных элементов с высоко стабильными параметрами.

Конструктивные методы находят все более широкое применение в связи с модулизацией аппаратуры. По сути дела, каждый модуль (функциональная ячейка) можно изготовить в виде отдельной конструктивной единицы, которая при герметизации фактически защищена от влияния влажности, давления, пыли, микроорганизмов, ударов и в некоторой степени от радиации. Несколько затрудняется в этом случае решение вопроса теплообмена элементов, так как он проходит через оболочку модуля. Однако конструктивные методы стабилизации параметров не нейтрализуют влияние таких факторов, как старение t , температура t° и нестабильность питающих напряжений Δu .

С учетом только этих факторов выражение для параметра (3.11) будет иметь вид

$$y'(t, t^{\circ}, p, h, \rho, \Delta u) = y_0 + k_1 t + k_2 t^{\circ} + k_3 \Delta u, \quad (4.1)$$

или

$$y'(t, t^{\circ}, p, h, \rho, \Delta u) = y_0 + \left(\frac{\partial}{\partial t} t + \frac{\partial}{\partial t^{\circ}} t^{\circ} + \frac{\partial}{\partial u} u \right) y(\cdot), \quad (4.2)$$

где $\Delta y' = \left(\frac{\partial}{\partial t} t + \frac{\partial}{\partial t^{\circ}} t^{\circ} + \frac{\partial}{\partial u} u \right) y(\cdot)$ — остаточная

нестабильность.

Зная отдельные веса составляющих ошибки $\Delta y(\cdot)$, можно определить выигрыш в эффективности за счет конструктивных методов стабилизации параметров.

Выигрыш можно оценить:

— по абсолютной величине ошибки

$$\Delta y = y(\cdot) - y'(\cdot) = \left(\frac{\partial}{\partial p} p + \frac{\partial}{\partial h} h + \frac{\partial}{\partial \rho} \rho \right) y(\cdot); \quad (4.3)$$

— по относительной величине ошибки

$$\frac{\Delta y}{y_0} 100\% \text{ и } \frac{\Delta y'}{y_0} 100\%. \quad (4.4)$$

Очевидно, что будет выполняться условие

$$\frac{\Delta y}{y_0} > \frac{\Delta y'}{y_0}. \quad (4.5)$$

Взяв отношение

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\Delta y}{y_0}}{\frac{\Delta y'}{y_0}} &= \frac{\Delta y}{\Delta y'} = \frac{\left(\frac{\partial}{\partial t} t + \frac{\partial}{\partial t^{\circ}} t^{\circ} + \frac{\partial}{\partial p} p + \frac{\partial}{\partial h} h + \frac{\partial}{\partial \rho} \rho + \frac{\partial}{\partial u} u \right)}{\left(\frac{\partial}{\partial t} t + \frac{\partial}{\partial t^{\circ}} t^{\circ} + \frac{\partial}{\partial u} u \right)} = \\ &= 1 + \frac{\frac{\partial}{\partial p} p + \frac{\partial}{\partial h} h + \frac{\partial}{\partial \rho} \rho}{\frac{\partial}{\partial t} t + \frac{\partial}{\partial t^{\circ}} t^{\circ} + \frac{\partial}{\partial u} u}, \quad (4.6) \end{aligned}$$

можно определить, во сколько раз уменьшится неустойчивость параметров за счет применения конструктивных методов стабилизации. Выигрыш, выраженный через весовые коэффициенты, можно оценить выражением

$$1 + \frac{k_3 \Delta p + k_1 \Delta h + k_5 \Delta p}{k_1 \Delta t + k_2 \Delta t' + k_6 \Delta u}. \quad (4.7)$$

Зная уравнение связи эффективности системы с параметрами, также можно найти выигрыш в эффективности

$$\frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, W, Y', t)}{\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, W, Y, t)}, \quad (4.8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Y &= Y(y_1, y_2, \dots, y_n); \\ Y' &= Y(y'_1, y'_2, \dots, y'_n) \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

— обобщенные параметры системы с нестабилизированными и стабилизированными частными параметрами y_1, y_2, \dots, y_n соответственно.

С точки зрения адаптивности системы конструктивные методы стабилизации параметров можно рассматривать как введение некоторых ограничений во взаимодействии системы с окружающим миром с целью повышения ее адаптивности (параметрической и структурной) к оставшимся дестабилизирующим факторам.

Структурные методы стабилизации параметров системы связаны с введением некоторой структурной избыточности в систему. Сюда можно отнести прежде всего методы подстроек и регулировок параметров (ручные и автоматические), автоматические методы стабилизации, применение элементов стабилизации и т. д.

Структурные методы стабилизации можно применять как для нейтрализации возмущений, поступающих через управляющие входы, так и для противодействия другим типам возмущения (внешним, внутренним и т. д.). Этим методам присущи как параметрическая, так и структурная адаптация жесткими или гибкими структурами. Очевидно, что в ближайшее будущее найдут применение инвариантные и различные виды адаптивных систем в ра-

диоэлектронике, что позволит значительно увеличить начальный уровень эффективности системы \mathcal{E}_0 и поддерживать текущую $\mathcal{E}(t)$, близкую к начальной.

Пример 4.1. По данным примера 3.1 определить, как изменится нестабильность параметра $\frac{\Delta y}{\Delta y'}$ и $\frac{\Delta y'}{y_0}$, если в системе применена герметизация и термостатирование узлов и элементов

$$\Delta y' = k_1 t + k_6 \Delta u \approx k_6 \Delta u = 0,007 \cdot 5 = 0,035 \text{ в};$$

$$\frac{\Delta y'}{y_0} = \frac{0,035}{2,8} = 0,125 = 1,25\%;$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta y'} = 1 + \frac{0,157}{0,035} = 1 + 4,5 = 5,5.$$

Следовательно, после термостатирования и герметизации узлов и элементов системы нестабильность параметра уменьшилась с 7% на 1,25%, т. е. в 5,5 раза.

§ 4.2. Методы подстройки параметров

Сохранение эффективности радиоэлектронных систем невозможно без определенного количества регулировок и подстроек параметров в процессе эксплуатации. Это объясняется влиянием рассмотренных ранее факторов на стабильность функционирования. По мере усложнения аппаратуры все чаще приходится прибегать к автоматической подстройке и регулировке параметров. Это связано, с одной стороны, с тем, что на более сложную систему воздействуют факторы (большее количество и с большей интенсивностью), с другой стороны, влияние некоторых факторов настолько быстроменяющееся (случай быстрых флюктуаций), что поддерживать параметр в норме может только автомат. Что касается военной техники, то через управляющие входы системы может поступать большое количество как полезных сигналов, так и помех с переменными характеристиками, что также требует именно тех или иных видов авторегулировок и подстроек.

В качестве иллюстрации того, что с возрастанием сложности радиоэлектронной аппаратуры возрастает и необходимость в автоподстройках, ниже приводится табл. 4.1, из которой видно, как изменяется число автоподстроек в зависимости от класса (сложности) телевизоров [17].

Таблица 4.1

№ п.п.	Наименование регулировок	Класс телевизора		
		1	2	3
1	АПЧГ	О	О	Н
2	Автоматическое вхождение в синхронизацию разверток (кадр. и строчн.)	О	Н	Н
3	Автоматическая регулировка яркости при изменении контрастности	О	О	Н
4	Гашение яркого пятна при выключении	О	О	О
5	Отсутствие искажений звука при включении телевизора до появления изображения	О	О	Н
6	АРУ	О	О	О
7	Раздельная задержка АРУ для УВЧ и УПЧ при шах отношении сигнал/шум и малом $U_{вх}$	О	О	О
8	Независимость работы АРУ от содержания изображения	О	О	О
9	АПЧнФ строчной развертки	О	О	Н
10	Автоматическая регулировка контрастности и яркости в зависимости от внешнего освещения	О	Н	Н
11	Стабилизация размера	О	О	Н

Примечание. О — обязательные;
Н — необязательные регулировки.

В современных радиотехнических системах чаще всего встречаются такие автоподстройки и авторегулировки, как стабилизация и подстройка фаз и частот, автоматическая регулировка усиления, стабилизация источников питания, автоматическая синхронизация разверток в ЭЛТ, автоматическая регулировка яркости и т. д. Рассмотрим некоторые из них.

Автоматическая подстройка частоты и фазы используется во всех радиотехнических системах, в состав которых входят приемники и передатчики. Действие систем автоматической подстройки частоты и фазы (АПЧнФ) направлено на стабилизацию параметров, уход которых вызван нестабильностью работы генераторов высокочастотных колебаний (магнетроны, клистроны и т. д.). Они вызваны к жизни быстрыми уходами параметров за счет влияния как внешних, так и внутренних дестабилизирующих факторов, когда человек не в состоянии поддерживать их вручную.

По принципу действия системы АПЧнФ могут быть абсолютными и разностными.

В абсолютных системах характерным является то, что они поддерживают постоянство величины данного параметра, т. е.

$$\left. \begin{aligned} f_r &= \text{const}; \\ \varphi_r &= \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Функциональная схема таких систем показана на рис. 4.1.

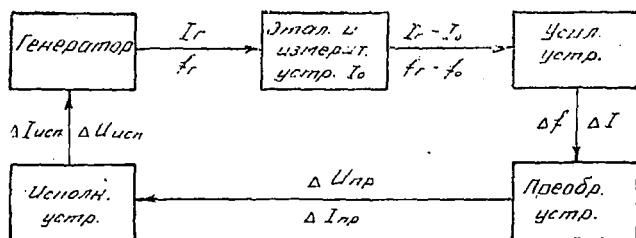


Рис. 4.1

Как видно из схемы, это системы замкнутого типа, которые измеряют непосредственно изменяющийся параметр $\varphi_r (f_r)$ и управляют им таким образом, чтобы он имел номинальное значение. Такая система является системой стабилизации. Характерным для такой системы является то, что информация об эталонной величине $\varphi_0 (f_0)$ заложена в самой системе, чаще всего в виде ко-

лебательной системы одного или другого типа с высокой добротностью. Система срабатывает тогда, когда количество информации, поступающее с регулируемого объекта I_r , не совпадает с количеством информации, заложенной в эталонном устройстве I_0 . Под воздействием разности в количествах информации

$$\Delta I = I_r - I_0 \quad (4.11)$$

срабатывает преобразующее устройство, которое преобразует ΔI с учетом ее знака и величины в соответствующую форму и передает на исполнительное устройство, которое воздействует на управляемый генератор таким образом, чтобы получилось

$$I_r - I_0 = \Delta I = 0. \quad (4.12)$$

Несколько другим является принцип действия систем АПЧ разностного типа. Такие системы изменяют частоту управляемого генератора таким образом, чтобы была постоянна промежуточная частота, равная разности частот двух генераторов (передатчик и гетеродин), т. е.

$$f_r - f_{r0} = \Delta f = \text{const.} \quad (4.13)$$

Функциональная схема такой системы изображена на рис. 4.2.

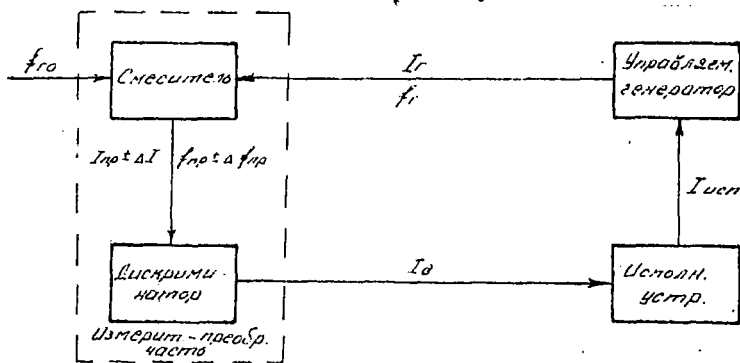


Рис. 4.2

Из схемы видно, что такая система тоже является замкнутой, но в отличие от первой она является следящей системой, так как следит за изменениями эталонного сигнала I_{r0} .

Характерно для такой системы то, что информация эталона заложена не в самой системе, как в первом случае, а поступает извне. Если в первом случае $I_0 = \text{const}$, то в рассматриваемом I_0 может меняться, т. е. $I_0 = \text{var}$. Аналогичные рассуждения относятся и к управляемым генераторам: в первом случае $I_r = \text{const}$, во втором — $I_r = \text{var}$ в зависимости от $I_0 = \text{var}$.

В конечном итоге первый тип системы имеет задачу обеспечить условие (4.12), второй обеспечить условие

$$I_r - I_{r0} = \Delta I = \text{const}. \quad (4.14)$$

Автоматическая регулировка усиления (АРУ) находит широкое применение в радиоприемных устройствах. Как правило, система АРУ и часть приемного устройства образуют замкнутую систему автоматического регулирования, причем элементы АРУ составляют цепь обратной связи (рис. 4.3).

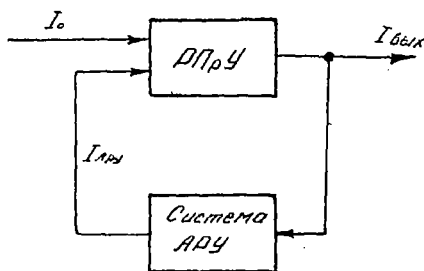


Рис. 4.3

Назначением системы АРУ является поддержание постоянства уровня выходной информации управляемого объекта, т. е.

$$I_{\text{вых}} = \text{const}. \quad (4.15)$$

Эталонная информация I_0 поступает извне и может быть переменной. Следовательно, информация, вырабатываемая системой АРУ, тоже будет переменной, т. е.

$$\begin{aligned} I_0 &= \text{var}, \\ I_{\text{АРУ}} &= \text{var}, \\ I_{\text{вых}} &= \text{const}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Тогда

$$I_{\text{АРУ}} - I_0 = I_{\text{вых}} = \text{const}. \quad (4.17)$$

Следовательно, система АРУ совместно с управляемой частью приемного устройства представляет собой следящую систему, так как регулятор АРУ меняет параметры объекта (приемника), следя за изменениями эталонной (управляющей) информации I_0 .

Существует несколько модификаций систем АРУ: простая, задержанная, усиленно-задержанная, временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ), мгновенная автоматическая регулировка усиления (МАРУ) и т. д. Общее их назначение сводится к поддержанию постоянства уровня выходной информации радиоприемного устройства при влиянии тех или иных факторов, которые вызывают быстрые флюктуации параметров.

В отличие от систем АПЧнФ и АРУ, которые, как правило, включают управляемый объект в свой контур, стабилизаторы источников питания могут быть включены последовательно с объектом управления (параметрические и компенсационные стабилизаторы) (рис. 4.4).

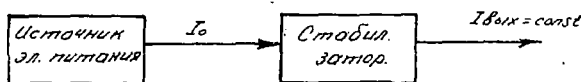


Рис. 4.4

Действие таких устройств сводится не к воздействию на объект, вырабатывающий полезную информацию I_0 , а к воздействию на выходной параметр объекта I_0 путем поддержания его в определенных границах.

Самы стабилизаторы могут быть построены на нелинейных элементах (параметрические стабилизаторы), принцип действия которых основан на нелинейной зависимости выходного параметра от входного, и на замкнутой системе с обратной связью (рис. 4.5).

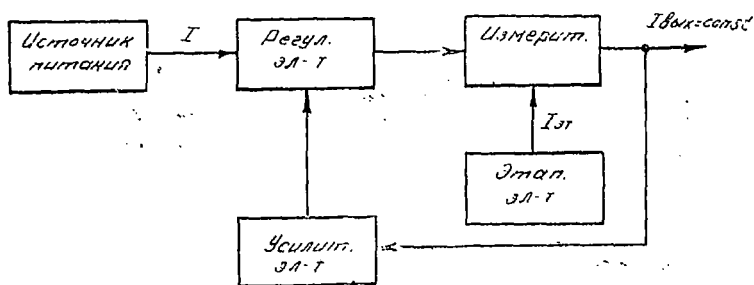


Рис. 4.5

Как видно из схемы, такая система не воздействует непосредственно на объект (источник питания), а на его выходной параметр. Объем эталонной информации, которая должна быть на выходе, т. е.

$$I_{эт} = I_{вых}, \quad (4.18)$$

заложен в самой схеме (обычно в виде некоторого постоянного напряжения питания, подаваемого на электроды ламп стабилизаторов).

Алгоритм работы такой системы

$$I_0 - I_{эт} = \Delta I = 0, \quad (4.19)$$

или

$$I_{вых} = I_{эт} = \text{const.} \quad (4.20)$$

Следовательно, такая система является системой стабилизации. Следует отметить, что существуют также системы стабилизации источников питания, включающие в свой контур сам источник. Такими являются стабилизированные генераторы.

Можно выделить еще целый ряд автоматических регуляторов и стабилизаторов параметров радиоэлектрон-

ной аппаратуры, такие, как регулировка яркости, автоматическая синхронизация, развертка и т. д. Их принцип действия также основан на применении замкнутых систем регулирования.

Если обобщить рассмотренные системы, то можно заметить, что все они являются однотипными с точки зрения теории автоматического регулирования (рис. 4.6).

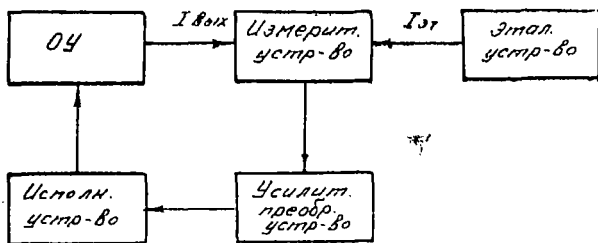


Рис. 4.6

Алгоритм функционирования сводится к поддержанию постоянства величины

$$I_{\text{вых}} - I_{\text{эт}} = \Delta I = \text{const.} \quad (4.21)$$

По месту нахождения эталонного устройства (задающего устройства) и по виду его информации $I_{\text{эт}}$ можно различить:

— системы стабилизации, когда эталонное устройство входит в состав системы управления. Для этого случая характерно, что $I_{\text{эт}} = \text{const}$. Из алгоритма функционирования

$$I_{\text{вых}} - I_{\text{эт}} = \Delta I = \text{const} = 0 \quad (4.22)$$

следует, что необходимо поддерживать также

$$I_{\text{вых}} = \text{const}; \quad (4.23)$$

— следящие системы, когда эталонное устройство не входит в состав системы управления. В этом случае выполняется условие $I_{\text{эт}} = \text{var}$. Из алгоритма функционирования таких систем

$$I_{\text{вых}} - I_{\text{эт}} = \Delta I = \text{const} \neq 0 \quad (4.24)$$

следует, что надо изменять выходную информацию объекта управления в соответствии с изменением эталонной информации $I_{эт}$, т. е. система следит за изменением $I_{эт}$. В таком случае

$$I_{вых} = var. \quad (4.25)$$

Из выражений (4.21)—(4.25) видно, что систему стабилизации можно рассматривать как частный случай следящей системы, когда

$$I_{вых} - I_{эт} = 0. \quad (4.26)$$

Применение устройств рассматриваемых типов, как правило, имеет локальный характер. Их применение связано с определенными расходами. Поэтому возникает задача об оценке степени целесообразности применения систем автоматических подстроек и регулировок, исходя из их влияния на эффективность радиоэлектронных систем.

Исполнительное устройство (см. рис. 4.6) может быть электронного и электромеханического типа. В настоящее время находят применение оба типа. В связи с модулизацией радиоэлектронной аппаратуры область применения исполнительных устройств электромеханического типа чувствительно сужается, поэтому можно определенно сказать, что будущее принадлежит в основном исполнительным устройствам электронного типа.

§ 4.3. Задачи контроля при стабилизации параметров

Автоматическую подстройку и стабилизацию параметров можно производить только для компенсации постепенных отказов системы. С этой точки зрения контроль функционирования и диагностический контроль радиоэлектронной аппаратуры останутся в основном в существующем виде.

Существенное изменение наступит в системе обслуживания аппаратуры, элементом которой является профилактический контроль.

Поскольку контроль неизбежно связан с измерениями, то при автоматической подстройке первичных па-

раметров он несколько вырождается в отношении измерительной аппаратуры. Функции измерительных приборов передаются устройствам, называемым датчиками системы автоматического регулирования (рис. 4.7).

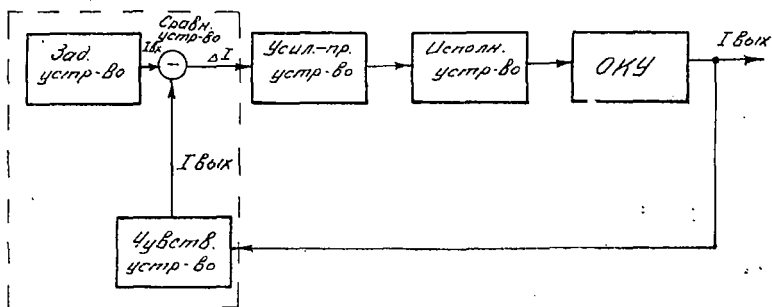


Рис. 4.7

Чувствительные или измерительные устройства системы фиксируют значение выходной информации $I_{\text{вых}}$ и преобразуют ее в вид, удобный для сравнения с управляющей информацией $I_{\text{вх}}$ (для электронной аппаратуры, как правило, в виде электрических сигналов). К ним, как и к измерительным приборам, предъявляются определенные требования в отношении точности и быстродействия. Обычно диапазон измерения чувствительных элементов уже, чем измерительных приборов, а мощность— больше [8].

Устройство сравнения производит функции вычитания двух величин. Это простейшее алгебраическое устройство.

Задающее устройство иногда является чисто условным элементом, так как на практике управляющая информация обычно поступает от предыдущих каскадов и устройств радиоэлектронных систем.

В радиоэлектронных системах, имеющих автоматическую подстройку и стабилизацию параметров, можно осуществлять также визуальный контроль. Для этой цели часть информации системы можно отводить на изме-

рительный стрелочный прибор либо на другие средства отображения информации (световое табло, звуковая сигнализация и т. д.). Если производится стабилизация параметров, то целесообразно информацию «отбирать» с выхода сравнивающего устройства и подавать на «нуль-индикатор». Другим вариантом отображения состояния параметра является «отбор» информации с выхода объекта контроля и управления. Второй способ является более объективным, так как он исключает ошибки из-за неисправности измерительного устройства.

По принципу контроля выходной информации можно проверять также обобщенные параметры системы.

Такая система контроля и подстройки параметров (локальная система) значительно облегчает диагностику неисправностей как при внезапных, так и при необратимых постепенных отказах, а также прогнозирование отказов.

Автоподстройку параметров можно проводить как периодически, во время профилактических мероприятий, так и непрерывно, в процессе эксплуатации. В первом случае система автоподстройки является электромеханическим типом. Она включается только на время обслуживания системы. Достоинствами такой системы являются уменьшение времени обслуживания и простота построения. К недостаткам можно отнести то, что она не увеличивает период профилактики, большой вес и объем из-за наличия электромеханических элементов.

Вторая система (непрерывной подстройки в процессе функционирования) является более совершенной. Ее достоинства заключаются в том, что она:

- поддерживает все время параметр в номинале;
- ее можно сделать чисто электронной, что значительно уменьшает общий вес и объем РЭА;
- дает возможность непрерывно следить за состоянием параметров с точки зрения контроля и облегчает диагностику системы;
- увеличивает период профилактических работ и уменьшает непроизводительный расход ресурса системы;
- сводит к минимуму вмешательство человека в аппаратуру и принимает многие из его функций по обслуживанию.

Самым существенным недостатком такого типа системы автоподстройки является сложность построения алгоритма функционирования. Эта трудность значительно уменьшается с переходом к модулизации систем, когда алфавит модулей в качестве конструктивных узлов чувствительно уменьшится и тем самым уменьшится разнообразие систем автоподстроек.

Чтобы не перегружать операторов систем отображаемой информацией о состояниях всех параметров, последние можно сгруппировать и подводить к пакетным переключателям, которыми коммутируются измеряемые параметры последовательно к измерительным приборам (рис. 4.8).

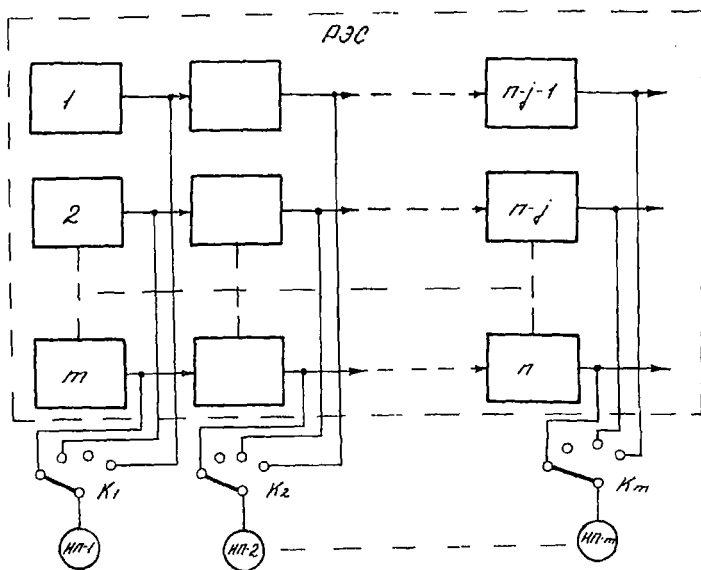


Рис. 4.8

На самих позициях пакетных переключателей нужно наносить значения контролируемого параметра с допус-

ками, что позволит избежать обращения оператора к инструкциям эксплуатации, которыми пользуются в настоящее время (рис. 4.9).

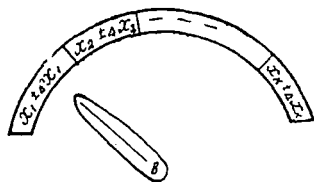


Рис. 4.9

Контроль за состоянием параметров можно производить либо в регламентированном порядке, либо в случайные моменты времени в зависимости «от желания» оператора.

При системах, состоящих из нескольких уровней, к оператору старшего уровня можно подводить информационные средства одного или нескольких обобщенных параметров нижних уровней, по которым он может судить в любой момент времени о состоянии подчиненных ему систем. Результаты этой информации можно использовать также при контроле функционирования системы.

Из рассмотренной постановки задач контроля можно сделать вывод, что с эволюцией системы обслуживания радиоэлектронных систем эволюционирует также контроль системы во всех его аспектах: функционирования, диагностики и профилактики.

Пример 4.2. Имеется радиоэлектронная система, которая обслуживается одним оператором. При контроле системы нужно измерять $n=24$ электрических параметра. Для каждого параметра имеется гнездо на передней панели системы. Все параметры контролируются универсальным, многодиапазонным измерительным прибором (типа АВО). Из опыта эксплуатации известно, что на установление необходимого диапазона прибора необходимы в среднем $t_1=3$ сек, на подключение соответствующего гнезда к прибору $t_2=5$ сек, на снятие отсчета $t_3=8$ сек и на сравнение измеренного значения парамет-

ра с требуемым $t_4=5$ сек. Следовательно, на проверку одного параметра расходуется время

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 21 \text{ сек.}$$

На контроль всех параметров необходимо

$$T = nt = 24 \cdot 21 = 504 \text{ сек} = 8 \text{ мин } 24 \text{ сек,}$$

т. е.

$$T \approx 8,5 \text{ мин.}$$

После модернизации системы все контролируемые параметры подведены к трем восьмисекционным пакетным переключателям, на каждой позиции которых нанесены значение и допуск соответствующего параметра. Общие выводы переключателей связаны с измерительным прибором. Измерения производятся на одном диапазоне прибора.

Расход времени в этом случае следующий:

$$t'_1 = 0 \text{ сек;}$$

$$t'_2 = 2 \text{ сек;}$$

$$t'_3 = 8 \text{ сек;}$$

$$t'_4 = 2 \text{ сек;}$$

$$t' = t'_1 + t'_2 + t'_3 + t'_4 = 12 \text{ сек;}$$

$$T' = nt' = 24 \cdot 12 = 288 \text{ сек} = 4 \text{ мин } 48 \text{ сек,}$$

т. е.

$$T' \approx 5 \text{ мин.}$$

Выигрыш во времени, который получается от внедрения пакетных переключателей, можно оценить из соотношения

$$K_T = \frac{T}{T'} = \frac{8,5}{5} = 1,7 \text{ раза.}$$

Г л а в а V

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ПАРАМЕТРОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РЭС

§ 5.1. Оценка избыточной структуры

Предпосылки высокой стабильности частных и обобщенных параметров, а следовательно, и высокой стабильности эффективности системы следует закладывать на ранних этапах разработки. Из рассмотренных методов стабилизаций и подстроек параметров следует, что они связаны с определенными материальными затратами, т. е. с введением избыточности: структурной, качественной, алгоритмической и т. п. Целесообразной в таком случае является оценка этих затрат на ранних этапах разработки радиоэлектронных систем.

Допустим, что надо разработать радиоэлектронную систему. Согласно [1] первым этапом развития системы будет появление идей создания. На этом этапе следует уточнить, какие функции будет выполнять система, т. е. ее алгоритм функционирования

$$Y(X) = \{\varphi_1(X)\} + \{\varphi_2(Y)\}, \quad (5.1)$$

где X — вектор входных управляющих воздействий;

Y — вектор выходных параметров,

а также комплекс условий (метеорологические, тактические и технические), в которых она будет функционировать: $Z_{мет}$, $Z_{такт}$, $Z_{техн}$, т. е. вектор воздействий всех внешних и внутренних дестабилизирующих факторов

$$Z = Z\{z_{мет}, z_{такт}, z_{техн}\}. \quad (5.2)$$

На основании анализа этих функций и комплекса условий с учетом достижений современной науки и техники составляется тактико-техническое задание на систему, которое включает множество технических параметров и характеристик

$$\{Y_{\text{тр}}\} \geq \{Y_0\}, \quad (5.3)$$

а также характеристики качества

$$\{P_{\text{тр}}\} \geq \{P_0\}, \quad (5.4)$$

которые следует обеспечить при разработке системы, чтобы получить желаемую эффективность \mathcal{E} .

Задаются также средства на построение системы C .

Систему можно представить как структуру S , состоящую из совокупности модулей (эквивалентных каскадов) S_i , т. е.

$$S = S(S_i), \quad i = \overline{1, n}. \quad (5.5)$$

После получения тактико-технического задания и заданной стоимости C на построение системы следует определить основные элементы, от которых зависят в основном, заданные тактико-технические характеристики (антенны, магнетроны, кабели и т. д.) и другие элементы и узлы, которые нельзя выразить через эквивалентный каскад (модуль). Назовем их «нестандартными» с точки зрения модуля. Их стоимость есть сумма стоимостей «нестандартных» элементов:

$$C_{\Sigma \text{ нест}} = \sum_{j=1}^m c_j. \quad (5.6)$$

Из оставшихся средств

$$C_0 = C - C_{\Sigma \text{ нест}}, \quad (5.7)$$

зная стоимость отдельного модуля c_1 , определяют ориентировочно, сколько модулей N_0 можно создать для разработки системы

$$N_0 = \frac{C_0}{c_1}. \quad (5.8)$$

Дальше следует решить, как распределить оптимальным образом наличные модули (эквивалентные каскады) N_0 на структуру, обеспечивающую приблизительно заданные тактико-технические характеристики системы совместно с уже выделенными средствами $C_{\Sigma_{\text{нест}}}$ (модули на минимальную или функционально-необходимую структуру), и на структуру, которая должна обеспечить требуемое качество функционирования и эффективность системы, т. е. на избыточную структуру (резервирование, автоподстройки, контроль и т. д.)

$$N_0 = N_{\text{фн}} + N_{\text{изб}}. \quad (5.9)$$

Из основного уравнения эффективности

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, Y, S, W, t)$$

видно, что эффективность \mathcal{E} является функцией заложеной начальной эффективности \mathcal{E}_0 , выходных параметров системы Y , структуры S и времени t . Все эти аргументы в той или другой степени взаимосвязаны. Особенно ярко выражена зависимость \mathcal{E}_0 и Y от структуры.

Функционально-необходимая структура S_0 не может обеспечить полностью требования тактико-технического задания, особенно, что касается стабильности параметров и эффективности системы. Эффективность связана с функционально-необходимой структурой уравнением

$$S_0 = f_1[\mathcal{E}_{\min}, Y_{\min}, \mathcal{E}_0, Y_0, W], \quad (5.10)$$

где \mathcal{E}_0 и Y_0 — достигнутые наукой и техникой уровни эффективности и параметров соответственно;

\mathcal{E}_{\min} , Y_{\min} — уровни, которые может обеспечить функционально-необходимая структура.

Очевидно, что

$$\mathcal{E}_{\min} < \mathcal{E}_0;$$

$$Y_{\min} < Y_0.$$

Чтобы обеспечить уровень характеристик и эффективности не ниже требуемых, необходимо вводить избыточ-

ную структуру $S_{\text{изб}}$, которая связана с эффективностью и параметрами уравнением

$$S_{\text{изб}} = f_2 [\vartheta_0, Y_0, \vartheta_{\text{тр}} - \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{тр}} - Y_{\text{min}}]. \quad (5.11)$$

Если отнести избыточную структуру $S_{\text{изб}}$ к функционально-необходимой S_0 , т. е. пронормировать $S_{\text{изб}}$ относительно S_0 , получатся

$$\begin{aligned} \frac{S_{\text{изб}}}{S_0} = R &= \frac{f_2 [\vartheta_0, Y_0, \vartheta_{\text{тр}} - \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{тр}} - Y_{\text{min}}]}{f_1 [\vartheta_0, Y_0, \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{min}}]} = \\ &= \varphi [\vartheta_0, Y_0, \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{min}}, \vartheta_{\text{тр}}, Y_{\text{тр}}]. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Следовательно, избыточность зависит от:

- достигнутого уровня науки и техники (от ϑ_0 и Y_0);
- минимальных уровней ϑ_{min} и Y_{min} , которые можно обеспечить функционально-необходимой структурой (от качества модулей);
- требуемых уровней $\vartheta_{\text{тр}}$ и $Y_{\text{тр}}$, которые следует обеспечить в процессе создания системы.

Уравнение (5.12) можно разрешить относительно $\vartheta_{\text{тр}}$ или $Y_{\text{тр}}$. Тогда

$$\vartheta_{\text{тр}} = \varphi^{-1} [\vartheta_0, Y_0, R, \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{min}}, Y_{\text{тр}}], \quad (5.13)$$

т. е. получилось уравнение эффективности, подобное исходному (2.1), но в несколько более расширенном виде.

Чтобы определить ϑ_{max} в зависимости от вводимой избыточности R (от структуры), необходимо исследовать (5.13) на экстремум точными или приближительными методами в зависимости от его конкретного вида

$$\frac{d\vartheta_{\text{тр}}}{dR} = \frac{d\varphi^{-1}[\vartheta_0, Y_0, R, \vartheta_{\text{min}}, Y_{\text{min}}, Y_{\text{тр}}]}{dR}, \quad (5.14)$$

откуда находится оптимальная избыточность R_{opt} , которую нужно вводить для обеспечения ϑ_{max} .

Если полученная таким образом

$$\vartheta_{\text{max}} \geq \vartheta_{\text{тр}}, \quad (5.15)$$

то можно считать, что задача решена, т. е. заданными

средствами C можно обеспечить требуемую эффективность и эквивалентные каскады (модули) N_0 распределены оптимальным образом на $N_{\text{фи}}$ и $N_{\text{изб}}$.

Если

$$\mathcal{E}_{\text{max}} < \mathcal{E}_{\text{тр}}, \quad (5.16)$$

то возможны два случая:

- либо C недостаточно;
- либо N_0 распределены неоптимально.

По этой методике можно решать все разновидности задач, связанные с входящими в уравнение аргументами.

Пример 5.1. Произвести оценку затрат на стабилизацию эффективности создаваемой радиоэлектронной системы третьего уровня сложности. На построение системы дается $C = 250000$ денежных единиц (ден. ед.). Из справочной литературы известно, что на «нестандартную» с точки зрения модулей (эквивалентных каскадов) часть аппаратуры расходуется $C_{\text{нест}} = 50000$ ден. ед. На построение эквивалентных каскадов остается

$$C_0 = C - C_{\text{нест}} = 200000 \text{ ден. ед.}$$

Стоимость одного модуля $c_m = 8$ ден. ед. Следовательно, на средствах C_0 можно построить

$$N_0 = \frac{C_0}{c_m} = 25000 \text{ модулей.}$$

Из анализа статистических данных о структуре прототипов системы спрогнозировано, что на построение функционально-необходимой структуры должны израсходоваться $N_{\text{фи}} = 18000$ модулей. Следовательно, структурная избыточность создаваемой системы будет определяться выражением

$$R = \frac{N_{\text{изб}}}{N_{\text{фи}}} = \frac{N_0 - N_{\text{фи}}}{N_{\text{фи}}} = \frac{7000}{18000} = 0,39.$$

Эта избыточность будет расходоваться на резервирование, средства контроля, на другие средства улучшения качества функционирования. На автоподстройку параметров средств не предусматривается.

§ 5.2. Время и периодичность обслуживания

В зависимости от временных признаков в настоящее время применяются следующие системы профилактического обслуживания [3]:

- календарная система;
- регламентная система;
- комбинированная система.

Сущность календарной системы заключается в том, что она применяется при отказах, обусловленных старением элементов. Это наиболее широко применяемая в настоящее время система обслуживания.

Различают ежедневную, недельную (декадную), месячную, квартальную и т. д. системы обслуживания. Недостаток такой системы обслуживания заключается в том, что она не зависит от наработки системы, что иногда приводит к резкому снижению коэффициента использования системы по назначению

$$K_n = \frac{T}{T + T_{тв} + T_p}, \quad (5.17)$$

где T — время наработки системы между профилактиками;

$T_{тв}$ — время на техническое обслуживание;

T_p — время на ремонт.

Сущность регламентной системы обслуживания состоит в том, что профилактика аппаратуры проводится при наработке радиоэлектронной системы определенного числа часов. Она применяется при отказах износного характера и относится прежде всего к механическим узлам.

Комбинированная система применяется чаще всего, так как факторы износа и старения элементов действуют одновременно. Она не очень удобна для практики, поскольку приходится разрабатывать две отдельные системы, относящиеся к механической и электронной частям радиоэлектронной системы.

Итак, систему технического обслуживания радиоэлектронных систем можно характеризовать в основном двумя величинами:

- временем между профилактиками T ;

та эксплуатации подобных систем, как среднее время проведения профилактических работ.

Для одной системы

$$T_{\text{то}} = \frac{\sum_{k=1}^m T_{\text{то}k}}{m}, \quad (5.28)$$

где $T_{\text{то}k}$ — время проведения профилактических работ при k -м цикле;

m — количество циклов за время жизни (испытания) системы.

С другой стороны,

$$T_{\text{то}k} = \sum_{i=1}^R T_{\text{в}i}, \quad (5.29)$$

где $T_{\text{в}i}$ — время проведения i -й операции при профилактике;

R — количество операций (электрических и механических).

Следовательно,

$$T_{\text{то}} = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^R T_{\text{в}ki}}{m}. \quad (5.30)$$

Если $T_{\text{то}}$ определяется по l системам, то

$$T_{\text{то}} = \frac{\sum_{j=1}^l T_{\text{то}j}}{l} = \frac{\sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^m T_{\text{то}jk}}{lm} = \frac{\sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^R T_{\text{в}jki}}{lm}. \quad (5.31)$$

В общем случае для одного цикла

$$T_{\text{то}} = \sum_{i=1}^R T_{\text{в}i}. \quad (5.32)$$

Параметры системы можно подстраивать как автоматически, так и вручную. Как правило, автоматической подстройке подвергаются наиболее быстроуходящие с

наибольшими весовыми коэффициентами параметры, т. е. первые K параметры из последовательности T'_i — (5.28)

$$T'_1, T'_2, \dots, T'_K, K < n. \quad (5.33)$$

Если K параметры подстраиваются непрерывно во время работы системы, то они не нуждаются в регулировке во время профилактических мероприятий. В таком случае период T' будет определяться наименьшим из времен ухода параметров, не подвергающихся автоподстройке, т. е.

$$T' = T'_{K+1}. \quad (5.34)$$

Для оценки выигрыша в увеличении периода T можно использовать соотношение периодов с системой АПП и без системы АПП

$$\sigma_T = \frac{T'}{T} = \frac{T'_{K+1}}{T'_1}, \quad (5.35)$$

которая зависит от количества параметров K .

Время на техническое обслуживание $T'_{\text{то}}$ также уменьшится в зависимости от количества K

$$T'_{\text{то}} = \sum_{i=1}^{n-K} T_{v_i}. \quad (5.36)$$

В частном случае, если на подстройку всех параметров уходит одинаковое время $T_{v_1} = T_{v_2} = \dots = T_{v_n} = T_v$, то

$$T'_{\text{то}} = (n - K) T_v. \quad (5.37)$$

Тогда выигрыш во времени профилактики $\sigma_{T_{\text{то}}}$ можно оценить соотношением

$$\sigma_{T_{\text{то}}} = \frac{T'_{\text{то}}}{T_{\text{то}}} = \frac{n}{n - K}. \quad (5.38)$$

Таким образом, в зависимости от числа параметров, подстраиваемых автоматически в процессе эксплуатации радиоэлектронной системы, уменьшается производи-

тельный расход ресурса системы, что приводит к увеличению коэффициента использования системы (5.17)

$$K_{II}' = \frac{T'}{T' + T'_{то} + T_p}. \quad (5.39)$$

Из этого выражения следует, что возрастание коэффициента K_{II} происходит за счет увеличения периода профилактики $T_{к-1}$.

Выигрыш можно оценить по двум критериям:

— абсолютному (в процентах)

$$\Delta K_{II} = (K_{II}' - K_{II}) 100\%, \quad (5.40)$$

где

$$T_{об} = T' + T'_{то} + T_p = T + T_{то} + T_p = \text{const}; \quad (5.41)$$

— относительному

$$\sigma_{K_{II}} = \frac{K_{II}'}{K_{II}}. \quad (5.42)$$

Учет диагностических возможностей модели системы обслуживания, представленной на рис. 4.8, приведет к дополнительному увеличению K_{II} .

Пример 5.2. В соответствии с примером 4.2 все $n=24$ параметра системы должны периодически подстраиваться вручную. В результате решения уравнения (5.27) для параметров получена возрастающая последовательность T'_i :

$T'_1 = 14$ ч,	$T'_7 = 18$ ч,	$T'_{13} = 26$ ч,	$T'_{19} = 31$ ч,
$T'_2 = 14$ ч,	$T'_8 = 20$ ч,	$T'_{14} = 27$ ч,	$T'_{20} = 33$ ч,
$T'_3 = 15$ ч,	$T'_9 = 21$ ч,	$T'_{15} = 28$ ч,	$T'_{21} = 35$ ч,
$T'_4 = 16$ ч,	$T'_{10} = 24$ ч,	$T'_{16} = 28$ ч,	$T'_{22} = 35$ ч,
$T'_5 = 18$ ч,	$T'_{11} = 25$ ч,	$T'_{17} = 30$ ч,	$T'_{23} = 36$ ч,
$T'_6 = 18$ ч,	$T'_{12} = 25$ ч,	$T'_{18} = 30$ ч,	$T'_{24} = 38$ ч.

Произвести оценку величины коэффициента использования системы (5.17) K_{II} в течение одного года (300 рабочих дней), если система будет работать 7 часов в день. Известно также, что на ремонт израсходовано $T_p = 200$ ч. На подстройку одного параметра расходуется $T_{p1} = 5$ мин. Произвести оценку выигрыша в K_{II} , если все параметры подстраиваются вручную ($K=0$) и во втором случае, когда $K=10$ параметров подстраиваются автоматически.

В течение одного года система будет работать $T_{\Sigma} = 300 \cdot 7 = 2100$ ч. Из приведенной таблицы видно, что профилактику нужно проводить через $T_I = T'_I = 14$ ч (параметры $T'_{I1} + T'_{I4}$) и через $T_{II} = T'_{II} = 28$ ч (для всех параметров). На один полный цикл профилактики и полезной работы израсходуется время

$$T_{II} = T'_I + \frac{14 \cdot 5}{60} + T'_I + \frac{24 \cdot 5}{60} = 31,2 \text{ ч.}$$

Из них на профилактику уходит

$$T_{то} = 3,2 \text{ ч.}$$

В течение одного года количество таких циклов будет

$$n = \frac{2100}{31,2} \approx 68.$$

Время полезной работы

$$T = 28n = 28 \cdot 68 = 1904 \text{ ч.}$$

Следовательно,

$$K_{II} = \frac{T}{T_{\Sigma}} = \frac{1904}{2100} = 0,905.$$

После автоматизации подстроек $K=10$ параметров период профилактики изменится на

$$T = T'_{II} = 25 \text{ ч.}$$

В таком случае один цикл будет включать

$$T'_ц = T'_{ц1} + \frac{14 \cdot 5}{60} = 25 + 1,2 = 26,2 \text{ ч.}$$

Количество циклов n' будет

$$n' = \frac{2100}{26,2} = 80.$$

Время полезной работы

$$T' = 25 \cdot 80 = 2000 \text{ ч;}$$

$$K'_{ц} = \frac{T'}{T_{\Sigma}} = \frac{2000}{2100} = 0,955.$$

Выигрыш во времени профилактики от автоматизации подстройки $K=10$ параметров можно оценить по выражению

$$\sigma_{T_{то}} = \frac{T_{то}}{T'_{то}} = \frac{24 \cdot 5}{14 \cdot 5} = 1,7 \text{ раза,}$$

что соответствует увеличению $\Delta K_{ц} = 0,05$.

§ 5.3. Оценка численности обслуживающего персонала

Обслуживающий персонал можно условно разделить на две группы:

— операторы, участвующие непосредственно в процессе функционирования системы (операторы сопровождения, наведения и т. д.);

— операторы, обеспечивающие проведение профилактических работ.

Ввиду того, что количество людей в первой группе не зависит от степени автоподстройки параметров, ограничимся оценкой числа обслуживающего персонала второй группы.

Допустим, что согласно (5.30) на профилактическое обслуживание выделяется время $T_{то}$. При этом предполагается, что это время расходуется на электрические настройки параметров. В действительности во время

обслуживания системы производятся также механические работы: чистка, смазка, проверка механических соединений и т. д., на которые расходуется время $T_{\text{мех}}$. Общее время на профилактическое обслуживание T_0 определяется как сумма двух указанных времен:

$$T_0 = T_{\text{то}} + T_{\text{мех}}. \quad (5.43)$$

Предположим, что обслуживание состоит из совокупности элементарных операций: подстройка или регулировка параметра, чистка или смазка механического узла и т. д., на каждую из которых расходуется время t_i ($i = 1, Q+P$),

где Q — количество электрических регулировок и подстроек;

P — количество элементарных механических операций

$$\sum_{i=1}^{P+Q} t_i = T_{\Sigma}. \quad (5.44)$$

Экспериментально можно определить среднее время $t_{\text{ср}}$, необходимое на проведение одной элементарной операции

$$t_{\text{ср}} = \frac{T_{\Sigma}}{P+Q}. \quad (5.45)$$

Оператор средней напряженности за время T_0 может произвести q элементарных операций:

$$q = \frac{T_0}{t_{\text{ср}}}. \quad (5.46)$$

В действительности количество элементарных операций $P+Q$. Следовательно, число операторов определится соотношением

$$L = \frac{P+Q}{q}. \quad (5.47)$$

Если K параметров подстраиваются автоматически во время функционирования, то общее число элементар-

ных операций уменьшится на K и число операторов будет

$$L' = \frac{P + Q - K}{q'} < L. \quad (5.48)$$

Для оценки выигрыша в количестве операторов от автоматической подстройки параметров можно воспользоваться разностным критерием

$$\Delta L = L - L' = \frac{P + Q}{q} - \frac{P + Q - K}{q'}, \quad (5.49)$$

т. е. обслуживающий персонал уменьшается на ΔL человек.

В предельном случае, когда все электрические параметры подстраиваются и регулируются автоматически, будет нужен обслуживающий персонал только для механических работ

$$L = \frac{T_{\text{мех}}}{q_{\text{мех}}}. \quad (5.50)$$

Хотя количество обслуживающего персонала уменьшается при автоматизации подстроек некоторого объема параметров, нельзя сказать, что следует снижать его квалификацию. Это обуславливается тем фактом, что всякая автоматизация подстроек параметров уменьшает вероятность постепенных отказов $P_{\text{п}}(t)$. Но при этом происходит усложнение структуры системы, что со своей стороны влечет за собой увеличение вероятности внезапных отказов $P_{\text{вн}}(t)$. Увеличение $P_{\text{вн}}(t)$ в некоторой степени требует повышения квалификации обслуживающего персонала.

Пример 5.3. Имеется система, в четыре раза сложнее, чем в примерах 2.2 и 4.2. Количество подстраиваемых параметров $Q=96$. Подстройку или регулировку одного параметра можно считать элементарной операцией. Кроме того, при профилактических работах следует производить $P=60$ механических элементарных операций, на каждую из которых уходит время $T_{\text{п2}}=8$ мин.

На обслуживание системы выделяется $\bar{T}_0=4$ ч. Определить численность обслуживающего персонала:

а) при ручной подстройке всех параметров ($K=0$);

б) когда первые $K=40$ параметров подстраиваются автоматически в процессе функционирования системы.

Суммарное время на производство всех элементарных операций

$$T_{\Sigma} = QT_{v1} + PT_{v2} = 96 \cdot 5 + 60 \cdot 8 = 960 \text{ мин.}$$

Среднее время на одной элементарной операции

$$t_{\text{ср}} = \frac{T_{\Sigma}}{P + Q} = \frac{960}{156} \approx 6,1 \text{ мин.}$$

За время T_0 один оператор произведет

$$q = \frac{T_0}{t_{\text{ср}}} = \frac{240}{6,1} \approx 39 \text{ эл. оп.}$$

Необходимая численность операторов будет

$$L = \frac{P + Q}{q} = \frac{156}{39} = 4 \text{ оп.}$$

Во втором случае, когда $K=40$, будем иметь

$$T_{\Sigma} = (Q - K)T_{v1} + PT_{v2} = 56 \cdot 5 + 60 \cdot 8 = 760 \text{ мин.};$$

$$t'_{\text{ср}} = \frac{T_{\Sigma}}{Q - K + P} = \frac{760}{116} = 6,6 \text{ мин.};$$

$$q' = \frac{T_0}{t'_{\text{ср}}} = \frac{240}{6,6} \approx 38 \text{ оп.};$$

$$L' = \frac{P + Q - K}{q'} = \frac{116}{38} \approx 3 \text{ оп.}$$

Из примера видно, что во втором случае численность операторов на одного меньше.

Пример не учитывает те случаи, когда операторы участвуют при функционировании системы, а также ее ремонта. Если число операторов нельзя уменьшать, то можно уменьшить время на профилактику T_0 .

§ 5.4. Стоимостная оценка методов подстройки

Стоимостную оценку методов подстройки параметров можно производить по относительному приращению стоимости системы $\frac{\Delta C}{C}$ за счет стабилизации параметров. При этом ΔC определяет приращение стоимости системы, а C — стоимость производства и эксплуатации системы при отсутствии в ней АПП.

ΔC складывается из:

— приращения стоимости системы ΔC_1 за счет введения избыточности для автоподстроек и контроля параметров;

— приращения стоимости системы ΔC_2 за счет уменьшения времени использования системы не по назначению;

— приращения стоимости системы ΔC_3 за счет уменьшения числа обслуживающего персонала. При этом полагается, что уровень квалификации не меняется.

Следовательно,

$$\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3. \quad (5.51)$$

Стоимость системы C можно рассматривать как сумму

$$C = C_{пр} + C_{то} + C_{оп}, \quad (5.52)$$

где $C_{пр}$ — стоимость производства системы;

$C_{то}$ — стоимость затрат времени на обслуживание;

$C_{оп}$ — стоимость затрат на содержание обслуживающего персонала.

При отсутствии автоматических регулировок в системе стоимость C будет обеспечивать некоторый уровень эффективности $\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t)$, который с течением времени будет уменьшаться на величину $\Delta \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y, W, t)$ за счет изменений параметров Y . Суммарный выходной эффект \mathcal{E}_z за время жизни системы $T_{ж}$ при условии $S = S_0 = \text{const}$ можно определить соотношением

$$\mathcal{E}_z = \int_0^{T_{ж}} \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S, Y(t), W, t) dt. \quad (5.53)$$

Рассмотрим и произведем стоимостную оценку составляющих уравнения (5.51).

Первое слагаемое ΔC_1 зависит от количества избыточной структуры, введенной для стабилизации параметров. Зная количество параметров K , которые подвергаются автоподстройке, из статистических данных или аналитически можно определить, сколько эквивалентных каскадов (модулей) $N_{изб i}$ нужно на построение систем автоподстроек

$$N_{изб} = \sum_{i=1}^K N_{изб i} \quad (5.54)$$

где $N_{изб i}$ — количество эквивалентных каскадов, необходимых на автоподстройку i -го параметра.

Зная стоимость одного эквивалентного каскада c , можно определить величину

$$\Delta C_1 = c N_{изб} = c \sum_{i=1}^K N_{изб i} \quad (5.55)$$

Если на подстройку всех параметров расходуется одинаковое количество модулей

$$N_{изб 1} = N_{изб 2} = \dots = N_{изб K} = N_{изб 0},$$

то

$$\Delta C_1 = c N_{изб 0} K. \quad (5.56)$$

Величину ΔC_2 можно представить двумя составляющими ($\Delta C_2'$ и $\Delta C_2''$):

$$\Delta C_2 = \Delta C_2' + \Delta C_2'', \quad (5.57)$$

где $\Delta C_2'$ — прибыль, которую будет приносить система за счет перераспределения времени на T и $T_{то}$ (за счет увеличения израсходования ресурса по назначению);

$\Delta C_2''$ — сэкономленные средства за счет уменьшения времени $T_{то}$.

$$\Delta C_2' = \alpha (T' - T) c_1 = \alpha (T'_{K+1} - T'_i) c_1 = \alpha \Delta T c_1, \quad (5.58)$$

где ΔT — приращение периода профилактики;

c_1 — стоимость продукции системы за один час функционирования;

α — количество циклов работы и профилактики за время $T_{ж}$.

$$\Delta C_2'' = \alpha (T_{т0} - T'_{т0}) c_2 = \alpha c_2 [NT_{в} - (N - K) T_{в}] = \\ = \alpha K T_{в} c_2, \quad (5.59)$$

где c_2 — стоимость одного часа профилактических мероприятий.

$$\Delta C_2 = \alpha (\Delta T c_1 + K T_{в} c_2). \quad (5.60)$$

Третье слагаемое выражения ΔC_3 определяет экономленные средства на содержание уменьшенного числа обслуживающего персонала за время $T_{ж}$

$$\Delta C_3 = \frac{T_{ж}}{T_{мес}} c_3 (L - L') = \frac{T_{ж}}{T_{мес}} c_3 \frac{K}{q}, \quad (5.61)$$

где $T_{мес}$ — время (часы) одного месяца;

c_3 — заработная плата оператора за месяц.

Суммарные перерасходы на автоматической стабилизации K параметров будут равны:

$$\Delta C = c N_{изб0} K - \alpha (\Delta T c_1 + K T_{в} c_2) - \frac{T_{ж}}{T_{мес}} c_3 \frac{K}{q}. \quad (5.62)$$

Второе и третье слагаемые берутся со знаком минус из физических соображений

$$\Delta C = - \alpha \Delta T c_1 + K \left(c N_{изб0} - \alpha T_{в} c_2 - \frac{T_{ж}}{T_{мес}} c_3 \frac{1}{q} \right). \quad (5.63)$$

При таких затратах на автоподстройки параметров следовало бы получить эффективность более высокой стабильности, близкой к постоянной, т. е.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S_0, Y_0, W, t) \approx \text{const.} \quad (5.64)$$

В таком случае суммарный выходной эффект системы будем определять как

$$\mathcal{E}'_{\Sigma} = \int_0^{T_{ж}} \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S_0, Y_0, W, t) dt = \mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S_0, Y_0, W, T_{ж}). \quad (5.65)$$

Задаваясь в виде ограничения

$$\mathcal{E}(\mathcal{E}_0, S_0, Y_0, W, T_{ж}) = \text{const}, \quad (5.66)$$

можно решить уравнение (5.61) относительно K таким образом, чтобы получить

$$\Delta C = \min \text{ при } \Delta C > 0$$

либо

$$\Delta C = \max \text{ при } \Delta C < 0. \quad (5.67)$$

Пример 5.4. Имеется радиоэлектронная система, которая описывается в примерах 5.1—5.3. Известно, что на создание схемы автоподстройки расходуется в среднем $N_{\text{АПП}} = 6$ эквивалентных каскадов. Время жизни системы $T_{ж} = 8$ тыс. ч. Стоимость продукции системы за 1 ч работы $c_1 = 60$ ден. ед. Стоимость одного часа профилактики $c_2 = 20$ ден. ед. В месяц система функционирует $T_{\text{мес}} = 175$ ч (25 дней по 7 часов). Заработная плата одного оператора в течение месяца составляет $c_3 = 150$ ден. ед. Оценить относительные затраты $\frac{\Delta C}{C}$ на автоматизацию автоподстроек $K = 40$ параметров.

Решение

$$\Delta C_1 = K N_{\text{АПП}} c = 40 \cdot 6 \cdot 8 = 1920 \text{ ден. ед.}$$

$$\Delta C_2 = \Delta C_2' + \Delta C_2''.$$

При ручной подстройке параметров время полезного функционирования системы будет определяться следующим образом:

$$n = \frac{8000}{31,2} = 255 \text{ циклов;}$$

$$T = 28 \cdot 255 = 7140 \text{ ч.}$$

При автоматической подстройке части параметров

$$n' = \frac{8000}{26,2} = 302 \text{ цикла;}$$

$$T' = 25 \cdot 302 = 7550 \text{ ч;}$$

$$\Delta C_2' = (T' - T) c_1 = 410 \cdot 60 = 24600 \text{ ден. ед.}$$

Выигрыш от уменьшения времени профилактики определится как разность стоимостей обоих случаев (5.57):

$$\Delta C_{\text{пр}} = n T_{\text{то}} c_2 = 255 \cdot 3,2 \cdot 20;$$

$$\Delta C_{\text{пр}}' = n' T_{\text{то}}' c_2 = 302 \cdot 1,2 \cdot 20;$$

$$\Delta C_2'' = \Delta C_{\text{пр}} - \Delta C_{\text{пр}}' = 9120 \text{ ден. ед.};$$

$$\Delta C_2 = 24600 + 9120 = 33720 \text{ ден. ед.};$$

$$\Delta C_2 = 33720 \text{ ден. ед.}$$

$$\Delta C_3 = \frac{T_{\text{ж}}}{T_{\text{мес}}} c_3 (L - L') = \frac{8000}{175} \cdot 150 \cdot 1 \approx 6860 \text{ ден. ед.}$$

$$\begin{aligned} \Delta C &= -\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 = -1920 + 33720 + 6860 = \\ &= 38660 \text{ ден. ед.} \end{aligned}$$

Из примера можно сделать вывод, что автоматизация подстройки параметров экономически выгодна. Другими словами, ценою затрат $\frac{\Delta C_1}{C} 100\% = 0,77\%$ получается

выигрыш $\frac{\Delta C_2 + \Delta C_3}{C} 100\% \approx 16\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена вопросам стабилизации эффективности радиоэлектронных систем. При этом эффективность системы рассматривалась как функция структуры и окружающей среды, основное воздействие которой сводится к изменению параметров системы.

В работе предложена классификация радиоэлектронных систем по критерию сложности (количество составных элементов и выполняемой системой задачи). Показано, что каждому уровню сложности соответствует ограниченный круг задач, которые могут быть решены, а также своя система обслуживания.

Проведен анализ дестабилизирующих факторов, их сущность и влияние на систему и предложена классификация этих факторов.

Исходя из того, что первым признаком снижения эффективности является изменение параметров, рассмотрены некоторые методы (существующие и перспективные) стабилизации частных параметров с целью стабилизации обобщенных, а следовательно, и эффективности радиоэлектронных систем.

В работе предложена методика оценки затрат на стабилизацию параметров и эффективности систем, которая выражается в оценках избыточной структуры, времени обслуживания, численности обслуживающего персонала, материальных затрат на автоподстройку и стабилизацию.

Предлагаемая работа является первым шагом к более глубокому анализу влияния тех или других деста-

близирующих факторов на работу радиоэлектронных систем, а также анализу возможных методов стабилизации эффективности и синтезу систем, имеющих стабильную эффективность за время эксплуатации.

Авторы будут благодарны, если читатели отнесутся критически к работе и выразят свои замечания и рекомендации относительно формы и содержания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Широков. Оценка качества радиоэлектронных систем на ранних этапах разработки. Минск, 1970.
2. А. М. Широков. Основы надежности и эксплуатации электронной аппаратуры. Минск, «Наука и техника», 1965.
3. Н. А. Шишонюк. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Советское радио», 1964.
4. Н. П. Бусленко. Моделирование сложных систем. М., «Наука», 1968.
5. В. И. Ничипоренко. Структурный анализ и методы построения надежных систем. М., «Советское радио», 1968.
6. А. С. Кравец. Вероятность и системы. Воронеж, 1970.
7. Е. А. Санковский, Г. Г. Сигалов. Основы автоматического управления, кн. 1 и 2. Минск, 1968.
8. Техническая кибернетика, под ред. В. В. Солодовникова, кн. 1 и 2. М., «Машиностроение», 1967.
9. Б. С. Флейшман. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М., «Советское радио», 1971.
10. Л. А. Растрингн. Статистические методы поиска. М., «Наука», 1968.
11. В. А. Мищенко. Теория селективирующих функций и ее применение к нелинейным задачам контроля и управления. Минск, 1971.
12. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
13. В. С. Пугачев. Теория случайных функций. М., Физматгиз, 1962.
14. М. Б. Игнатьев. О совместном использовании принципов введения избыточности и обратной связи для построения устойчивых систем. Труды III Всесоюзного совещания по автоматическому управлению (Одесса, 1965 г.). М., «Наука», 1968.
15. Г. С. Бритов, М. Б. Игнатьев [и др.]. Гибкие структуры с избыточностью. В сб.: «Использование избыточности в информационных системах». Л., «Наука», 1970.

16. Г. С. Бритов, М. Б. Игнатьев. К построению общего решения систем с неопределенностью, когда число переменных больше числа уравнений связи. Труды ЦИАП, вып. 48. Л., 1966.

17. С. А. Ельяшкевич. Автоматическое управление в телевизорах. М., «Энергия», 1968.

18. М. Б. Игнатьев. Об одной модели процесса развития в сложных системах. В сб.: «Прикладные задачи технической кибернетики». М., «Советское радио», 1966.

19. А. В. Астафьев. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М.-Л., «Энергия», 1965.

20. Росс Эшби У. Введение в кибернетику. М., ИЛ, 1959.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Классификация радиоэлектронных систем по сложности	
§ 1.1. Определение сложности радиоэлектронных систем	7
§ 1.2. Определение возможных уровней сложности РЭС	9
§ 1.3. Уровни сложности и система обслуживания	12
Глава II. Дegradaция радиоэлектронных систем	
§ 2.1. Дестабилизирующие факторы и их влияние на радиоэлектронную систему	18
§ 2.2. Дegradaция радиоэлектронной системы	20
§ 2.3. Возможные методы стабилизации эффективности	26
§ 2.4. Методы стабилизации эффективности системам автоматического регулирования	31
Глава III. Дестабилизация параметров радиоэлектронных систем	
§ 3.1. Причины изменения параметров систем	41
§ 3.2. Обобщенные и частные параметры радиоэлектронных систем	46
§ 3.3. Влияние изменений частных параметров на обобщенные	48
Глава IV. Стабилизация эффективности РЭС путем стабилизации ее параметров	
§ 4.1. Возможные методы стабилизации параметров	52
§ 4.2. Методы подстройки параметров	55
§ 4.3. Задачи контроля при стабилизации параметров	63
Глава V. Оценка затрат на стабилизацию параметров и эффективности РЭС	
§ 5.1. Оценка избыточной структуры	69
§ 5.2. Время и периодичность обслуживания	74
§ 5.3. Оценка численности обслуживающего персонала	82
§ 5.4. Стоимостная оценка методов подстройки	86
Заключение	91
Литература	93

Христо Харалампиев Христов
Владимир Сергеевич Панчиков

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Редактор Андрейчикова Г. А. Корректор Скуратович Е. В.

Г—857011. Сдано в набор 10/III 1973 г. Подп. к печ. 21/III 1973 г.
Формат 60×42¹/₁₆. Печ. л. 6. Зак. 37.

Бесплатно

44657 Д4

955