

Р. М. Туркельтауб

**Методы исследования
точности и надёжности схем
аппаратуры**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
Р11

Р11 **Р. М. Туркельгауб**
Методы исследования точности и надёжности схем аппаратуры / Р. М. Туркельгауб – М.: Книга по Требованию, 2013. – 161 с.

ISBN 978-5-458-29229-0

ISBN 978-5-458-29229-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Глава седьмая

Повышение надежности аппаратуры при проектировании	134
7-1. Проектирование — основа решения проблемы надежности	134
7-2. Подготовительный этап	136
7-3. Расчетно-конструкторский этап	138
7-4. Резервирование — средство повышения надежности	142
7-5. Испытания аппаратуры	150
7-6. Техническое обслуживание аппаратуры	152
7-7. Комплексный план повышения надежности	156
Литература	157

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние два-три десятилетия бурный прогресс наблюдается во всех областях техники. С помощью устройств и систем, применяемых в современной технике, решаются все более и более трудные задачи. Это приводит к существенному усложнению устройств и систем. Современные машины и аппараты, автоматические линии и станции, станки и автоматы — это сложные системы. Они состоят из сотен и тысяч различных элементов, взаимодействующих в процессе работы. Неисправная работа или поломка одного элемента системы может привести к отказу всей системы, потере времени на восстановление и большому материальному ущербу.

Такое положение выдвинуло на первое место требование обеспечения повышенной надежности технических устройств и в корне изменило понятие об их качестве. Показатель надежности стал основным критерием качества работы технических устройств, а разрешение проблемы обеспечения надежности стало одним из основных направлений инженерной деятельности.

Так возникла новая наука о надежности. Теория надежности находится еще в стадии формирования и становления, отдельные ее разделы еще разрабатываются. Большинство опубликованных работ посвящено теории надежности радиоэлектронной аппаратуры, но имеется небольшое число работ и по надежности механических систем.

В настоящее время в СССР и за границей опубликовано значительное количество работ по исследованию надежности элементов и систем при внезапных отказах. Имеются отдельные работы по исследованию надежности систем при постепенных отказах элементов. Вопросы теории надежности и расчета систем при постепенных

отказах, современные методы расчета надежности систем с использованием вычислительных машин и связь теории точности и надежности освещены в литературе недостаточно. С этой точки зрения книга Р. М. Туркельтауба в известной мере восполняет имеющийся пробел.

Книга посвящена исследованию схем электронной аппаратуры и состоит из семи глав.

В гл. 1 рассмотрены методы анализа точности схем. Даны характеристики методов, их преимущества, недостатки и возможности их применения в инженерной практике.

В гл. 2 систематизированы основные вопросы теории надежности при внезапных отказах, изложены вопросы оценки надежности систем с функциональной избыточностью и при потоках отказов с ограниченным последствием.

В гл. 3 и 4 рассмотрены основные теоретические и практические методы исследования надежности схем при постепенных отказах — параметрической надежности. Методы исследования надежности базируются на применении моделирующих вычислительных машин.

В гл. 5 рассмотрены основные теоретические вопросы и даны практические методы исследования точности и надежности схем аппаратуры при внезапных и постепенных отказах методом статистических испытаний.

В гл. 6 изложены некоторые вопросы синтеза схем по заданным критериям точности и параметрической надежности.

В гл. 7 освещены основные пути повышения надежности на этапах проектирования.

Книга охватывает достаточно широкий круг вопросов, при этом автор обратил особое внимание на анализ надежности при постепенных отказах.

В книге имеются оригинальные разделы, которые являются разработками автора. К их числу относятся: анализ и систематизация методов расчета точности, оценка надежности с функциональной избыточностью — квазирезервирование, анализ точности и параметрической надежности методами моделирования и статистических испытаний, некоторые вопросы синтеза схем и т. д. Среди всех вопросов особый интерес представляет метод оценки параметрической надежности с по-

мощью статистических испытаний, который является теоретически обоснованным и доступным для практического применения.

Метод вычисления многомерного закона распределения сложного случайного процесса по известным законам распределения составляющих случайных процессов и функции их связи, разработанный автором, может найти применение и в других областях техники.

Материал книги изложен достаточно четко, стройно и доступно. Автор пользуется понятиями и определениями, приведенными в общепринятой терминологии надежности АН СССР. Вместе с тем введены и определены некоторые новые термины, например параметрическая надежность, точность, погрешность, которые могут дополнить эту терминологию. В начале каждой главы излагается постановка вопроса и рассматриваемые задачи. Значительное количество разделов и методов иллюстрируется примерами.

Все вышеизложенное определяет достоинства и полезность книги.

Книга рассчитана на научных работников и инженеров и несомненно будет способствовать внедрению методов анализа точности и надежности аппаратуры на этапах проектирования.

В. И. Сифоров

ВВЕДЕНИЕ

Электронная аппаратура решает в настоящее время большое число практически важных задач в различных областях деятельности человека и несомненно должна отвечать требованиям, которые предъявляет к ней современная техника. Эти требования распространяются на все характеристики аппаратуры, в том числе и на характеристики точности и надежности.

Однако выбор рациональных путей построения аппаратуры, гарантирующий заданные характеристики точности и надежности при проектировании, является достаточно трудной задачей. Эта задача успешно решается только при наличии строгих инженерных методов количественной оценки указанных характеристик. Этим объясняется возросший за последние годы интерес к разработке методов исследования точности и надежности схем электронной аппаратуры.

Теории точности электронной аппаратуры в настоящее время посвящен ряд работ. Каждая работа, как правило, освещает один из методов расчета точности. Широко известные методы расчета точности схем имеют существенные недостатки, а некоторые из них в ряде случаев дают неудовлетворительные результаты. Анализ применимости различных методов при проектировании аппаратуры, как правило, отсутствует.

Вопросы теории надежности при внезапных отказах описаны в литературе достаточно полно. Однако специфика проектирования и вопросы избыточности параметров освещены недостаточно.

Методы исследования надежности при постепенных отказах еще недостаточно широко изучены. Поэтому в инженерной практике оценка точности и надежности

при постепенных отказах проводится либо без достаточных теоретических обоснований, либо экспериментально.

Недостатком такого подхода в первом случае является значительное усложнение схем, во втором — резкое возрастание затрат на отработку аппаратуры.

Ощущается потребность в пособии, которое наряду с изложением основных теоретических вопросов дало бы инженеру практически реализуемые и достаточно строгие методы анализа точности и надежности схем.

При решении этой задачи за основу был принят наиболее современный путь анализа схем методом статистических испытаний (Монте-Карло). При этом рассмотрены и другие применяемые в практике методы исследования. Указаны их преимущества, недостатки и условия применимости.

Книга составлена по материалам, которые были специально проверены и использованы при разработке схем. Часть материала может быть известна читателям по литературе, перечень которой приведен в книге. Некоторые разделы книги являются оригинальными.

Круг рассматриваемых вопросов является весьма широким, поэтому представленный материал не претендует на исчерпывающую полноту. Однако основным идеям решения поставленных задач проектирования аппаратуры уделено достаточное внимание.

При анализе точности и надежности нам приходится изучать случайные события и процессы, протекающие в аппаратуре. Поэтому основным аппаратом математического анализа являются теории случайных событий, процессов и массового обслуживания, а также математическая статистика. Учитывая наличие систематических курсов по этим вопросам и современную подготовку инженеров, представляется целесообразным не приводить в книге разделы этих дисциплин.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СХЕМ АППАРАТУРЫ

1-1. О ТОЧНОСТИ СХЕМ АППАРАТУРЫ

Современная электронная аппаратура в большинстве случаев состоит из сложных схем со значительным количеством деталей (элементов).

Системой (аппаратурой) называют совокупность совместно действующих объектов, предназначенных для самостоятельного выполнения заданных функций [Л. 32].

Элементом называют часть системы, предназначенную для выполнения заданных функций.

Параметры аппаратуры и элементов обычно имеют отклонения от номинальных данных. Эти отклонения называются погрешностями. Погрешности образуются за счет различных факторов, действующих в процессе серийного производства и эксплуатации, и характеризуют точность параметров аппаратуры и элементов.

Для нормального функционирования аппаратуры необходимо, чтобы ее параметры находились в определенных пределах — допусках, т. е. чтобы погрешности были меньше (или равны) некоторой установленной величины — поля допуска.

Изменение параметра внутри поля допуска будем считать разрешенным событием. Выход параметра за пределы поля допуска приводит к нарушению нормального функционирования аппаратуры — ухудшает качество ее работы или приводит к полной потере работоспособности. Поэтому это событие является нежелательным — запрещенным.

Величина поля допуска задается техническими условиями и определяется допустимыми с точки зрения работоспособности отклонениями параметров аппаратуры или элементов.

Рассмотрим производственный, лабораторный и эксплуатационный допуски.

Производственным допуском называют пределы, в которых должен находиться параметр при изготовлении аппаратуры или элемента. Этот допуск определяет требуемую точность процесса производства — технологию, сборку, правила регулировки, точность контрольно-измерительной аппаратуры, а также взаимозаменяемость и серийность.

Лабораторным допуском называют пределы, в которых должен находиться параметр аппаратуры при действии климатических или механических факторов в процессе лабораторных испытаний аппаратуры.

Эксплуатационным допуском называют пределы, в которых должен находиться параметр аппаратуры или элемента в процессе эксплуатации. Этот допуск характеризует возможное изменение качества функционирования и нормы технического обслуживания.

Параметры схем аппаратуры связаны с параметрами элементов уравнением

$$\varphi = L(x_1, x_2, \dots, x_k; q_s), \quad (1-1)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_k$ — параметры элементов, определяющие состояние схемы;

q_s — входное возмущение;

L — оператор, т. е. закон соответствия между множествами φ и q_s .

В ряде случаев входные возмущения $q_s = 1$. Тогда формула (1-1) запишется в виде

$$\varphi = G(x_1, x_2, \dots, x_R), \quad (1-2)$$

где $G(x_j)$ — функция, определяющая связь параметров схемы и элементов.

Следовательно, погрешность параметра схемы определяется погрешностями параметров элементов и видом функции связи.

Для нормального функционирования аппаратуры необходимо выбрать допуски на элементы так, чтобы по-

грешность параметра схемы была бы меньше его поля допуска.

Определение возможных погрешностей параметра схемы при заданных допусках на параметры элементов составляет задачу анализа точности.

Определение допусков на параметры элементов по заданному допуску на параметр схемы составляет задачу синтеза схем по заданной точности ее параметра.

Таким образом, при проектировании аппаратуры необходимо установить определенное соответствие между допусками на параметры схем и элементов. Отсутствие этого соответствия приводит к излишнему ужесточению допусков на параметры элементов или к невозможности получить необходимую точность параметра схем без дополнительной регулировки или подгонки.

Анализ точности параметров радиоэлектронной аппаратуры может быть проведен расчетным или экспериментальным путем. При этом различают следующие методы исследования точности:

- 1) метод наихудшего случая;
- 2) метод граничных испытаний;
- 3) метод моментов;
- 4) метод натуральных испытаний;
- 5) метод статистических испытаний (Монте-Карло).

Для исследования схем расчетным путем необходимо, чтобы изменения параметров элементов были заданы. При этом некоторые методы исследования могут быть применены только при совершенно определенных законах распределения параметров элементов, например метод моментов. Для применения других методов необходимо только априорное знание этих законов, распределение при этом может быть произвольным, например, метод Монте-Карло.

Поэтому, прежде чем перейти к изложению методов исследования точности параметров схем, коротко рассмотрим вопрос о законе распределения параметров элементов.

1-2. О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Погрешности параметров элементов зависят от различных факторов, действующих как в процессе серийного производства, так и в эксплуатации. Влияние этих

факторов на элементы весьма разнообразно [Л. 2]. Некоторые из них влияют на параметры элементов случайным образом, другие создают детерминированное отклонение параметра. В результате этих воздействий погрешности параметров элементов меняются случайным образом от экземпляра к экземпляру, от партии к партии, от типа к типу и т. д.

Следовательно, параметры элементов являются случайными величинами и их характеристики могут быть заданы только статистически. Обычно они задаются в виде плотностей вероятности или моментов

$$m^l(x_j) = \int x_j^l f(x_j) dx_j, \quad (1-3)$$

где x_j — параметр элемента;

$m^l(x_j)$ — момент l -го порядка;

$f(x_j)$ — плотность вероятности.

Достаточно большой статистический материал показывает, что производственные погрешности параметров элементов имеют нормальный закон распределения.

Если обозначить величину параметра элемента через x , то его значение может быть представлено в виде

$$x = \bar{x} + \Delta x, \quad (1-4)$$

где $\bar{x}$ — номинальное значение параметра;

Δx — случайное отклонение параметра от номинального значения.

Применяя операцию математического ожидания и дисперсии к выражению (1-4), получим:

$$\left. \begin{aligned} m(x) &= \bar{x}; \\ \sigma^2(x) &= \sigma^2(\Delta x). \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

Обычно производственное поле допуска на параметр элемента C задается в процентах от номинала и соответствует вероятности 0,997. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} 3\sigma(x) &= \frac{\bar{x}C}{100} \\ \sigma(x) &= \frac{\bar{x}C}{300} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

или

В ряде работ показано [Л. 16], что погрешности параметров элементов, возникающие за счет действия от-