

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Общая характеристика параметров, системные методы в конструировании и технологии РЭС

Методические указания

При изучении учебного материала этого раздела необходимо понять, что качество РЭУ – это многогранное свойство. Для описания тех или иных сторон этого свойства пригодны единичные показатели. Слово «единичный» означает, что показатель даёт представление о каком-то одном свойстве, например стоимости. Следует понять, что комплексный показатель надёжности одновременно даёт представление о двух и более свойствах, определяющих качество РЭУ. В большинстве случаев комплексный показатель качества (обозначим как K) является математическим выражением, построенным из единичных показателей, и не имеет конкретного физического смысла, например

$$K = \sum_{i=1}^m \alpha_i k_i, \quad (1)$$

где m - число единичных показателей, принятых во внимание;

α_i – коэффициент, показывающий вес (важность, значимость) i -го единичного показателя для данного вида РЭУ;

k_i - значение единичного показателя качества.

Для того чтобы воспользоваться выражением (1), значения k_i должны быть подставлены в нормированном безразмерном исчислении. На практике распространена нормировка, при которой диапазон реальных значений k_i переносится на отрезок $(0...1)$. Причем единица соответствует лучшему случаю, а нуль – худшему с точки зрения функционирования и потребительских свойств РЭУ. Поэтому необходимо осмыслить первую формулу выражений (1.12) в [1, с. 13].

Следует также понять, что конструкции и технологические процессы РЭС проявляют признаки систем. Поэтому для их проектирования эффективен подход, который применяют для проектирования систем вообще. Проектируемое устройство или технологический процесс рассматривается как система, состоящая из составных частей (подсистем). В то же время эта система входит как часть в состав более сложной системы (суперсистемы). В качестве суперсистемы для конструкций РЭС могут выступать, например, конструктивные единицы более высокого уровня и внешняя среда (рис. 1).

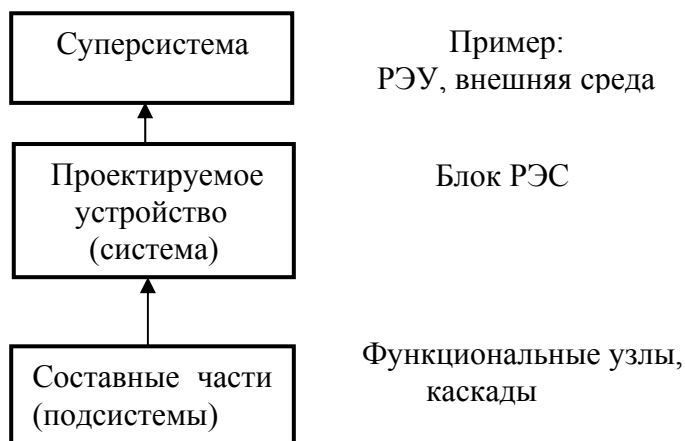


Рис. 1. Упрощенная схема связи проектируемой системы с подсистемой и суперсистемой

При изучении системного подхода необходимо иметь в виду, что он предполагает (применительно к проектированию конструкций РЭС) следующее:

- ♦ рассмотрение альтернативных путей получения сопоставимых вариантов; это в первую очередь касается выбора компоновочных схем, материалов, комплектующих элементов, энергетических источников;

- ♦ количественную оценку комплексного показателя качества конструкции с учетом ве-

совых коэффициентов единичных показателей, указанных заказчиком;

- ♦ использование моделей и имитаций для исследования конструкторских решений, а не сборку и исследование реальных устройств;

- ♦ применение вероятностно-статистических методов для оценки тех решений, на результат которых оказывают влияние случайные параметры;

- ♦ использование при выборе и оценке решения современного математического аппарата и ЭВМ.

Основными литературными источниками для изучения системного подхода являются [1, 3, 4].

Контрольные вопросы

1. В чём состоит смысл выходных и первичных параметров?
2. Как соотносятся понятия «внутренние и внешние параметры РЭУ», широко используемые при автоматизированном проектировании, с понятием «первичные параметры»?
3. Какие выводы можно сделать о конструкции РЭУ и её составных частях с помощью коэффициентов заполнения по массе, объёму, площади?
4. Как при проектировании РЭУ использовать коэффициенты увеличения по объёму, площади, массе?
5. Что можно сказать о качестве РЭУ с помощью единичных и комплексных показателей качества?
6. Как при оценке уровня качества РЭУ можно учесть единичные показатели, не имеющие явно выраженной количественной меры, например художественное оформление (дизайн)?
7. В чём состоят сущность и содержание системного подхода к проектированию конструкций РЭУ (технологических процессов)?

Раздел 2. Вероятностное описание параметров в конструировании и технологии РЭУ

Методические указания

Начиная изучение учебного материала данного раздела, рекомендуется из курса «Теория вероятностей и математическая статистика» вспомнить такие понятия, как случайные величины, функция распределения и плотность распределения случайных величин, вероятность попадания случайной величины на заданный участок (диапазон), числовые характеристики случайной величины: математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение. Рекомендуется также повторить темы: нормальный закон распределения и определение законов распределения на основе опытных данных. В последнем случае особое внимание нужно обратить на порядок построения гистограмм и статистических функций распределения случайных величин, а также выравнивание статистических рядов, проверку гипотез о законах распределения с помощью критериев согласия. В качестве общей литературы по указанным вопросам рекомендуется [10], в [1, 3, 4] эти вопросы рассмотрены применительно к РЭУ и элементам.

Следует понять, что параметры, с которыми приходится иметь дело в конструировании и технологии РЭУ, в силу объективно действующих причин являются случайными. Понятие случайности при этом не означает полный "хаос". С одной стороны, разброс (рассеивание) параметров ограничивается предельными отклонениями – допусками, с другой – случайность параметров проявляется при рассмотрении выборки однотипных изделий, материалов инструмента, реализаций процессов. В пределах поля допуска значение случайного

параметра может подчиняться тому или иному закону распределения. Закон может быть задан следующими функциями: плотностью распределения $w(x)$, называемой иначе плотностью вероятностей; функцией распределения $F(x)$. Графики этих функций в случае нормального закона распределения параметра показаны на рис. 2.

Следует знать, что примерно в 90...95 процентах случаях параметры в конструировании и технологии РЭУ распределены по законам, близким к нормальным. Поэтому изучению нормальной модели (нормального закона распределения) в применении к описанию параметров следует уделить особое внимание. При этом необходимо осмыслить "правило трех сигм", поскольку им

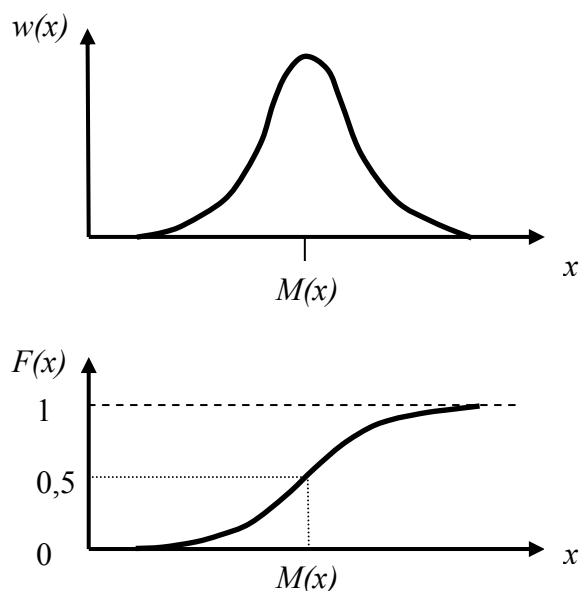


Рис. 2. Графики функций $w(x)$ и $F(x)$ при нормальном законе распределения параметра

широко пользуются в инженерной практике.

Рекомендуется по работе [2] ознакомиться с примерами применения нормальной модели при решении инженерных задач. Надо знать, что в тех случаях, когда закон распределения параметра неизвестен и нет оснований принять гипотезу о нормальной модели, следует пользоваться равномерной моделью, так как она является предельным (наихудшим) случаем рассеивания параметров на практике.

Для вероятностного описания случайного параметра (обозначим его через x) используются следующие характеристики:

- среднее значение параметра, $M(x)$;
- среднее квадратическое отклонение параметра, $\sigma(x)$, или дисперсия, $D(x)$; необходимо помнить соотношение $D(x) = \sigma^2(x)$;
- закон распределения параметра в пределах поля допуска, например, плотность распределения параметра, $w(x)$, в этом случае x – не только рассматриваемый параметр, но и его текущие значения, так как $w(x)$ есть функция.

Среднее значение $M(x)$ обычно соответствует номинальному значению параметра, указываемому в технической документации. В инженерной практике информация о разбросе параметров, как правило, задается характеристикой $\delta(x)$ – половиной поля допуска. При известном виде плотности распределения параметра легко перейти от характеристики $\delta(x)$ к характеристике $\sigma(x)$. Допуски на параметры, для которых оправдана гипотеза о нормальной модели, обычно устанавливаются на основе “правила трех сигм”, поэтому для определения характеристики $\sigma(x)$ в таких случаях можно пользоваться выражением

$$\sigma(x) \approx \frac{\delta(x)}{3}.$$

Для вероятностного описания зависимых параметров (двух или более) пользуются вероятностным описанием параметров, рассматриваемых в отдельности, т.е. характеристиками $M(x_i)$, $\sigma(x_i)$ и $w(x_i)$, а также коэффициентами парной корреляции между зависимыми параметрами. Рассматривая понятие корреляции между параметрами, следует осмыслить пример коррелированных параметров из “жизни”: зависимость между массой и ростом людей.

Изучая учебный материал этого раздела, следует иметь в виду, что в инженерной практике используют вероятностное описание как параметра в своей размерности, так и относительного отклонения параметра, выражаемого обычно в процентах. Следует помнить, что вид кривых плотностей распределения для параметра в своей размерности $w(x)$ и для его относительной погрешности $w(\Delta x/x)$ сохраняется, изменяются лишь числовые характеристики: среднее значение и среднее квадратическое отклонение. Переход от вероятностного описания параметра в своей размерности к вероятностному описанию его относительной погрешности иллюстрируется на примере резистора с сопротивлением $R=30 \text{ кОм} \pm 10\%$ (рис. 3).

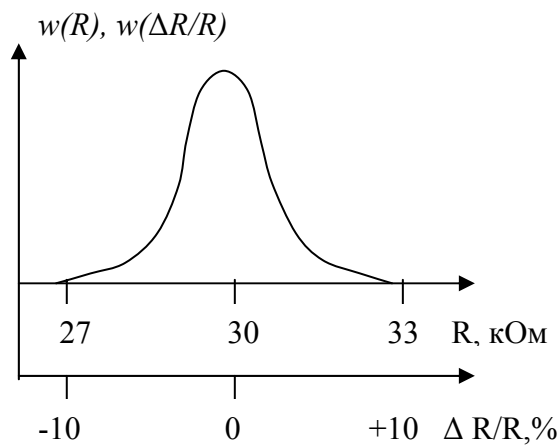


Рис. 3. Иллюстрация к переходу от вероятностного описания параметра R к вероятностному описанию параметра $\Delta R/R$

Как основная литература по вероятностному описанию случайных параметров рекомендуются [1, 4], в качестве дополнительных источников полезны [7, 8].

Контрольные вопросы

1. Поясните, как проявляется случайность параметров элементов, конструкций, технологических процессов, свойств материалов, характеристик инструмента и т.д.
2. Что понимают под вероятностным описанием параметров?
3. Как параметры m и σ нормальной модели распределения случайной величины связаны с её числовыми характеристиками: математическим ожиданием (средним значением) и средним квадратическим отклонением?
4. Поясните, в чём состоит суть «правила трех сигм» и как им пользоваться на практике.
5. Приведите из области конструирования и технологии РЭУ примеры параметров, для которых оправдана гипотеза (предположение) о равномерной модели закона распределения.
6. Как следует поступать на практике в случаях, если для параметра нет оснований принять гипотезу о нормальной или равномерной моделях закона распределения?
7. Как с помощью корреляционного поля параметров можно сделать вывод о силе корреляционной связи между параметрами?
8. В чём состоит отличие отрицательной корреляции от положительной?
9. Приведите примеры коррелированных параметров в конструировании и технологии РЭС.
10. Что представляет собой корреляционная матрица параметров и как ею пользоваться на практике?
11. Как понимать термин “выборочная характеристика”, например “выборочный коэффициент корреляции”?
12. Что понимают под точечными и интервальными оценками параметров, характеристик?
13. Как на практике определить точечные оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения параметра?
14. Поясните, как определить требуемое число наблюдений параметра, чтобы по результатам математической обработки гарантировать среднее значение параметра с ошибкой, не превышающей заданную.
15. Поясните процедуру экспериментального определения коэффициента парной корреляции между параметрами.

16. Опишите процедуру построения гистограммы распределения параметра. Как необходимо разбить диапазон наблюдаемых значений параметра, чтобы построение гистограммы значительно упростилось?
17. Из каких соображений необходимо выбирать число интервалов при построении гистограммы распределения параметра?
18. Поясните, что такое вероятностная сетка (другое название – вероятностная бумага), и как её использовать на практике для принятия гипотезы о законе распределения параметра.
19. Почему для закона равной вероятности понятие вероятностная сетка не имеет смысла?

Раздел 3. Математические модели радиоэлектронных устройств и технологических процессов

Методические указания

Следует понять, что моделирование конструкций и технологических процессов можно рассматривать как следствие системного подхода к проектированию конструкций и технологических процессов. Широкое использование в инженерной практике получили математические модели устройств и технологических процессов. Необходимо иметь в виду, что под словами математическая модель устройства или технологического процесса понимают математическое выражение, показывающее, как выходной параметр устройства или технологического процесса зависит от принятых во внимание первичных параметров. Иногда для большей определенности вместо термина “математическая модель устройства или технологического процесса” употребляют термин “математическая модель выходного параметра устройства или технологического процесса”. Но здесь также имеют в виду математическое выражение, связывающее выходной параметр устройства или технологического процесса с первичными параметрами.

Математические модели устройств и технологических процессов получают в инженерной практике чаще всего в виде полиномов, при этом используют пассивные и активные эксперименты.

В пассивных экспериментах экспериментатор наблюдает значения первичных параметров x_1, \dots, x_k (k - число учитываемых первичных параметров) и фиксирует соответствующие этим значениям уровни выходного параметра. Изменение значений первичных параметров достигается путем замены устройства (экземпляра) или реализации технологического процесса.

Поняв роль и место пассивных экспериментов в построении математических моделей, необходимо осмыслить причины, которые “вызвали к жизни” появление теории планирования активных факторных экспериментов: необходимость сокращения числа опытов, необходимых для построения моделей; стремление упростить процедуру математической обработки результатов эксперимента.

Учебная программа предусматривает изучение активных факторных экспериментов, в которых факторы варьируются на двух уровнях: нижнем и верхнем. Методически рекомендуется вначале изучить и осмыслить полные факторные эксперименты типа " 2^k ", а затем перейти к рассмотрению дробных факторных экспериментов.

В качестве основной литературы по разделу рекомендуются [1, 3, 4]. Вопросы применения полных и дробных факторных экспериментов на достаточном уровне рассмотрены также в [7, 13]. В качестве дополнительной литературы можно использовать [12].

С примерами статистической обработки результатов пассивных экспериментов можно ознакомиться в [7, 9]. Примеры статистической обработки результатов активных факторных экспериментов достаточно полно рассмотрены в [1, 2, 4, 7, 12, 13].

Контрольные вопросы

1. Что понимают под графическими, физическими и математическими моделями объектов или процессов? Приведите примеры указанных моделей.
2. Что понимают под регрессионной моделью? Запишите в общем виде уравнение множественной линейной регрессии.
3. Поясните назначение и суть метода наименьших квадратов.
4. Поясните, как по результатам экспериментов находят приближающие математические модели в виде элементарных функций.
5. В чём суть и для решения каких задач используются факторные эксперименты в конструировании и технологии РЭУ?
6. Укажите отличительные особенности пассивных и активных факторных экспериментов.
7. Опишите этапы процедуры применения пассивных факторных экспериментов для получения математических моделей.
8. Поясните, на какой основной вопрос должна дать ответ процедура проверки статистической значимости коэффициентов математической модели.
9. В чём заключаются преимущества активных факторных экспериментов в сравнении с пассивными факторными экспериментами?
10. Поясните, как при планировании активных факторных экспериментов от параметра в своей размерности перейти к его кодированному представлению.
11. Укажите основные свойства матриц планирования ПФЭ.
12. Поясните, как планировать и выполнять опыты ПФЭ. Что понимают под рандомизацией опытов.
13. В чём заключается особенность ДФЭ и каково их преимущество в сравнении с ПФЭ?
14. Какова последовательность статистической обработки результатов активных факторных экспериментов?

Раздел 4. Анализ точности и стабильности выходных параметров радиоэлектронных устройств и технологических процессов

Методические указания

Важнейшими понятиями для осмысливания учебного материала этого раздела являются такие, как точность и стабильность выходных параметров устройств или технологических процессов. Эти понятия нередко отождествляются или смешиваются, что значительно затрудняет восприятие методов инженерного анализа точности и стабильности выходных параметров. Под точностью выходных параметров понимают степень приближения истинного значения выходного параметра к его номинальному значению при отклонениях первичных параметров, соответствующих производственным погрешностям. Отклонения, обусловленные производственными погрешностями, также называют начальными или технологическими отклонениями, например, точность резонансной частоты f_0 LC-контура зависит от разброса индуктивности и емкости.

Стабильность характеризует степень неизменности (постоянства) выходного параметра во времени и в условиях воздействия факторов окружающей среды (температуры, влажности и т.д.). Если параметр незначительно изменяется во времени и при воздействии факторов среды, то говорят о его высокой стабильности. Если параметр заметно изменяется в указанных условиях, то говорят о низкой стабильности этого параметра. Нередко понятие стабильности выходного параметра путают с таким понятием, как параметрическая надежность устройства, под которой понимают свойство устройства сохранять значение своего выходного параметра (одного или нескольких) в заданных пределах в определенных условиях эксплуатации и в течение заданного времени.

Нередко отождествляют или путают между собой понятия разброса (рассеивания, отклонения) параметра и допуска на параметр. Следует знать, что разброс параметра обусловлен различными причинами (чисто производственными причинами, действием факторов среды, процессами старения и т.д.) и может быть достаточно большим. С точки зрения задач практики, разброс параметра всегда ограничивается характеристикой, называемой допуском. Если допуск на параметр установлен, то далее встает вопрос, как его обеспечить, так как разброс параметра может превышать установленный допуск.

Теперь обратимся к оценке точности и стабильности выходных параметров. В качестве количественных оценок точности могут использоваться среднее значение и среднее квадратическое отклонение выходного параметра. Применительно к стабильности в качестве таких характеристик могут быть среднее значение выходного параметра с учетом действия рассматриваемого фактора и среднее квадратическое отклонение параметра, обусловленное действием этого фактора.

На практике часто вместо характеристик, выраженных в размерности самого параметра, используют относительные отклонения параметра.

В промышленности в качестве оценки точности используют обычно производственный допуск. Стабильность же оценивается по отдельным эксплуатационным факторам с помощью температурного допуска, допуска старения и др. (в зависимости от того, какие факторы принимаются во внимание).

В качестве комплексной оценки точности и стабильности выходного параметра может рассматриваться эксплуатационный допуск. Он ограничивает разброс выходного параметра, обусловленный производственными погрешностями первичных параметров, а также действием эксплуатационных факторов и процессов старения.

При установлении допусков на выходные параметры в инженерной практике поступают так: рассчитывают, какой разброс выходного параметра может иметь место при заданной вероятности, а далее допуск полагают равным этому разбросу. Если потребителя допуск устраивает, то задача установления допуска решена. Допуск будет гарантироваться с такой же вероятностью, с которой оценивался разброс параметра. В литературе, посвященной анализу точности и стабильности выходных параметров, в связи со сказанным широко используется термин “расчет допусков” [5].

При освоении методов расчета допусков основное внимание необходимо уделить методу расчета с учётом вероятностного рассеивания первичных параметров (кратко вероятностный метод) и методу Монте-Карло. В качестве литературы по этим вопросам рекомендуются [1, 4, 5, 7]. С примерами решения практических задач по определению допусков можно ознакомиться в [1, 2, 5, 7]. Методы определения коэффициентов влияния подробно рассмотрены в [1, 5]. Метод Монте-Карло описан в [1, 8].

Подходы, используемые для решения задач обеспечения требований к точности и стабильности выходных параметров, излагаются в [1, 5].

Контрольные вопросы

1. С помощью каких количественных характеристик может быть оценена серийнопригодность как свойство конструкций?
2. В чём отличие эксплуатационного допуска от производственного?
3. Приведите примеры допусков: симметричных и несимметричных, двухсторонних и односторонних.
4. Укажите, с помощью каких характеристик может быть задан допуск на параметр.
5. В чём состоит отличие понятий точность и стабильность, например выходного параметра?
6. Как на практике количественно описывают точность и стабильность параметров элементов?
7. Поясните смысл коэффициентов влияния, входящих в уравнение относительной производственной погрешности выходного параметра.
8. Как на практике можно определить коэффициенты влияния?
9. Поясните процедуру определения коэффициентов влияния экспериментально-расчётным способом.

10. Укажите основные методы определения производственных допусков выходных параметров.
11. В чём суть, каковы достоинства и недостатки метода «минимума-максимума»?
12. С помощью каких расчётных характеристик формируют производственный допуск в случае использования расчётно-аналитического метода с учётом вероятностного рассеивания первичных параметров?
13. Какова процедура применения метода Монте-Карло для оценки точности выходных параметров с использованием математических моделей РЭУ или технологических процессов?
14. В чём состоит особенность оценки точности выходного параметра методом Монте-Карло в случае использования физического моделирования конструкций РЭУ?
15. Поясните принцип количественной оценки стабильности выходных параметров.

Раздел 5. Основы теории надёжности. Методы оценки показателей надёжности радиоэлектронных устройств

Методические указания

Приступая к изучению учебного материала этого раздела, рекомендуется ознакомиться с системой ГОСТов по надёжности, и особенно с ГОСТом, устанавливающим основные термины и понятия надёжности (ГОСТ 27.002-89). По ГОСТам либо по учебной литературе [1, 3, 4, 6, 8, 11] необходимо в первую очередь ознакомиться с такими понятиями, как надёжность, отказ, наработка, работоспособность, безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость. Обращаем внимание на то, что безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость - это свойства, через которые может проявляться надёжность изделий. Подчеркнём, что работоспособность это не свойство, а вид технического состояния, при котором изделие (элемент, РЭУ) способно выполнить функции, указанные в технической документации.

Следует хорошо разобраться с такими временными понятиями, как ресурс и срок службы. При этом не обойтись без осмысливания понятия «предельное состояние изделия» как состояния, при котором дальнейшее использование изделия по назначению невозможно либо нецелесообразно по соображениям безопасности, экономическим и другим причинам. Заострим внимание на том, что ресурс – это суммарная наработка от начала эксплуатации изделия до момента наступления предельного состояния при необходимости с перерывами для ремонта и технического обслуживания. Срок службы отличается от ресурса тем, что это календарная продолжительность.

Следует понять, что отказ РЭУ по своей физической природе – событие случайное, поэтому для описания отказов используют математический аппарат теории вероятности. А в качестве параметра, характеризующего отказ, берут

наработку изделия до отказа. Под наработкой вообще в теории надежности понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единицах в зависимости от вида и назначения изделия, а наработка до отказа – это суммарная наработка от начала вступления изделия в работу (эксплуатацию) до момента наступления первого отказа.

Особо следует осмыслить тему «Количественные показатели надёжности элементов и РЭУ» [1, с. 138 – 147], причем особое внимание необходимо обратить на отличие таких показателей, как средняя наработка до отказа (называемая средним временем безотказной работы, если наработка выражается временем) и наработка на отказ. Следует хорошо осмыслить показатели, с помощью которых судят о таком свойстве, как долговечность. Надо чётко понять различие между средним ресурсом и средним сроком службы, гамма-процентным ресурсом и гамма-процентным сроком службы. Следует осмыслить понятия “назначенный ресурс” и “назначенный срок службы”. Подчеркнём, что назначенный ресурс (срок службы) – это такое значение ресурса (срока службы), при достижении которого изделие снимается с эксплуатации независимо от его технического состояния.

Следует знать, что в ряде случаев используют такие понятия, как установленный ресурс и установленный срок службы. Под установленным ресурсом (сроком службы) понимают такой ресурс (срок службы), который гарантируется с вероятностью гамма, равной 100%. Следует знать, что для элементов, которые являются изделиями неремонтируемыми, понятия “установленный ресурс” и “установленный срок службы” теряют смысл. Объясняется это тем, что одним из критериев их предельного состояния, и следовательно, полного исчерпывания ресурса и срока службы является отказ. А, как известно, отказ – событие случайное и может произойти в любой момент времени, даже в момент включения РЭУ. Иное дело для конструкций РЭУ: в случае отказа РЭУ ремонтируется и снова используется по назначению – и так до момента наступления предельного состояния.

При рассмотрении законов распределения наработки элементов и РЭУ до отказа особое внимание необходимо уделить экспоненциальному закону, плотность распределения (w) для которого задаётся выражением (рис. 4)

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

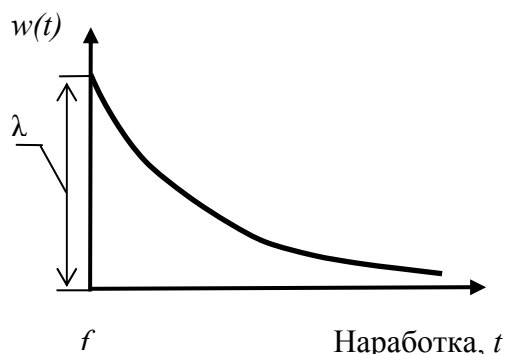


Рис. 4. Экспоненциальное распределение наработки до отказа

где t – текущее значение наработки (времени работы);

λ – параметр распределения.

Надо осмыслить широко используемое в теории и практике надежности понятие “экспоненциальный закон надежности”. Употребляя данное понятие, имеют в виду, что время до отказа (в общем случае наработка до отказа) или, что то же самое, время исправной работы изделия

распределено по экспоненциальному закону.

Математически “экспоненциальный закон надежности” задается выражением

$$P(t_3) = e^{-\lambda t_3},$$

где t_3 – заданное (интересующее) время работы изделия;

$P(t_3)$ – вероятность безотказной работы изделия за время t_3 (на интервале времени $0 \dots t_3$).

Важно разобраться, почему интенсивность отказов была выбрана в качестве основной справочной характеристики надёжности элементов. В [1] показано, что при экспоненциальном распределении времени до отказа интенсивность отказов элемента (обозначим как λ_0) постоянна и численно равна параметру λ распределения вида (2). Следовательно, в технической документации и справочниках надежность элементов может быть задана одним числом λ_0 – интенсивностью отказов. Это обстоятельство, а также то, что экспоненциальный закон неплохо описывает отказы элементов РЭУ, предопределили его широкое использование на практике.

При ознакомлении с надежностью элементов РЭУ необходимо обратить внимание на особенность записи в технической документации и справочниках данных о надежности некоторых элементов коммутации [2]: для соединителей (разъёмов) – значение интенсивности отказов, приходящееся на один штырёк при номинальном токе через штырь и числе сочленений (расчленений), указанных в ТУ; для реле, герконов – значение интенсивности отказов, приходящееся на одну контактную группу при номинальном электрическом режиме; для тумблеров, кнопок, переключателей – значение интенсивности отказов, приходящееся на один контакт при номинальном электрическом режиме и числе коммутационных циклов, указанных в ТУ, и т. п.

При проработке вопроса о пересчете справочных значений интенсивностей отказов элементов (λ_0) на конкретный электрический режим и условия работы рекомендуется заострить внимание на модели пересчёта вида

$$\lambda(\mathcal{G}) = \lambda_0 \prod_{j=1}^m \alpha(x_j),$$

где $\lambda(\mathcal{G})$ – интенсивность отказов элемента с учетом электрического режима и условий работы (символ \mathcal{G} в обозначении $\lambda(\mathcal{G})$ подчеркивает это);

$\alpha(x_j)$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние фактора x_j ;

m – число учитываемых факторов.

Изучив методы оценки показателей надежности проектируемых РЭУ с использованием интенсивностей отказов элементов, необходимо понять, что точность расчетов в первую очередь зависит от достоверности справочных зна-

чений интенсивностей отказов элементов (λ_0) и от того, насколько для элементов выполняется принцип статистической устойчивости показателей надёжности. Выполнение этого принципа означает, что с течением времени в процессе изготовления элементов их статистические характеристики надёжности (среднее значение и разброс интенсивности отказов) сохраняются для разных партий. Если этот принцип нарушается, то показатели надёжности РЭУ при эксплуатации могут значительно отличаться от расчетных значений.

При рассмотрении методов анализа безотказности РЭС при наличии резервирования необходимо усвоить два правила. При постоянном резервировании характер отказов элементов – обрыв или короткое замыкание играет принципиальную роль с точки зрения надёжности резервируемого устройства в целом в том случае, если элементы резервируемого узла соединены электрически. При резервировании замещением характер отказов элемента (функционального узла, блока и т.п.) никакой роли не играет, так как отказавший элемент отключается от электрической схемы, а вместо него подключается резервный элемент.

В качестве литературы по разделу рекомендуются позиции [1, 3, 4] основной литературы и позиции [6, 8, 11] дополнительной литературы. С методами анализа безотказности РЭС при наличии резервирования можно ознакомиться в [1, 6, 8]. Примеры расчёта надёжности приводятся в [1, 2, 4, 6]. С параметрической надёжностью, методом и примером её расчёта можно ознакомиться в [1].

Контрольные вопросы

1. Через какие свойства может проявляться надёжность как комплексное свойство конструкций РЭУ, их элементов?
2. Поясните термин «наработка» и укажите, что понимают под наработкой до отказа.
3. В чём состоит отличительная особенность внезапных и постепенных (параметрических) отказов?
4. Поясните, что понимают под конструктивным, производственным, эксплуатационным и деградационным отказами РЭУ.
5. Каковы основные причины отказов РЭУ?
6. Укажите примерное количество отказов (в процентах), обусловленное ошибками проектирования, производства и эксплуатации РЭУ.
7. Какие схемы (модели) соединения элементов в РЭУ с точки зрения надёжности используют на практике?
8. Какие модели законов распределения широко используют на практике для описания времени (наработки) изделий до отказа?
9. В чём состоит суть «экспоненциального закона надёжности»?
10. Назовите группы показателей, используемые на практике для описания надёжности элементов и конструкций РЭУ.
11. Назовите показатели, с помощью которых можно получить представление о безотказности элементов и конструкций РЭУ.

12. С помощью каких показателей судят о ремонтпригодности конструкций РЭУ?
13. Какие временные понятия используют для описания долговечности как свойства элементов и конструкций РЭУ?
14. Какие временные понятия используют для описания сохраняемости как свойства элементов и конструкций РЭУ?
15. В чём состоит отличие срока службы от ресурса?
16. Поясните, что понимают под предельным состоянием изделия, укажите, например, возможные критерии предельных состояний такого элемента РЭУ, как биполярного транзистора в металлическом корпусе.
17. Чем отличаются друг от друга следующие показатели надёжности: 95-процентная наработка до отказа, 95-процентный ресурс, 95-процентный срок службы, 95-процентный срок сохраняемости?
18. В чём состоит отличие показателя «наработка на отказ» (полное название «средняя наработка на отказ») от показателя «средняя наработка до отказа»?
19. Нарисуйте типичную λ -характеристику РЭУ, поясните физический смысл её областей – периода приработки, периода нормальной эксплуатации, области старения и укажите их примерную продолжительность.
20. Что имеют в виду, когда говорят: “для элементов справедлив экспоненциальный закон надёжности”?
21. Приведите примеры комплексных показателей надёжности.
22. Поясните, почему интенсивность отказов была выбрана в качестве основной справочной характеристики надёжности элементов, каковы её размерность и примерные значения для современных элементов РЭУ.
23. Что понимают под коэффициентом электрической нагрузки элемента и как этот коэффициент влияет на надёжность? Какие значения этого коэффициента следует использовать на практике?
24. Дайте сравнительную характеристику надёжности элементов с учётом их видов. Укажите, какие виды элементов являются высоконадёжными, какие наиболее ненадёжными.
25. Объясните, почему надёжность интегральных микросхем слабо зависит от степени интеграции.
26. Поясните, почему на практике возникают задачи пересчёта справочных интенсивностей отказов элементов на конкретный электрический режим и условия работы. Какая модель (выражение) пересчёта получила распространение на практике?
27. Поясните принцип расчёта надёжности конструкции РЭУ, основываясь на электрической схеме и справочных данных о надёжности комплектующих элементов по внезапным отказам.
28. Каковы особенности ориентировочного расчёта показателей надёжности РЭУ, что здесь принимается во внимание?
29. В чём отличие уточнённого расчёта показателей надёжности, выполняемого на заключительных стадиях проектирования конструкции РЭУ, от ориентировочного расчёта?

30. Назовите причины, обуславливающие параметрическую надёжность РЭУ, и поясните принцип оценки этой надёжности.
31. Что понимают под эксплуатационной надёжностью РЭУ?
32. В чём состоит суть резервирования? Каковы особенности постоянного резервирования и резервирования замещением, общего и отдельного резервирования?
33. Дайте характеристику постоянного резервирования, укажите его достоинства, недостатки и область применения.
34. На чём основан принцип оценки безотказности резервируемых РЭУ при наличии постоянного резервирования и влияния на надёжность характера отказа элементов («обрыв» или «короткое замыкание»)?
35. Дайте характеристику резервирования замещением, укажите его достоинства, недостатки и область применения. Поясните, что имеют в виду, когда употребляют слова: «холодное резервирование», «тёплое резервирование», «горячее резервирование».
36. Объясните, почему резервирование замещением не используют в арифметико-логических и запоминающих устройствах ЭВМ.
37. На чём основан принцип оценки безотказности резервируемого РЭУ в случае наличия резервирования замещением?

Раздел 6. Прогнозирование технического состояния элементов и радиоэлектронных устройств

Методические указания

В этом разделе основное внимание необходимо уделить методам математического прогнозирования, причём акцент следует сделать на индивидуальное прогнозирование. При таком прогнозировании контролируются какие-то параметры конкретного экземпляра изделия и принимается решение (делается прогноз) о состоянии в будущем этого же экземпляра.

Изучая индивидуальное прогнозирование, следует иметь в виду, что наибольшие трудности вызывает осмысливание индивидуального прогнозирования распознаванием образов. Это прогнозирование основано на использовании информативных параметров, которые для краткости называют признаками. Под информативным параметром (признаком) понимают такой параметр, значение которого в момент времени $t = 0$ несёт информацию о состоянии элемента или конструкции РЭУ в будущем. В качестве примера информативного параметра биполярного транзистора можно привести обратный ток коллекторного перехода. Замечено, что чем выше значение этого параметра в момент времени $t = 0$, тем ниже в среднем надёжность транзистора.

Индивидуальное прогнозирование с использованием одного информативного параметра (признака) может дать много ошибок. Поэтому на практике используют совокупность признаков. Совокупность признаков, измеренная в момент времени $t = 0$, образует как бы образ контролируемого экземпляра, а

задача индивидуального прогнозирования заключается в том, чтобы правильно распознать этот образ, т.е. правильно принять решение о надёжности контролируемого экземпляра в будущем. Поэтому индивидуальное прогнозирование с использованием информативных параметров (признаков) и называют «прогнозирование распознаванием образов».

Рассматривая процедуру построения прогнозирующих правил для решения задач индивидуального прогнозирования распознаванием образов, нужно уделить внимание случаю прогнозирования, при котором прогноз получают в виде разделения (классификации) элементов или конструкций РЭУ на два класса в зависимости от уровня надёжности в заданный будущий момент времени $t_{пр}$: K_1 – класс надёжных экземпляров, K_2 – класс ненадёжных экземпляров.

Основными литературными источниками для изучения материала этого раздела являются работы [1, 4, 7]. С общими вопросами прогнозирования надёжности РЭУ можно ознакомиться в работе [6].

Контрольные вопросы

1. В чём состоит отличие математического прогнозирования от эвристического, индивидуального – от группового?
2. В чём суть метода экспертных оценок, используемого при эвристическом прогнозировании параметров и характеристик РЭУ, технологических процессов?
3. Что понимают под предысторией, шагом прогнозирования, математической моделью прогнозирования в случае индивидуального прогнозирования параметров РЭУ с использованием методов экстраполяции? В каком виде при этом получают прогноз?
4. Какое прогнозирование при использовании методов экстраполяции называют обратным?
5. Как выбирают математическую модель прогнозирования при использовании методов экстраполяции?
6. На чём основана «идеология» индивидуального прогнозирования распознаванием образов, в каком виде при этом получают прогноз об элементе или устройстве?
7. Что понимают под информативным параметром?
8. Поясните происхождение названия вида прогнозирования: «Прогнозирование распознаванием образов».
9. Что понимают под прогнозирующим правилом в методе индивидуального прогнозирования распознаванием образов?
10. О каких ошибках прогнозирования в методах индивидуального прогнозирования распознаванием образов судят с помощью понятия «риск изготовителя», а о каких – с помощью понятия «риск потребителя»?
11. Дайте характеристику основных этапов процедуры построения прогнозирующего правила.
12. Поясните назначение и суть обучающего эксперимента.

13. Назовите основные методы построения прогнозирующих правил.
14. В чём состоит принципиальное отличие непараметрических методов построения прогнозирующих правил от параметрических?

Раздел 7. Задачи оптимизации в конструировании и технологии радиоэлектронных устройств

Методические указания

Приступив к изучению учебного материала этого раздела, очень важно осмыслить понятие задач оптимизации. Каждое конструкторско-технологическое решение позволяет достичь определенных технико-экономических показателей РЭУ, в качестве которых применительно к конструкции РЭУ могут быть, например, надежность, масса, габариты, стоимость. Конструкторское решение, параметры которого обеспечивают получение экстремального значения функции F (минимального или максимального в зависимости от того, что лучше), выражающей важнейший технико-экономический показатель или сочетание таких показателей, называют оптимальным решением. Иногда говорят, что такое решение является квазиоптимальным, имея в виду, что в действительности это решение весьма близко к наилучшему. Функцию

$$F = F(x_1, \dots, x_n)$$

называют целевой функцией, иногда ее также называют критерием оптимизации, критерием качества, критериальной функцией и т. п. Параметры конструкторского решения x_1, x_2, \dots, x_n , оптимальные значения которых необходимо определить, называют оптимизируемыми параметрами.

Следует усвоить, что, выполняя постановку задачи оптимизации, необходимо четко указать:

- ♦ какой технико-экономический показатель (или их сочетание) выступает в роли целевой функции;
- ♦ на какие технико-экономические показатели из числа не вошедших в целевую функцию наложены ограничения и каков характер этих ограничений;
- ♦ какие параметры конструкторского решения будут выступать в роли оптимизируемых и каков характер ограничений, накладываемых на эти параметры.

Без четкого выделения указанных составляющих невозможно выполнить постановку задачи оптимизации.

Нужно помнить, что конструкторское решение характеризуется большим числом параметров. Однако в качестве оптимизируемых выбирают только те, которые в наибольшей степени влияют на значение целевой функции F и функ-

ций, задающих ограничения на технико-экономические показатели, которые важны, но не вошли в F .

Следует также особое внимание уделить осмысливанию процедуры решения задач оптимизации, начиная с выбора целевой функции и заканчивая математическим решением задачи, корректировкой результатов решения с учетом особенностей задачи оптимизации.

При рассмотрении математических методов решения задач оптимизации рекомендуется сделать акцент на методы случайного поиска, как представляющие особый интерес для практических задач. С этими методами можно ознакомиться в [1].

В качестве основной литературы по разделу в целом рекомендуются работы [1, 3, 4, 7]. Как дополнительная литература полезен источник [7]. Со стохастическими задачами оптимизации можно ознакомиться в [7]. Решение задач оптимизации методом динамического программирования рассмотрено в [1, 4].

Контрольные вопросы

1. Какое конструкторско-технологическое решение считают оптимальным, с помощью какого количественного критерия судят об этом?
2. Что понимают под целевой функцией (иначе – критерием оптимальности) и оптимизируемыми параметрами?
3. На какие технико-экономические показатели РЭУ накладываются ограничения?
4. Какие параметры конструкторско-технологического решения должны рассматриваться в качестве оптимизируемых?
5. Поясните порядок решения задач оптимизации.
6. В чём состоит суть выбора целевой функции методом главного критерия?
7. Назовите основные факторы, влияющие на выбор математического метода решения задач оптимизации.
8. Какие задачи можно решать с помощью линейного и нелинейного математического программирования?
9. В чём состоит принципиальное отличие динамического программирования от получения оптимума методом обычного перебора вариантов решений?
10. Какие задачи оптимизации имеет смысл решать, используя метод случайного поиска на ЭВМ?

Раздел 8. Системы массового обслуживания в технологии радиоэлектронных устройств

Методические указания

Следует понять, что протекание многих технологических процессов изготовления РЭУ может рассматриваться как функционирование так называемых систем массового обслуживания. Работа любой СМО состоит в поступлении на её каналы заявок и их обслуживании. В технологии РЭУ в качестве каналов обслуживания могут рассматриваться рабочие места, технологическое оборудование и т. п. Заявки на каналы поступают одна за другой в некоторые, в общем случае случайные, моменты времени. После того, как заявка обслужена, канал освобождается и готов для приема следующей заявки. При рассмотрении характеристик СМО в первую очередь необходимо уделить внимание таким характеристикам, как абсолютная и относительная пропускная способность, вероятность необслуживания заявок и вероятность простоя СМО. При анализе потока поступающих в СМО заявок акцент рекомендуется сделать на простейших потоках. Их полное название – простейшие стационарные пуассоновские потоки. Для таких потоков число заявок, приходящихся на любой фиксированный интервал времени τ (рис. 5), распределено по закону Пуассона для дискретных величин.

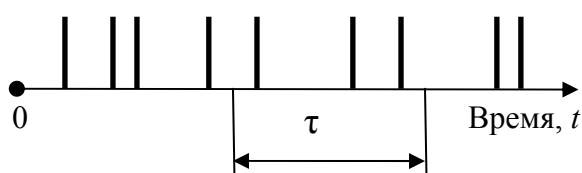


Рис. 5. Поток поступающих заявок

Вероятность того, что за время τ произойдет ровно m событий, равна:

$$P(m / \tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} e^{-\lambda \tau},$$

где λ – плотность потока заявок (среднее число заявок, приходящихся на единицу времени).

Важнейшее свойство простейшего потока – его стационарность. Оно означает, что характеристика потока λ не зависит от рассматриваемого временного интервала τ .

Следует запомнить, что простейший поток играет в теории массового обслуживания примерно такую же роль, как нормальный закон распределения при вероятностном описании параметров в конструировании и технологии РЭУ.

Следует осмыслить виды СМО в технологии РЭУ (рис. 6). Пунктирная линия на схеме означает следующее: СМО смешанного типа является системой с ожиданием заявок в очереди, и, казалось бы, заявки не должны получать отказ в обслуживании, однако из-за наличия ограничений на процесс ожидания заявок в очереди возможны случаи необслуживания заявок, т.е. СМО смешанного типа проявляет также признаки СМО с отказом.

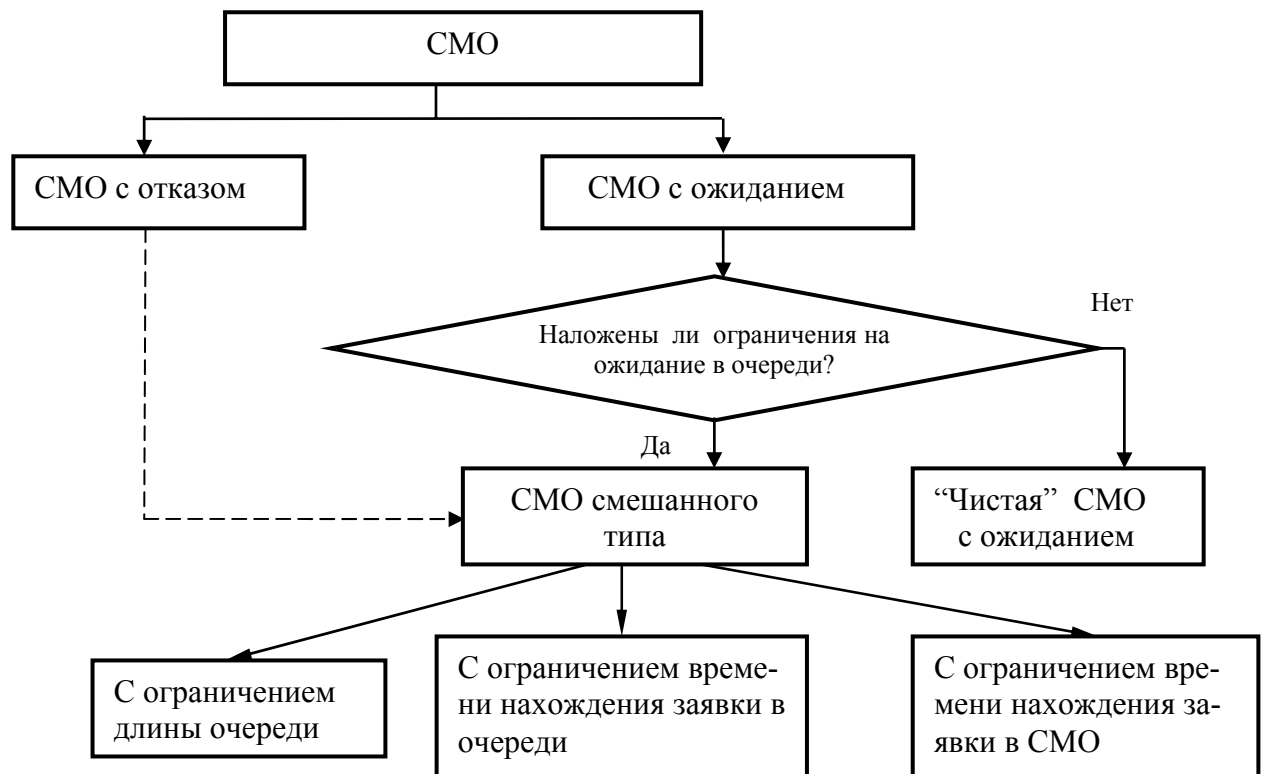


Рис.6. Виды СМО в технологии РЭУ

Рассматривая математическое описание СМО, рекомендуется сделать акцент на СМО с отказом, "чистую" СМО с ожиданием, СМО смешанного типа с ограничением длины очереди. При этом надо осмыслить понятие установившегося режима функционирования СМО, разобраться с критерием его наступления, понять область применения расчётных формул Эрланга.

В качестве основной литературы рекомендуются [1, 3]. Из дополнительной литературы в определённой степени их могут заменить [7, 10]. С критерием наступления установившегося режима и примерами решения задач можно ознакомиться в [2].

Контрольные вопросы

1. Протекание каких технологических процессов изготовления РЭУ может рассматриваться как функционирование СМО? Приведите примеры СМО в технологии РЭУ.
2. Назовите основные характеристики СМО и поясните их физический смысл.
3. Объясните, почему для одной и той же СМО при значении вероятности необслуживания, отличной от нуля, имеет место одновременный простой всех каналов, т.е. ненулевое значение вероятности простоя СМО.
4. Что понимают под простейшим стационарным пуассоновским (кратко – простейшим) потоком заявок и какими свойствами он должен обладать?

5. Что даёт для практики свойство стационарности простейшего потока заявок?
6. Каким законом распределения описывается случайное время между приходом двух соседних заявок в случае простейшего потока?
7. Перечислите основные виды СМО. Объясните, почему СМО с ожиданием в случае наличия ограничения на процесс ожидания заявок в очереди названа словами «СМО смешанного типа».
8. В каком случае правомерно применять формулы Эрланга для определения состояний СМО и основных её характеристик: вероятности необслуживания заявок, относительной пропускной способности и вероятности простоя СМО?
9. Что понимают под установившимся режимом функционирования СМО и в каких случаях режим может рассматриваться как практически установившийся?

Раздел 9. Статистическое моделирование параметров конструкций и технологических процессов

Методические указания

Приступая к изучению учебного материала этого раздела, необходимо понять, что при оценке точности и стабильности выходных параметров, определении показателей надёжности конструкций РЭУ, нахождении характеристик систем массового обслуживания, а также при решении ряда других задач в области конструирования и технологии РЭУ аналитические расчёты оказываются трудоёмкими либо вообще непригодными. Использование же экспериментальных методов связано с большими затратами и становится экономически неоправданным. В подобных случаях целесообразно использовать имитационное моделирование параметров и характеристик РЭУ, технологических процессов, СМО и т.д., выполняемое с использованием математических моделей.

Необходимо чётко понять, что при имитационном моделировании воспроизводятся случайные значения параметров и свойств РЭУ, технологических процессов, СМО. При этом принимают во внимание вероятностные характеристики параметров: средние значения, средние квадратические отклонения и законы распределения. Выполняя многократно имитационное моделирование, удаётся получить статистический материал (статистику) о поведении интересующих выходного параметра, характеристике, свойстве. Поэтому вместо термина «имитационное моделирование» иногда используют термин «статистическое моделирование». Математическая обработка результатов моделирования позволяет получить средние значения интересующих величин и возможные отклонения величин от средних значений. При необходимости можно подобрать подходящее приближение закона распределения интересующей величины.

Следует знать, что поскольку при имитационном моделировании воспроизводятся вероятностные свойства параметров и характеристик, то такое моделирование называют также вероятностным. При имитационном моделировании

получают реализации случайных параметров, характеристик. Поэтому надо понять, что само моделирование сводится к генерированию случайных чисел, имеющих определённые законы распределения.

Для получения случайных чисел с любым законом распределения используют случайные числа r , равномерно распределённые в интервале $(0...1)$, называемые стандартными равномерными числами, и (или) нормально распределённые случайные числа x_H с параметрами нормального закона $m = 0$, $\sigma = 1$, называемые стандартными нормальными числами. Плотности распределения чисел r и x_H имеют вид, показанный на рис. 7.

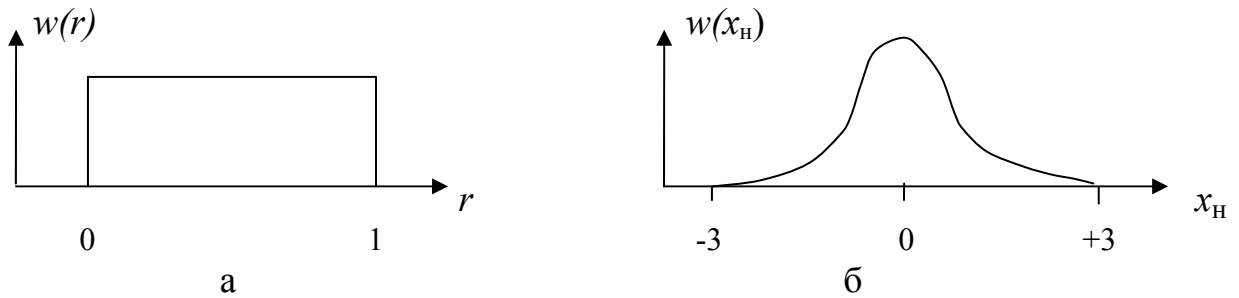


Рис. 7. Графики плотностей распределения стандартных случайных чисел:
а – равномерных; б – нормальных

Надо понять, почему числа x_H в основном занимают диапазон $(-3...+3)$. Для этого надо обратиться к «правилу трёх сигм». Следует знать, что вероятность попадания числа x_H в указанный диапазон не равна единице. Даже одно значение x_H , заметно вышедшее за этот диапазон, может существенно исказить результаты моделирования. Поэтому при использовании чисел x_H на практике их значения надо искусственно ограничивать числами минус 3 и плюс 3.

Имитационное моделирование с использованием математических моделей выполняется, как правило, на ЭВМ. Математическое обеспечение современных ЭВМ содержит в своём составе встроенные в языки программирования функции получения стандартных равномерных чисел r . Следует не забывать, что в Паскале это встроенная функция *random*. Стандартные нормальные числа x_H получают по формуле

$$x_H = \frac{\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}},$$

где n – количество стандартных случайных чисел r ; обычно $n = 12$ или 20.

С выводом этой формулы можно ознакомиться в [1].

Случайные числа с другими законами распределения, в том числе и равномерным в диапазоне от a до b (обозначим как $x_{a,b}^{(\text{равн})}$) и нормальным с любыми значениями параметров m и σ (обозначим как $x_{m,\sigma}^{(\text{норм})}$), получают с помощью аналитических преобразований чисел r и (или) чисел x_H (см. табл. 9.1 в [1]):

$$x_{a,b}^{(\text{равн})} = r(b - a) + a;$$

$$x_{m,\sigma}^{(\text{норм})} = x_{\text{н}} \sigma + m.$$

Рекомендуется попытаться понять происхождение этих формул.

При исследовании точности и стабильности выходных параметров РЭУ, технологических процессов, определении показателей надёжности конструкций, характеристик СМО реализуют метод Монте-Карло. С его помощью получают статистику об изменении интересующего параметра или характеристики. Поэтому метод Монте-Карло называют методом статистических испытаний. Со структурной схемой алгоритма реализации метода на ЭВМ в предположении использования математических моделей объектов и процессов можно ознакомиться в [1, с. 285]. В этой схеме в зависимости от решаемой задачи принципиально меняется лишь математическая модель, с помощью которой по совокупности случайных параметров, полученных при моделировании, находят значение интересующей характеристики (параметра, показателя) в той или иной реализации объекта, процесса, системы.

Учебный материал этого раздела подробно излагается в [1].

Контрольные вопросы

1. Что понимают под имитационным (статистическим) моделированием и какова в нём роль математических моделей конструкций, надёжности РЭУ, технологических процессов?
2. Что принимают во внимание при моделировании случайных параметров?
3. Какие случайные числа называют стандартными равномерными, а какие стандартными нормальными?
4. Как моделировать на ЭВМ случайные числа (параметры) с нормальным законом распределения?
5. Как получать на ЭВМ случайные числа с любым законом распределения?
6. Поясните, как применять метод обратного преобразования для получения формул, с помощью которых можно генерировать на ЭВМ случайные числа с любым интересующим законом распределения.
7. Как можно моделировать на ЭВМ коррелированные случайные параметры с нормальными законами распределения?
8. Поясните принцип моделирования на ЭВМ коррелированных параметров с любыми (заранее известными) законами распределения.
9. Опишите, как с помощью метода Монте-Карло и использованием математической модели РЭУ можно исследовать выходные параметры устройства.
10. Поясните принцип имитационного математического моделирования надёжности РЭУ.
11. Как определяют количественные показатели надёжности, используя результаты моделирования?

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: Учеб. для инж.-техн. спец. вузов.- Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков С.М., Погребняков А.В. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Сборник задач: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: БГУИР, 2001. – 124 с.
3. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭС: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1991. – 359 с.
4. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.
5. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермощенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1973. – 129 с.
6. Широков А.М. Надежность радиоэлектронных устройств: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1972. – 272 с.
7. Львович Я.Е., Фролов В.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 192 с.
8. Фролов А.Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1970. – 488 с.
9. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
11. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Т.2. Математические методы в теории надежности и эффективности / Под ред. В.Б. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
12. Адлер Ю.П., Марков Ю.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
13. Боровиков С.М. Методическое пособие по учебным дисциплинам «Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности» и «Инженерное обеспечение надёжности РЭС» для студентов специальностей «Проектирование и производство РЭС» и «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» всех форм обучения. – Мн.: БГУИР, 2003. – 60 с.
14. Боровиков С.М., Альферович Н.В., Малышева Т.В. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: Лабораторный практикум для студентов специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» / Под общ. ред. С.М. Боровикова. – Мн.: БГУИР, 2005. – 72 с.
15. Боровиков С.М., Колбун В.С., Малышева Т.В. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию для студентов специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» / Под ред. С.М. Боровикова. – Мн.: БГУИР, 2004. – 55 с.