Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, О.В. МЕЛЬНИК

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

Управление техническим состоянием электронных средств

Для студентов, обучающихся по направлению:
211000.68 – «Конструирование и технология электронных средств»

Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2013

УДК 621.3.019.3
ББК 32.85
М-

Р е ц е н з е н т ы:
Ведущий специалист воронежского филиала
ОАО «Воентелеком», кандидат технических наук,
доцет Букин М.В.
Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
Иванов А.В.

Зырянов, Ю.Т.
М -
Лабораторный практикум по дисциплине «Управление техническим состоянием электронных средств»/ Ю.Т. Зырянов, О.В. Мельник – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. –с. – 100 экз.

В лабораторном практикуме представлены задания, предназначенные для изучения управления техническим состоянием электронных средств.

Настоящий лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению 211000.68 – «Конструирование и технология электронных средств», а также может быть использовано студентами смежных специальностей и разных форм обучения.

УДК
ББК

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Исследование параметрических методов прогнозирования надежности электронных средств	5
Лабораторная работа №2. Расчет надежностных характеристик функционирования электронных средств	16
Лабораторная работа №3. Исследование методов статистического регулирования технологических процессов при управлении техническим состоянием РЭС	22
Список используемых источников	29

ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности — наука, изучающая закономерности отказов технических систем. Основными объектами ее изучения являются:

- критерии надежности технических систем различного назначения;
- методы анализа надежности в процессе проектирования и эксплуатации технических систем;
- методы синтеза технических систем;
- пути обеспечения и повышения надежности техники;
- научные методы эксплуатации техники, обеспечивающие ее высокую надежность.

Особенности этой дисциплины таковы:

- теория надежности — общетехническая дисциплина;
- математическое моделирование — основа изучения дисциплины;
- комплексный характер;
- высокая значимость и глубокая связь с другими техническими предметами;
- трудность моделирования и изучения процессов, протекающих в сложных технических системах.

Надежность техники зависит от многих факторов; критерии и показатели надежности устанавливаются в зависимости от вида техники и ее применения; Теория надежности и ее фундаментальные понятий и определения обеспечение надежности в процессе эксплуатации определяется дисциплиной обслуживания, квалификацией обслуживающего персонала, экономическими соображениями. Отсюда ясно, что техника с позиции надежности — это объект системного анализа. Любая наука развивается из основных понятий и определений. В теории надежности такими понятиями являются "надежность" и "отказ".

В данном лабораторном практикуме приведены работы, позволяющие освоить расчеты надежности электронных средств.

Лабораторная работа №1. Исследование параметрических методов прогнозирования надежности электронных средств

Цель работы: Исследовать состояние прибора, состоящего из блоков, с помощью статистических методов дифференциального прогнозирования.

Краткие теоретические сведения

Прогнозированием называют научно обоснованное предвидение и оценку основных параметров и характеристик того или иного технологического процесса или ЭС. Прогнозирование необходимо осуществлять на стадиях проектирования, производства и эксплуатации объектов. Состояние Е ЭС удобно характеризовать совокупностью определяющих её параметров e(i), изменяющихся во времени t, и представлять его в виде многомерной функции состояния:
E[e(1),e(2),...,e(к),t].

Очевидно, что в к-мерном пространстве параметров можно выделить некоторые области, в каждой из которых ЭС сохраняет, например, единственное присущее этой области состояние E(i).
Все возможные состояния E(к) называются диагнозами или классами. В простейшем случае их может быть два: диагноз "исправного состояния" и диагноз "неисправного состояния" устройства. Прогноз при этом называется дифференциальной диагностикой. Он наиболее характерен для ЭС.

Состояние можно также характеризовать совокупностью признаков K(v), имеющих в общем случае m(j) разрядов. Если m(j)=2, то это означает, что признак может принимать только два значения: максимум или минимум. Такие признаки называют простыми и используют при диагностике в смысле "да"/"нет".

Под *распознаванием состояния ЭС* понимается отнесение состояния, в котором пребывает система, к одному из заранее установленных классов (диагнозов).

К статистическим методам прогнозирования относятся:
• метод распознавания Байеса;
• метод последовательного анализа;
• метод минимального риска;
• метод наибольшего правдоподобия.
Рассмотрим каждый из них подробно.

Метод распознавания Байеса

Метод Байеса является в настоящее время одним из самых эффективных методов прогнозирования. Он позволяет одновременно учитывать признаки различной физической природы. Метод основан на формуле Байеса, имеющей следующий вид:

$P[D(k)/k(i)] = P[D(k)]\cdot P[K(i)/D(k)]/P[k(i)]$, (1.1)

где: $P[D(k)/K(i)]$ - вероятность постановки диагноза D(k) при наличии исследуемого объекта признака k(i), её называют также апостериорной вероятностью диагноза;

$P[D(k)]$ - вероятность постановки диагноза D(k), вычисляемая по статистическим данным; её называют также априорной вероятностью диагноза;

$P[K(i)/D(k)]$- вероятность появления признака k(i) у объекта с диагнозом D(k);

$P[k(i)]$ - вероятность появления признака k(i) во всех объектах независимо от того, в каком состоянии они находятся.

Перечисленные вероятности вычисляют следующим образом. Если при обследовании n объектов у nk из них обнаружено состояние D(k), то:

$$P[D(k)] = \frac{n_k}{n}.$$

Если среди n_k объектов, имеющих диагноз D(k) , у n_i появится признак k(i), то:

$$P[K(i)/D(k)] = \frac{n_i}{n_k}.$$

Если при исследовании n объектов у n_i из них обнаружен признак k(i), то:

$$P[K(i)] = \frac{n_i}{n}.$$

Формула (1.1) применима только в том случае, когда постановка диагноза для объекта осуществляется только по наличию одного признака (т.е. каждому D[k] соответствует только ему присущий k(k)). Для обследования объектов по нескольким признакам может быть применена обобщенная формула Байеса, которая, по аналогии с (1.1), имеет следующий вид:

$$P[D(k)/\tilde{K}] = P[D(k)]\cdot P[\tilde{K}/D(k)]/P[\tilde{K}], \quad (1.2)$$

где $\tilde{K}$ = {k(1),k(2),... ,k(s)} - конкретная реализация комплекса признаков. Формула (1.2) предполагает, что ЭС одновременно может находиться только в одном состоянии.

Из свойства вероятности вытекает, что:

$$\sum_{k=1}^{N} P[D(k)] = 1,$$

где N - количество состояний.

Это условие важно т.к. им пользуются для проверки правильности расчета. Для диагностически независимых признаков справедливо следующее соотношение:

$$P[\widetilde{K}/D(k)] = \prod_{k=1}^{s} P[\widetilde{k}(i)/D(k)], \qquad (1.3)$$

где $\widetilde{k}$ (1,...,s) - реализация признаков k(1,... ,s). Вероятность появления комплекса признаков P[$\widetilde{K}$] запишется:

$$P[\widetilde{K}] = \sum_{k=1}^{N} P[D(k)] \cdot P[K'/D(k)]. \qquad (1.4)$$

Обобщенная формула Байеса (1.2) с учетом (1.3) и (1.4) может быть записана в следующем виде:

$$P[D(k)/\widetilde{K}] = P[D(k)] \cdot \prod_{k=1}^{s} P[\widetilde{k}(i)/D(k)] / \sum_{k=1}^{N} P[D(k)] \cdot P[\widetilde{K}/D(k)].$$

Очевидно, что:

$$\sum_{k=1}^{N} P[D(k)/\widetilde{K}] = 1.$$

Правило, руководствуясь которым принимают решение о диагнозе технической системы, называется решающим. Решающее правило в методе Байеса следующее:

$\widetilde{K}$ относится к D(K), если:

$$P[D(k)/\widetilde{K}] > P[D(j)/\widetilde{K}],\ j = 1,2,\ldots,N,\ k \neq j,$$

т.е. объект с комплексом реализованных признаков K ~ относят к состоянию (диагнозу) D(k), характеризующемуся наибольшей апостериорной вероятностью. Для большей определенности решающее правило уточняют введением порогового значения P(i) для вероятности диагноза, обычно P(i)≥0,9. Условие постановки диагноза D(k) при этом запишется:

$$P[D(k)/\widetilde{K}] \geq P(i).$$

Если оказывается, что:

$$P[D(k)/\widetilde{K}] \leq P(i),$$

то решение о постановке диагноза не принимается и для этого необходима дополнительная информация.

Недостаток метода Байеса состоит в том, что он требует сравнительно большого объема диагностической информации. Это и является основным ограничением для его применения.

Метод последовательного анализа

Этот метод получил широкое применение в дифференциальной диагностике для распознавания двух состояний из-за того, что в отношении вычислительных затрат он более экономичен, чем метод Байеса. Если в последнем число обследований изучаемого объекта заранее определено, то в методе последовательного анализа их проводится ровно столько, сколько необходимо для принятия решения о диагнозе с минимальным риском.

В методе последовательного анализа отношение вероятностей появления признаков k(i) при известных диагнозах D(1) и D(2) составляются последовательно. Сначала составляется соотношение для первого признака к(1), затем (если это необходимо) для признака к(2) и т.д. При этом каждое отношение оценивается, т.е. сравнивается с верхней: А и нижней: В границами решения о постановке диагноза.

Если очередное такое соотношение не даёт возможности поставить диагноз, то составляется следующее. Эта процедура выполняется вплоть до того, пока не появится возможность принять обоснованное решение. Указанное отношение вероятностей называется отношением правдоподобия.

Если отношение правдоподобия:

$$P[\tilde{k}\ (l) / D(2)] / P[\tilde{k}\ (l) / D(l)] > A,$$

то $\tilde{K}$ относится к D(2), т.е. ставится диагноз D(2). Если:

$$P[\tilde{k}\ (l) / D(2)] / P[\tilde{k}\ (l) / D(l)] < B,$$

то $\tilde{K}$ относится к D(1), т.е. ставится диагноз D(1). Если имеет место неравенство вида:

$$B < P[\tilde{k}\ (l) / D(2)] / P[\tilde{k}\ (l) / D(l)] < A,$$

то принять решение о постановке диагноза для объекта не представляется возможным. Необходимо его дальнейшее обследование по очередному признаку к(2) и т.д. вплоть до принятия решения.

Обследование диагностируемого объекта всегда следует начинать по наиболее информативному признаку и продолжать с последовательным уменьшением информативности. При этом можно смело полагать, что в выражении:

$$P[\tilde{k}\ (l) / D(2)] / P[\tilde{k}\ (l) / D(1)]$$

вероятность заменяется частотой появления данного признака при соответствующих диагнозах.

Метод наименьшего риска

Прежде, чем изложить этот метод, рассмотрим ошибки, имеющие место быть при прогнозировании состояния ЭС, и определим понятие риска. Условимся, что D(1) - исправное состояние, а D(2) - неисправное. При постановке диагноза могут быть допущены два рода ошибок. Ошибка 1 рода:

ставится диагноз D(2) вместо D(1) - ложная тревога или риск поставщика. Ошибка 2 рода: ставится диагноз D(1) вместо D(2) – пропуск цели или риск заказчика. Естественно, что ошибки 2 рода более опасны. Поэтому ошибки 1 и 2 рода имеют разные цены (веса). Метод наименьшего риска, как и предыдущие, относится к статистическим, но отличается от них правилом принятия решения. В этом методе решающее правило выбирается из условия оптимальности, которым является минимум риска.

Будем считать, что процесс распознавания ЭС производится при наличии одного диагностического признака и считать, что априорные вероятности диагнозов P[D(1)] и P[D(2)] нам заранее известны из статистических данных.

Обозначим диагностируемый параметр через x. Тогда задачу распознавания можно сформулировать так: необходимо выбрать граничное (оптимальное) значение параметра x, равное x(0), такое, чтобы при x<x(0) диагностируемая ЭС находилась в исправном состоянии (диагноз D(1)), а при x>x(0) выходила из строя (диагноз D(2)). Решающее правило для постановки диагноза будет при этом следующее:

при x<x(0), x относится к D(l),

при x>x(0), x относится к D(2). (1.5)

Обозначим возможные решения, которые в принципе могут быть выбраны в соответствии с решающим правилом (1.5), через H(i,j), где i-означает поставленный диагноз, а j - действительное состояние системы. Тогда очевидно, что правильными решениями будут H(1,1) и H(2,2) (т.е. когда поставленный диагноз совпадает с действительным). Решение H(1,2) означает пропуск цели или риск заказчика, а H(2,1) ложную тревогу или риск поставщика.

Будем считать, что цена (вес) принятия неправильного решения P[H(1,2)] - пропуска цели - равна C(1,2), а цена решения P[H(2,1)] - ложной тревоги - C(2,1). Обозначим цены правильных решений H(1,1) и H(2,2) через C(1,1) и C(2,2) соответственно.

Тогда риск принятия решения будет равен сумме вероятностей возможных ошибок с учетом их весов:

$$R = C(1,2) \cdot P[H(1,2)] + C(2,1) \cdot P[H(2,1)].$$

Из условия получения минимума риска R_{min} определим граничное значение x(0) в правиле (1.5).

Решающее правило метода минимального риска с учетом введенных обозначений будет иметь следующий вид:

x относится к Б(1), если $\dfrac{f[x/D(1)]}{f[x/D(2)]} < \dfrac{P[D(2)] \cdot [C(1,2) - C(2,2)]}{P[D(1)] \cdot [C(2,1) - C(1,1)]}$, (1.6)

x относится к Б(2), если $\dfrac{f[x/D(1)]}{f[x/D(2)]} > \dfrac{P[D(2)] \cdot [C(1,2) - C(2,2)]}{P[D(1)] \cdot [C(2,1) - C(1,1)]}$, (1.7) где f[x/D(1)] и f[x/D(2)] - плотности распределения соответствующих вероятностей. Они подчинены нормальному закону, т.е.:

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \mathbf{exp}\left(\frac{(x-\overline{x})^2}{2 \cdot s^2}\right).$$

Тогда очевидно, что x(0) будет лежать между Y1 и Y2 – центрами распределений f[Yl/D(l)] и f[Y2/D(l)] при заведомо известных диагнозах.

Условие (1.6) соответствует x<x(0), а (1.7) - x>x(0). Пороговым значением отношения правдоподобия считают величину:

$$L = \frac{P[D(2)]}{P[D(1)]} \cdot \frac{[C(1,2) - C(2,2)]}{[C(2,1) - C(1,1)]} . \qquad (1.8)$$

Если цены принятия правильных решений C(1,1) и C(2,2) не учитывают, то выражение (1.8) принимает следующий вид:

L= (P[D(2)] · C(1,2)) / (P[D(1)] · C(2,1). (1.9)

Пример

Пусть для исправного состояния Y1 = 400 и s = 15. При неисправном состоянии Y2= 430 и s = 50 (здесь s - среднеквадратическое отклонение). Априорное значение P(1)=5% и C(1,2)/C(2,1)=50. Цены C(1,1) и C(2,2) не учитываются.

Найти x(0).

Решение

P(1)=5%,=> P(2)=95% и при известном C(1,2)/C(2,1) получаем:

$$L = \frac{0{,}05}{0{,}95} \cdot 50 = 2{,}632\,;$$

$$\frac{f(x(0)/D(1))}{f(x(0)/D(2))} = L = 2{,}632\,;$$

$$f(x(0)/D(1)) = \frac{1}{15\sqrt{2\pi}} \cdot \mathbf{exp}\left(\frac{(x-400)^2}{2 \cdot 15^2}\right),$$

$$f(x(0)/D(2)) = \frac{1}{50\sqrt{2\pi}} \cdot \mathbf{exp}\left(\frac{(x-430)^2}{2 \cdot 50^2}\right),$$

$$x^2 - 0{,}794 \cdot 10^3 x + 15{,}74 \cdot 10^4 = 0,$$

$$x(0) = 411{,}46.$$

Метод наибольшего правдоподобия

Этот метод для записи своего решающего правила использует следующее отношение правдоподобия:

х относится к D(1), если $\dfrac{f[x/D(1)]}{f[x/D(2)]} > 1;$

х относится к D(2), если $\dfrac{f[x/D(1)]}{f[x/D(2)]} < 1,$

где х - диагностируемый параметр исследуемого объекта.

Оптимальное значение (граничное) х = х(0) находят из следующего условия:

f[x/D(l)] = f[x/D(2)].

Учитывая, что:

$$\frac{f[x(0)/D(1)]}{f[x(0)/D(2)]} = \frac{P[D(2)]\cdot[C(1,2)-C(2,2)]}{P[D(1)]\cdot[C(2,1)-C(1,1)]},$$

видно, что они совпадают, если:

$$\frac{P[D(2)]\cdot[C(1,2)-C(2,2)]}{P[D(1)]\cdot[C(2,1)-C(1,1)]} = 1. \qquad (1.10)$$

В большинстве практических задач используют условие (1.9), поэтому, (6.10) принимает вид:

(P[D(2) · C(1,2))/(P[D(1)]· C(2,1)) =1

Точность предсказаний, которую гарантируют рассмотренные методы, примерно одного порядка, но для их использования требуется различный объём статистической информации. Наибольший он в методе Байеса, наименьший - в методе последовательного анализа. Выбор метода зависит от конкретных решаемых задач, что проиллюстрировано в данной лабораторной работе. Однако следует иметь в виду, что в инженерной практике все же наибольшее распространение получили методы последовательного анализа и минимального риска.

Выполнение данной лабораторной работы включает в себя два этапа.

1. Определение работоспособности отдельных блоков на основании статистической информации с помощью методов минимального риска и наибольшего правдоподобия.

2. Определение работоспособности прибора в целом на основе данных из предыдущего пункта с помощью методов Байеса и последовательного анализа.

Исходные данные и порядок выполнения работы

Исходные данные

Прибор состоит из 6 блоков, каждый из которых характеризуется определенными параметрами, заданными в варианте.

Этап 1

Условия задачи для расчета одного блока. Дано:

• для исправного состояния (диагноз D(1)): среднее значение параметра Y1 и его среднеквадратическое отклонение σ_1;
• для неисправного состояния (диагноз D(2)): Y2 и σ_2;
• соотношение стоимостей пропуска цели C(1,2)/C(2,1) = 50;
• априорная вероятность выхода блока из строя P[D(2)];
• имеющееся значение параметра Y.

Необходимо получить предельное значение параметра Y0, при котором еще можно продолжить эксплуатацию, и данные о работоспособности каждого блока, определяемые на основе сравнения Y0 (полученного методом минимального риска) с имеющимся значением параметра Y.

Результатом первого этапа является получение набора признаков для выполнения второго этапа.

Этап 2

Условия задачи для расчета прибора. Дано:

• данные о работоспособности каждого блока (из предыдущего этапа);

• кратность резервирования блока;

• априорная вероятность выхода прибора из строя P[D(2)];

• границы принятия решений: A=4 и B=0,25 (для метода последовательного анализа).

Задание

• зная кратность резервирования блоков (отношение суммы основных и резервных блоков к количеству основных) и данные об их работоспособности, определить вероятности выхода прибора из строя P[k(l)/D(k)] при наличии того или иного признака (см. пример ниже);

• получить вероятность суммарного диагноза, причем в методе последовательного анализа очередность выбора признака определяется из полученных вероятностей P[k(i)/D(k)]. При защите объясните свой выбор.

Примечание. Если по результатам первого этапа все блоки исправны, то второй этап не выполняется.

Для определения вероятностей P(k(i)/D(k)) воспользуйтесь следующим примером.

Пример

Пусть имеются следующие данные о кратности резервирования и работоспособности блоков (см. табл. 1.1), где 1 – блок работоспособен, 0 - неработоспособен.

Таблица 1.1

№ блока	Работоспособность	Кратность резервирования
1	1	1
2	0	2
3	1	3
4	0	4
5	0	5
6	1	10

Тогда, работоспособность резервных блоков распределяется так: P(k(1)/D(2)) = 00%, P(k(2)/D(2)) = 50%, P(k(3)/D(2)) = 00%, P(k(4)/D(2)) = 25%, P(k(5)/D(2)) = 20%, P(k(6)/D(2)) = 00%,
и выполняется условие:

P(k(i) D(1))=1− P(k(i) D(2)).

Порядок работы

1. Ознакомиться с краткой теорией по работе, и получить у преподавателя номер варианта задания.

2. Запустить программу, ввести исходные данные к первому этапу работы (см. табл. 1.2 и 1.3).

3. Выполнить расчеты для первого этапа.

4. Выполнить второй этап. Для этого определить вероятности P(k(i)/D(k)) (аналогично рассмотренному примеру) и ввести их в соответствующие графы таблицы. Ввести кратность резервирования по каждому блоку.

5. Выполнить расчеты.

Содержание отчёта

• цель работы;

• краткие теоретические сведения;

• результаты работы;

• выводы по работе (объяснение результатов).

Варианты

Таблица 1.2

Номер варианта	Номер блока	Параметр Y	Исходное состояние		Неисправное состояние		Вероятность выхода из строя σ, %
			Y_1	σ_1	Y_2	σ_2	
1	1	404	400	15	430	50	5
	2	316	290	10	360	40	10
	3	204	200	7	210	30	4
	4	530	470	20	570	60	13
	5	643	590	12	650	55	6
	6	660	620	16	670	36	8

2	1	116	100	7	128	30	8
	2	52	50	2	58	20	5
	3	370	350	14	400	37	9
	4	720	700	22	760	50	4
	5	805	800	25	890	60	3
	6	925	900	24	960	50	6
3	1	510	500	10	520	20	1
	2	12	10	1	13	5	2
	3	4050	4000	40	4200	60	12
	4	625	620	15	670	45	8
	5	125	100	5	128	20	8
	6	55	50	4	58	27	5
4	1	610	590	18	650	64	6
	2	475	470	16	568	50	13
	3	355	350	12	400	35	9
	4	209	200	8	210	26	4
	5	726	700	30	760	55	4
	6	302	290	9	360	11	10
5	1	810	800	23	890	55	3
	2	414	400	17	430	48	5
	3	930	900	28	960	60	6
	4	508	500	10	510	30	1
	5	51	50	4	58	16	5
	6	55	50	4	58	27	5

Таблица 1.3

Номер варианта	Номер блока	Кратность резервирования	Априорная вероятность выхода прибора из строя, %
1	1	2	24
	2	3	
	3	2	
	4	4	
	5	5	
	6	2	
2	1	4	30
	2	2	
	3	3	
	4	2	
	5	2	
	6	5	

3	1	3	10
	2	4	
	3	2	
	4	5	
	5	2	
	6	3	
4	1	2	40
	2	4	
	3	3	
	4	5	
	5	3	
	6	2	
5	1	4	15
	2	5	
	3	3	
	4	2	
	5	3	
	6	2	

Контрольные вопросы

1. Что называют прогнозированием?
2. Какие бывают состояния у ЭС?
3. Что такое диагноз?
4. Чем отличаются ошибки 1-го и 2-го рода? Какая из них опаснее?
5. Какие методы используются для прогнозирования в работе?
6. В чем достоинства и недостатки метода Байеса?
7. Что такое риск, и от каких параметров он зависит?
8. Что такое кратность резервирования?
9. В чем недостатки резервирования?
10. Как распределяется вероятность работоспособности по резервным блокам?
11. Чему равно пороговое значение для решающего правила метода Байеса?
12. Что произойдет, если пороговое значение будет меньше (больше) данной границы?
13. Может ли быть диагнозов больше двух? Какой метод диагностирования при этом необходимо использовать?

Лабораторная работа №2. Расчет надежностных характеристик функционирования электронных средств

Цель работы: В данной лабораторной работе ставится цель дать студенту общее представление об оптимизации надежности устройства на основе результатов матричных испытаний.

Краткие теоретические сведения

Суть метода матричных испытаний и задачу оптимизации надежности по результатам этих испытаний поясним на примере устройства, работоспособность которого существенным образом зависит только от двух параметров X_1 и X_2.

Пусть диапазон возможного изменения этих параметров задан интервалами [$X_{1мин}$, $X_{1макс}$], [$X_{2мин}$, $X_{2макс}$]. Разобьем эти интервалы эквидистантно на $l(1)$ и $l(2)$ квантов соответственно (см. рис. 2.1). В качестве представителей квантов выберем значения параметров, соответствующие серединам квантов. При этом, если устройство оказывается неработоспособным (работоспособным) при данном значении параметра, соответствующем представителю кванта, то мы будем считать, что схема не работает (работает) при всех значениях параметров, лежащих в этом кванте.

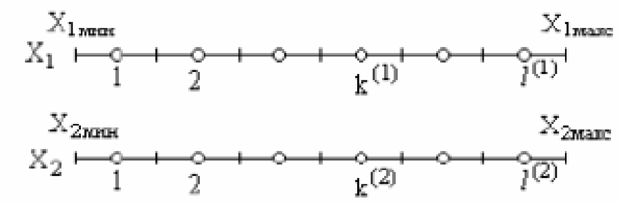

Рисунок 2.1 – Квантование диапазонов возможного изменения двух определяющих параметров

Введем понятие ситуации, где под ситуацией будем понимать такое состояние устройства, когда каждый из его двух определяющих параметров (для двумерного случая) принимает значение, соответствующее представителю определенного кванта. Это определение легко распространяется на *n*-мерный случай. Число всех возможных ситуаций устройства в двумерном случае, очевидно, равно:

$N_2 = l^{(1)} \cdot l^{(2)}$.

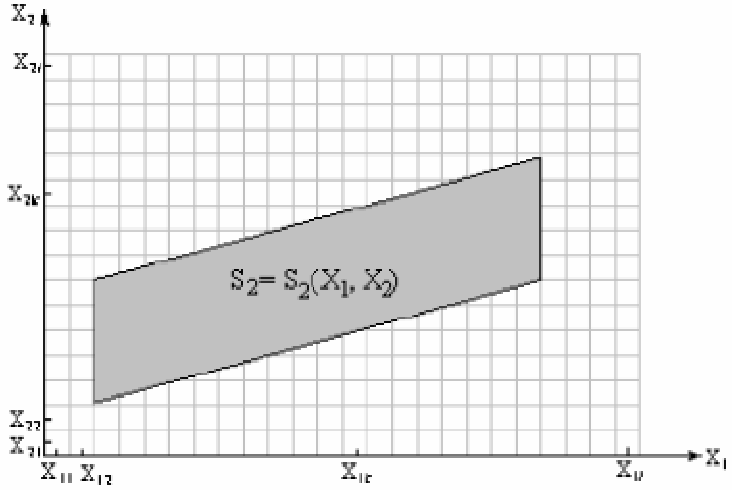

Рисунок 2.2 – Область работоспособности ЭС

Перебрав в какой-либо последовательности все несовместные ситуации устройства и установив их характер (т.е. установив, является ли при данной ситуации устройство работоспособным или нет), мы получим область работоспособности исследуемого устройства $S_2(X_1, X_2)$ для выбранного или заданного критерия его отказа. Так, на рис. 2.2 для примера показана двухмерная область работоспособности ЭС при заданном критерии отказа.

Знание области работоспособности исследуемого устройства является необходимым условием для решения ряда различных задач, обычно рассматриваемых в теории надежности радиоэлектронных систем и, в частности задачи оптимизации надежности устройства, путем выбора номинальных значений определяющих параметров, соответствующими центру тяжести области работоспособности.

В общем случае работоспособность ЭС может существенным образом зависеть от *n* определяющих входных параметров $X_1, X_2, \ldots, X_n$.

Под определяющими входными параметрами могут пониматься как характеристики различных сигналов или компонентов устройства, так и внешние факторы, воздействующие на его функционирование, например, температура окружающей среды, механические нагрузки и т.п. Задаваясь определенным выходным уровнем срабатывания исследуемого устройства (который в частном случае может совпадать с заданным или выбранным критерием его отказов), всегда можно определить разумный диапазон изменения определяющих входных параметров, который следует учитывать при проведении матричных испытаний. Этот диапазон изменения, в принципе, может быть и неограниченным. Интервал (диапазон) изменения *j*-

го определяющего входного параметра устройства [$X_{jмин}$, $X_{jмакс}$] при проведении матричных испытаний разбивается на $l^{(j)}$ квантов, причем:

$j = 1, 2, \ldots, n$; $k^{(j)} = 1, 2, \ldots, l^{(j)}$.

(см. рис.2.3). Представителем крайнего кванта, соответствующего началу или концу диапазона изменения X_j, мы будем по-прежнему считать его середину.

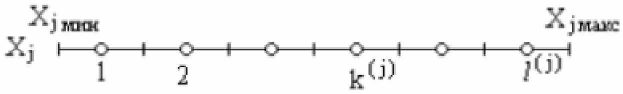

Рисунок 2.3 – Квантование диапазона возможного изменения j-го определяющего параметра

Для моделирования возможных состояний исследуемого безынерционного устройства с n определяющими параметрами составим матрицу ситуаций, где под ситуацией будем понимать состояние устройства, когда каждый из его n определяющих параметров принимает значение, соответствующее представителю определенного кванта. Причем, очевидно, что в каждой ситуации любой параметр может встретиться только один раз.

Число всех возможных ситуаций равно:

$$N = \prod_{j=1}^{n} l^{(j)}.$$

Упорядоченная определенным образом, например матричным построением, последовательность всех возможных ситуаций устройства обозначается:

$\alpha_1, \alpha_1, \ldots, \alpha_v, \ldots, \alpha_N$.

С принципиальной точки зрения, очевидно, нет никаких трудностей в том, чтобы перебрать все возможные ситуации устройства, т.е. провести матричные испытания устройства. При этом будут автоматически учтены все факторы, влияющие на работоспособность устройства, в том числе и второстепенные, которые при других видах моделирования, как правило, не рассматриваются. Очевидно также, что в ситуациях $\{\alpha_N\}$ учитывается изменение (дискретное) всех определяющих параметров одновременно.

Среди N возможных ситуаций устройства при матричных испытаниях будет обнаружено некоторое количество Q отказовых с точки зрения заданного уровня срабатывания или критерия отказа рассматриваемого устройства.

Таким образом, проведение матричных испытаний позволяет определить n-мерную область работоспособности исследуемого устройства:

$S_n(X_1, X_2, ..., X_n)$.

Для оптимизации надежности устройства необходимо выбрать значения определяющих параметров, соответствующие координатам центра тяжести n-мерной области работоспособности S_n.

Координата центра тяжести по *j*-му параметру определяется следующим образом:

$$X_{jc} = \frac{1}{N - Q} \cdot \Big\{ X_{j1}(N_1 - Q_{j1}) + (X_{j1} + \Delta X_j)(N_1 - Q_{j2}) + \ldots$$

$$\ldots + [X_{j1} + (l^{(j)} - 1)\Delta X_j](N_1 - Q_{jl^{(j)}}) \Big\},$$

где X_{j1} - значение 1-го кванта для *j*-го параметра;

N - число всех ситуаций, соответствующих матричным испытаниям;

Q - число отказовых ситуаций;

Q_{ji} - число отказовых ситуаций при значении i-го кванта *j*-го параметра.

При эквидистантном разбиении:

$$\Delta X_j = X_{j,k^{(j)}+1} - X_{j,k^{(j)}}, \quad N_1 = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} l^{(i)}.$$

Величина:

$$P = 1 - \frac{Q}{N}$$

может характеризовать вероятность безотказной работы или схемную надежность устройства.

Однако следует при этом учитывать, что указанная величина будет, как правило, несколько заниженной по сравнению с действительной, т.к. в данном случае предполагается равная возможность для всех отказовых ситуаций. В действительности, вероятность проявления некоторых ситуаций может быть малой, в то время как вероятность появления других ситуаций - значительно большей.

Сравнение различных методов определения надежности ЭС

Надежность ЭС можно определить, исследуя соответствующие математические и физические модели. Испытаниями таких моделей можно заменить испытания реальных устройств. Возможны три вида испытаний моделей: статистические, испытания при частных значениях входных параметров и матричные.

Статистические испытания проводятся с применением метода Монте- Карло. Идея этого метода состоит в том, что исследуемый случайный процесс моделируется с помощью выбора по жребию отдельных реализаций процесса. Закон выбора реализаций основывается на статистических закономерностях процесса. Метод Монте-Карло представляет собой метод численного решения вероятностных задач.

Испытания при частных значениях входных параметров (наиболее распространенный вид испытаний на моделях), заключается в том, что с помощью датчиков и соответствующих устройств (например, термокамер, барокамер и т.д.) задаются конкретные условия работы модели. Одновременно производится наблюдение за поведением выходных параметров модели. Частным видом таких испытаний являются граничные испытания.

Метод граничных испытаний можно кратко охарактеризовать следующим образом. При заданном критерии отказа исследуемого устройства определяют тем или иным способом все основные параметры, от которых работоспособность устройства зависит существенным образом. Затем из числа этих параметров выбирают один (крайне редко два) характеристический параметр, от которого работоспособность устройства зависит наиболее сильно. Далее, для каждого из основных параметров определяют границы области устойчивой работы исследуемого устройства путем дискретного (через определенный интервал) изменения характеристического параметра и путем непрерывного изменения основного параметра (или наоборот) или дискретного изменения обоих параметров одновременно.

Методу граничных испытаний свойственны следующие недостатки:

1. Выделение характеристического параметра всегда носит достаточно искусственный характер. При испытаниях не учитывается, что в общем случае каждый основной параметр зависит от остальных и это обстоятельство должно существенным образом сказываться на форме области работоспособности исследуемого устройства в соответственно ее границах.

2. Не учитывается одновременно влияние внешних факторов, воздействующих на функционирование устройства.

3. Результаты граничных испытаний не позволяют корректно определять оптимальную рабочую точку в области работоспособности исследуемого устройства.

От перечисленных недостатков свободен метод матричных испытаний, рассмотренный в настоящей лабораторной работе.
В выполняемой работе сделаны следующие допущения:

• Устройство в большей степени зависит от 4 параметров: A, B, C и D.

• Существуют зависимости между A и B, A и C, A и D, но нет взаимосвязей между B, C и D.

• Значения квантов берутся в целочисленном представлении.

• Областью работоспособности устройства считается пересечение всех областей.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическими указаниями. Узнать у преподавателя свой вариант.

2. Выполнить лабораторную работу на ЭВМ:

• ввести границы параметров (необязательно чтобы они совпадали с минимальными и максимальными значениями);

• ввести число квантов К (5…25);

• рассчитать области работоспособности для пар A и B, A и C, A и D;

3. Построить общую область работоспособности устройства (зависимость параметров B, C и D от A).

4. Рассчитать величину вероятности безотказной работы и центры тяжести для всех параметров.

5. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчёта

• цель работы;
• краткие теоретические сведения;
• результаты работы;
• выводы по работе.

Варианты

№ Варианта	Параметры							
	A		B		C		D	
	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
1	371	13181	155	648	522	5610	896	14501
2	448	5669	960	7378	700	12669	156	6043
3	465	5454	959	1932	71	2547	211	9157
4	839	2075	453	933	196	5391	965	9702
5	949	2675	755	2942	106	9404	854	1599
6	694	13618	783	13330	127	10014	824	6270
7	862	3286	462	14721	502	2500	811	13000
8	483	600	248	11782	360	11697	313	12632
9	698	1475	687	12871	80	10640	860	6453
10	464	4133	117	11141	892	1466	162	1308
11	237	8880	73	4570	285	13975	931	11040
12	581	4243	129	8226	460	8108	497	7166
13	984	11421	640	7623	876	12389	899	5698
14	343	1598	474	3382	643	14264	55	4396
15	768	1104	571	10124	855	5077	667	12199

Контрольные вопросы

1. Что называется квантом?
2. Что понимается под понятием ситуация?
3. Как находится область работоспособности исследуемого устройства?
4. Для чего необходимо знать область работоспособности устройства?

5. Что можно принять в качестве определяющего входного параметра?
6. Что можно определить с помощью критерия отказа?
7. Для чего нужно рассчитывать координаты центра тяжести?
8. Почему величина вероятности безотказной работы будет неточной?
9. Какие существуют виды испытаний математических и физических моделей?
10. Какова идея статистических испытаний?
11. Какой вид испытаний наиболее распространен и в чем он заключается?
12. Какие недостатки у метода граничных испытаний?
13. Какой метод лишен недостатков метода граничных испытаний и почему?

Лабораторная работа №3. Исследование методов статистического регулирования технологических процессов при управлении техническим состоянием РЭС.

Цель работы: Исследование методов оптимизации: релаксационного, метода неопределенных множителей Лагранжа, вариационного метода.

Методы оптимизации рассмотрены на примере нижеследующей задачи.

Задача для иллюстрации методов оптимизации

Рассмотрим электронную систему, состоящую из четырёх блоков, каждый из которых должен обязательно функционировать для работы всей системы. Надежность системы может быть улучшена за счет включения в блоки параллельно работающих компонент (резервирования). В табл. 3.1 приведены вероятности функционирования блоков, если они содержат 1, 2 или 3 параллельно включенные компоненты.

Таблица 3.1.

Число компонент	Вероятность функционирования блоков			
	№1	№2	№3	№4
1	0,70	0,50	0,70	0,60
2	0,80	0,70	0,90	0,70
3	0,90	0,80	0,95	0,90

Вероятность успешного функционирования всей системы равна произведению вероятностей надежной работы блоков.

Стоимость включения 1, 2 и 3 параллельных компонент в блоки приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2.

Число компонент	Стоимость блока, тыс. руб.			
	№1	№2	№3	№4
1	0,70	0,50	0,70	0,60
2	0,80	0,70	0,90	0,70
3	0,90	0,80	0,95	0,90

На создание всей системы выделено не более 100 тыс. руб.

Определить необходимое число компонент в каждом из четырех блоков, чтобы максимизировать вероятность успешной работы всей системы.

Краткие теоретические сведения

Метод *неопределенных множителей Лагранжа.*

С помощью метода множителей Лагранжа по существу устанавливаются необходимые условия, позволяющие идентифицировать точки оптимума в задачах оптимизации с ограничениями в виде равенств [3]. При этом задача с ограничениями преобразуется в задачу безусловной оптимизации, в которой фигурируют некоторые неизвестные параметры, называемые множителями Лагранжа.

Рассмотрим задачу оптимизации функции n переменных с учетом одного ограничения в виде равенства. Минимизировать:

$f(x_1,x_2,...,x_n)$, (3.1)

при ограничении:

$h1(x_1,x_2,...,x_n)=0$. (3.2)

В соответствии с методом множителей Лагранжа эта задача преобразуется в следующую задачу безусловной оптимизации:

минимизировать:

$L(x,V)=f(x)-Vh_1(x)$. (3.3)

Функция $L(x,V)$ называется функцией Лагранжа; V – неизвестная постоянная, которая носит название неопределенного множителя Лагранжа. На знак V никаких требований не накладывается.

Пусть при заданном значении $V=V°$ безусловный минимум функции $L(x,V)$ по x достигается в точке $x=x°$ и $x°$ удовлетворяет уравнению $h1(x°)=0$. Тогда, как не трудно увидеть, x минимизирует (3.1) с учетом (3.2), поскольку для всех значений x, удовлетворяющих (3.2):

$h_1(x)=0$ и

$\min(L(x,V)) = \min(f(x))$.

Разумеется, необходимо подобрать значение $V=V°$ таким образом, чтобы координата точки безусловного минимума $x°$ удовлетворяла равенству (3.2). Это можно сделать, если рассматривать V как переменную, найти безусловный минимум функции (3.3) в виде функции V, а, затем, выбрать значение V, при котором выполняется равенство (3.2).

В нашем случае задача безусловной оптимизации записывается в следующем виде:

$L(a_1,a_2,a_3,b_1,b_2,b_3,c_1,c_2,c_3,d_1,d_2,d_3) = 1-(0{,}7a_1+0{,}8a_2+0{,}9a_3)$ *

$*(0{,}5b_1+0{,}7b_2+0{,}8b_3)$ * $(0{,}7c_1+0{,}9c_2+0{,}95c_3)$ * $(0{,}6d_1+0{,}7d_2+0{,}9d_3)$ –

$-V_1(10a_1+20a_2+30a_3+20b_1+$

$+40b_2+50b_3+10c_1+30c_2+40c_3+20d_1+30d_2+40d_3-100)-$

$-V_2(a_1+a_2+a_3-1) - V_3(b_1+b_2+b_3-1) - V_4(c_1+c_2+c_3-1) - V_5(d_1+d_2+d_3-1)$.

Достоинства метода неопределенных множителей Лагранжа:

• простота;

• задача с ограничениями сводится к задаче без ограничений.

Недостатки метода:

• в результате преобразования Лагранжа получается модель не полного подобия, что связано со сложностью объекта;

• при использовании этого метода вносятся погрешности из-за принятых допущений и из-за преобразования систем уравнений, что снижает точность получаемых на модели результатов.

Релаксационный метод

Применяется для отыскания экстремума сложной целевой функции [5, 10]. Идея метода: сложная целевая функция заменяется на сумму простых функций.

Требования к функции: непрерывность и дифференцируемость.

Дано: $L(X)$ - целевая функция, $X = (x_1,x_2,...,x_n)$. Находим оптимум целевой функции. Для этого, полагая:

x_i=const,

находим результат нулевой итерации:

$$L(X) = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)},\ldots, x_n^{(0)}) = C_0.$$

Затем высвобождается переменная x_1 и исследуемая функция примет вид:

$L(x_1) = (x_1, x_2^{(0)}, x_3^{(0)},\ldots, x_n^{(0)})$.

Находим решение, приравняв производную по x_1 нулю:

$$\frac{\partial L(x_1)}{\partial x_1} = 0 \Rightarrow x_1^{(1)}.$$

Т.о. нашли $x_1^{(1)}$, при котором значение целевой функции наилучшее. Затем высвобождается переменная x_2 и, аналогично, отыскивается $x_2^{(1)}$:

$L(x_2) = (x_1^{(0)}, x_2, x_3^{(0)},\ldots, x_n^{(0)})$.

$$\frac{\partial L(x_2)}{\partial x_2} = 0 \Rightarrow x_2^{(1)}.$$

И так далее n раз. После проделанных операций получается:

$$L(X) = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)},\ldots, x_n^{(1)}) = C_1.$$

Дальнейшие релаксации аналогичны. После n релаксаций выбирается решение задачи путем сравнения всех Ci и выбора из них наилучшего.

Оптимальной константе С соответствует оптимальный вектор X° - решение задачи.

Достоинства релаксационного метода:

• простота;

• наглядность.

Недостатки:

• особые требования к целевой функции;

• необходимы аналитические выражения для первых производных;

• метод характеризуется медленной сходимостью.

Для нашего примера:

$\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4$ **→max.**

Возьмем за отправную точку то, что в электронной схеме содержится каждого блока по одной штуке. Тогда:

0,7*0,5*0,7*0,6=0,147.

Шаг 1. Зафиксируем каждое из $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4$ **.** Находим новое значение λ:

0,8*0,5*0,7*0,6=0,168; 20+20+30+20=90<100.

0,7*0,7*0,7*0,6=0,17; 10+40+10+20=80<100,

0,7*0,5*0,9*0,6=0,19; 10+20+30+20=80<100, (*)

0,7*0,5*0,7*0,7=0,17; 10+20+10+30=70<100.

Шаг 2. Берем лучший вариант и начинаем теперь с него:

0,8*0,5*0,9*0,6=0,216; 20+20+30+20=90<100,

0,7*0,7*0,9*0,6=0,265; 10+40+30+20=100<100, (*)

0,7*0,5*0,95*0,6=0,199; 10+20+40+10=90<100,

0,7*0,5*0,9*0,7=0,22; 10+20+30+20=90<100 .

Ответ: 1 блок-1шт; 2 блок-2шт; 3 блок-2шт; 4 блок-1шт.

Вариационный метод

Вариационный метод предполагает алгоритм, построенный по схеме последовательного анализа вариантов [3,10]. С использованием процедур, имеющих своей целью на основании косвенных оценок отбросить все те допустимые решения, среди которых нет оптимального. По мере выполнения этих процедур происходит постепенное сжатие множества конкурентоспособных вариантов. В конце концов, остается один или несколько, которые уже непосредственно сравниваются между собой.

Метод применяется для отыскания минимума или максимума аддитивной функции. Функция называется аддитивной, если она имеет вид:

$$f(X) = \sum_{i=1}^{n-1} f_i(\mathrm{x_i}, \mathrm{x_{i+1}}),$$

где $x_0, x_1, ..., x_n$ - векторы с размерностью $n_0, n_1, ..., n_n$ соответственно.

Ограничения имеют вид:

$x_i \in G_i$, $i = 1,\ldots,n$.

Рассмотрим на нашем примере: $\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4$ →**max.**
Возьмем начальную точку: всех блоков по одной штуке.
Шаг 1.
0,7*0,5*0,7*0,6=0,147;
0,8*0,5*0,7*0,6=0,168; 20+20+10+20=70<100,
0,7*0,7*0,7*0,6=0,17; 10+40+10+20=80<100,
0,7*0,5*0,9*0,6=0,19; 10+20+30+20=80<100,
0,7*0,5*0,7*0,7=0,17; 10+20+10+3 0=70< 100.
Шаг 2. Откидываем наименьшее и рассматриваем оставшиеся:
0,8*0,7*0,7*0,6=0,235; 20+40+10+20=90<100,
0,7*0,8*0,7*0,6=0,235; 10+50+10+20=90<100,
0,7*0,7*0,9*0,6=0,265; 10+40+3 0+20= 100< 100,
0,7*0,7*0,7*0,7=0,224; 10+40+10+3 0=90< 100,
0,8*0,5*0,9*0,6=0,216; 20+20+30+20=90<100,
....
0,7*0,5*0,95*0,6=0,199; 10+20+40+20=90<100, (*)
0,7*0,5*0,9*0,7=0,22; 10+20+3 0+3 0=90< 100,
0,8*0,5*0,7*0,7=0,186; 20+20+10+30=80<100, (*)
....
0,7*0,5*0,7*0,9=0,22; 10+20+10+40=80< 100.
Откидываем (*) и т.д.
Достоинство вариационного метода:
• высокая надежность нахождения оптимального варианта.
Недостаток:
• большая трудоемкость.

Порядок выполнения работы. Задания по работе.

Порядок работы

1. Ознакомиться с краткой теорией по работе, и получить у преподавателя номер варианта задания.
2. Запустить программу, выбрать вариант (см. табл. 3.3 и 3.4), выполнить расчеты.
3. Распечатать полученные результаты.
4. Объяснить полученные результаты.

Содержание отчёта

• Цель работы;
• краткие теоретические сведения;
• результаты работы – распечатка;
• расчет стоимости полученных вариантов системы;
• сравнительный анализ изученных методов;
• выводы по работе (объяснение результатов).

Варианты

Таблица 3.3

Вариант	Число компонент	Стоимость блока, тыс. руб.			
		1	2	3	4
1	1	10	20	10	20
	2	20	30	30	40
	3	30	40	40	60
2	1	10	15	40	25
	2	20	20	45	30
	3	25	40	50	45
3	1	10	15	10	15
	2	20	35	20	45
	3	40	50	40	60
4	1	10	10	10	20
	2	20	40	20	30
	3	30	50	30	40
5	1	20	10	15	25
	2	25	20	25	30
	3	50	30	35	55

Таблица 3.4

Вариант	Число компонент	Вероятность функционирования блока			
		1	2	3	4
1	1	0,50	0,60	0,50	0,60
	2	0,60	0,70	0,70	0,65
	3	0,70	0,80	0,90	0,70
2	1	0,60	0,75	0,75	0,80
	2	0,70	0,80	0,80	0,90
	3	0,95	0,95	0,95	0,95
3	1	0,50	0,60	0,60	0,60
	2	0,75	0,70	0,75	0,65
	3	0,95	0,90	0,95	0,75
4	1	0,70	0,50	0,50	0,60
	2	0,75	0,65	0,55	0,80
	3	0,80	0,70	0,65	0,95
5	1	0,50	0,55	0,60	0,65
	2	0,60	0,75	0,70	0,85
	3	0,95	0,90	0,95	0,90

Контрольные вопросы

1. Раскройте краткую суть метода неопределенных множителей Лагранжа.

2. Раскройте суть релаксационного метода.

3. Расскажите, как работает вариационный метод.

4. В чем основное отличие вариационного метода от других?

5. Перечислите недостатки и достоинства методов.

6. Какой метод обеспечивает наибольшую надежность? За счет чего?

7. Может ли у данной задачи отсутствовать оптимальное решение? Почему?

8. Правильно ли указаны вероятности функционирования блоков в предлагаемых вариантах с учетом заданного вида резервирования?

9. В чем отличие между допустимым и оптимальным решением задачи оптимизации? Может ли оптимальных решений быть несколько?

10. Можно ли применить описанные в работе методы для оптимизации унимодальных функций?

11. Как изменится полученное Вами решение, если стоимость системы сильно увеличить?

12. Предположите, какой вид резервирования использован в работе при такой стоимости зарезервированных элементов?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обеспечение надежности сложных технических систем [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Н. Дорохов [и др.]. – СПб.: Лань, 2011. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=629. – Загл. с экрана.

2. Диагностика и надёжность автоматизированных систем: учебник для вузов / под ред. Б.М. Бржозовского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2008. – 380 с.

3.Бондаренко, И.Б. Управление качеством электронных средств [Электронный ресурс]: Учебное пособие с грифом УМО / И.Б. Бондаренко, Н.Ю. Иванова, В.В. Сухостат. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window/catalog?p_rid=72737. – Загл. с экрана.

4. Бородин, С. М. Обеспечение надежности при проектировании РЭС [Электронный ресурс]: учебное пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – Режим доступа: http://window.edu.ru/window/catalog?p_rid=74509. – Загл. с экрана.

5. Чуканов, С.Н. Визуализация процессов в сложных динамических системах / С.Н. Чуканов. – Омск: ОмГУ, 2003. – 94 с.

6. Мироновский, Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем / Л.А. Мироновский. – СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998. – 256 с.

7. Зарандия, Ж.А. Эксплуатация электрооборудования [Электронный ресурс]: Методические указания / Ж.А. Зарандия, А.А. Иванов. – Электрон. дан. (322 Мб). – Тамбов. Издательство ТГТУ, 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM); 12 см. – Загл. с этикетки диска.

8. Надёжность информационных систем [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.Ю. Громов [и др.]. – Электрон. дан. (452 Мб). – Тамбов: ТГТУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM); 12 см. – Загл. с этикетки диска.