

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тульский государственный университет»
Институт прикладной математики и компьютерных наук
Кафедра «Вычислительная техника»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

по дисциплине

Введение в надежность программного обеспечения

Уровень профессионального образования: *(высшее образование
– бакалавриат.)*

Направление подготовки: *09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»*

Профиль подготовки: *Системы автоматизированного проектирования*

Квалификация выпускника: *62 - бакалавр*

Форма обучения: *очная, очно-заочная, заочная, заочная сокращенная*

Тула 2016 г.

Методические указания к лабораторным работам составлены к.т.н. доц. Ю.В. Французовой и обсуждены на заседании кафедры *вычислительной техники*, института *прикладной математики и компьютерных наук*

протокол № 1 от " 29 " августа 2016 г.

Зав. кафедрой _____ А.Н. Ивутин

Лабораторная работа № 1

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОБ ОТКАЗАХ ИЗДЕЛИЙ

Время выполнения лабораторной работы (аудиторные часы) – 4 часа.
Время самостоятельной работы студента (дополнительные часы) – 4 часа.

Цель работы: изучение методики обработки экспериментальной информации об отказах изделий и расчета показателей надежности.

Ключевые понятия, которые необходимо знать: надежность, отказ, основные показатели надежности.

Оборудование и программное обеспечение: работа выполняется на ПЭВМ типа IBM PC с использованием пакета прикладных программ MathCad.

Для выбора критерия надежности необходимо иметь развитую систему количественных показателей, характеризующих надежность объекта. Учитывая, что время работы до отказа изделия – величина случайная, в качестве показателей надежности можно использовать: вероятность исправной работы объекта на определенном интервале времени, вероятность отказа объекта и т. д.

Основной характеристикой случайной величины является ее функция распределения. Зная закон распределения, можно вычислить любые другие ее характеристики. Хотя число потенциально возможных моделей распределения чрезвычайно велико, практически находит применение относительно небольшое их число.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Подбор распределений для эмпирических данных

Функция распределения для эмпирических данных может быть подобрана двумя методами:

- графическим;
- методом статистической проверки гипотез.

1.1. Графический метод

Графический метод самый простой. Он может быть использован для разведочного анализа данных. Применение метода зависит от способа представления результатов экспериментов.

Если результаты экспериментов представлены в виде статистической выборки – массив наработки (в любых единицах измерения) до отказа каждого объекта, то экспериментальные данные разбиваются на интервалы, затем строится гистограмма частот попадания значений в эти интервалы.

Если результаты экспериментов представлены в виде количества отказов в исследуемые интервалы времени (как в данной работе), предварительная обработка не проводится.

Гистограмма частот сравнивается с различными теоретическими функциями распределения. В качестве гипотетической функции распределения выбирается наиболее «похожая». После этого необходимо провести более точную проверку на соответствие выбранной функции распределения эмпирическим данным.

1.2. Статистическая проверка гипотез

Предположим, что в результате графического подбора функции распределения для некоторой случайной величины ξ была выбрана функция $F(x)$. Для проверки гипотезы о соответствии закона распределения ξ функции распределения $F(x)$ необходимы критерии, которые позволяли бы судить, согласуются ли наблюдаемые значения $x_1, x_2, \dots, x_n$ величины ξ с выбранной функцией распределения.

Пусть $x_1, x_2, \dots, x_n$ – случайная выборка и пусть $F_n^*(x)$ – эмпирическая функция распределения выборки.

Определим некоторую неотрицательную меру D отклонения эмпирической функции распределения $F_n^*(x)$ от теоретической $F(x)$: $D = D(F_n^*, F)$. Величину D можно определить многими способами, в соответствии с которыми получают различные критерии для проверки интересующей гипотезы. Например, можно положить

$$D\{F_n^*, F\} = \sup_x |F_n^*(x) - F(x)|,$$

где $\sup$ – верхняя грань по x , или

$$D\{F_n^*, F\} = \int_{-\infty}^{\infty} [F_n^*(x) - F(x)]^{2k} g(x) dx,$$

где $g(x) \geq 0$, $\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx < \omega$.

В первом случае для проверки гипотезы получим критерий Колмогорова, во втором случае (при $k = 1$) – критерий ω^2 Мизеса.

Величина D является функцией случайных величин, поэтому сама является случайной величиной.

Пусть выдвинутая гипотеза верна, т. е. $F_n^*(x) = F(x)$. Тогда распределение случайной величины D может быть найдено. Зададим малое число $\varepsilon > 0$, столь малое, что можно считать практически невозможным осуществление события с вероятностью ε в единичном опыте. Считая известным распределение случайной величины D , можно найти такое число D_0 , что $P\{D > D_0\} = \varepsilon$.

По имеющимся данным $x_1, x_2, \dots, x_n$ строим функцию $F_n^*(x)$ и вычисляем величину $D\{F_n^*, F\}$. Если полученная при этом величина D ока-

жется больше D_0 , то это означает, что событие с вероятностью ε произошло, т. е. гипотеза отвергнута опытом.

Число ε , выбор которого зависит от характера задачи, называют уровнем значимости критерия, а величину D_0 , определяемую из условия $P\{D > D_0\} = \varepsilon$ – пределом значимости.

1.3. Критерии значимости, используемые в теории надежности

1.3.1. Критерий Хи-квадрат. Наиболее употребительная мера отклонения эмпирической функции распределения F_n^* от теоретической F была введена Пирсоном. Рассмотрим эту меру. Разобьем множество значений величины ξ на r множеств $S_1, S_2, \dots, S_r$ без общих точек. Обычно такое разбиение осуществляется при помощи $(r - 1)$ чисел $a_1 < a_2 < \dots < a_r$. При этом правый конец каждого интервала исключается из соответствующего множества.

Пусть $p_i, i = 1, 2, \dots, r$ – вероятность того, что величина ξ принадлежит множеству S_i .

Пусть $v_i, i = 1, 2, \dots, r$ – количество величин из числа $x_1, x_2, \dots, x_n$ принадлежащих множеству S_i . Тогда v_i/n – частота попадания величины ξ в множество S_i при n наблюдениях. Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^r v_i = n; \quad \sum_{i=1}^r \frac{v_i}{n} = 1.$$

Для приведенного разбиения p_i есть приращение гипотетической функции распределения на множестве S_i , а v_i/n – приращение эмпирической функции F_n^* выборки на том же множестве.

За меру D отклонения эмпирической функции от теоретической принимается величина

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(v_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}.$$

Для проверки истинности гипотезы необходимо задать уровень значимости ε , затем по таблице для предельного (при $n \rightarrow \infty$) распределения χ^2 с $(r - 1)$ степенями свободы найти предел значимости χ_ε^2 . Если для данной выборки окажется, что $\chi^2 > \chi_\varepsilon^2$, то гипотеза отвергается.

Применение критерия χ^2 дает хорошие результаты во всех случаях, когда величины $n \cdot p_i \geq 10, i = 1, 2, \dots, r$.

1.3.2. Критерий Колмогорова. Как и в предыдущем случае, гипотетическая функция распределения полностью определена и непрерывна. Ме-

ра D отклонения эмпирической функции распределения $F_n^*(x)$ от гипотетической $F(x)$, предложенная А. Н. Колмогоровым, определяется следующим образом:

$$D_n = D\{F_n^*, F\} = \sup_x |F_n^*(x) - F(x)|,$$

где $\sup$ – верхняя грань множества по всевозможным значениям x .

Предельное распределение D_n при $n \rightarrow \infty$ дает теорема Колмогорова.

Если функция распределения $F(x)$ непрерывна, то при $n \rightarrow \infty$

$$P(\sqrt{n}, D_n < x) = K(x) = \begin{cases} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 x^2}, & \text{при } x > 0 \\ 0, & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Проверка истинности гипотезы производится так же, как и по χ^2 . Предел значимости K_ε можно найти по таблице распределения Колмогорова или вычислить по вышеуказанному выражению.

Следует отметить, что ввиду сложности вычисления предельного значения, данный критерий согласия иногда используется для непосредственного сравнения со значениями, рассчитанными для других гипотез. В этом случае можно говорить о принятии гипотезы с наименьшим значением критерия D_n .

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В промышленных условиях были проведены испытания N невосстанавливаемых одинаковых объектов, результаты испытаний зафиксированы в таблице с указанием границ временных интервалов и количества отказов, произошедших на данном интервале наблюдения.

По результатам эксперимента необходимо:

- а) определить закон распределения случайной величины τ – наработки на отказ;
- б) рассчитать основные показатели надежности для данного вида объектов.

ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Для заданной выборки чисел, представляющих собой наработки объектов и соответствующие количества отказов при этих наработках, определить основные характеристики и подобрать закон распределения (задание по вариантам приведено в приложении А, номер варианта устанавливается преподавателем). В качестве критерия для проверки соответствия закона распределения использовать критерии Хи-квадрат и Колмогорова-Смирнова.

2. Рассчитать следующие показатели надежности и построить графики:

- а) плотность распределения отказов;

- б) функция распределения отказов;
 - в) функция выживаемости;
 - г) интенсивность отказов.
3. Оформить отчет о проделанной работе, который должен содержать:
- распечатку исходных данных;
 - сводку статистик;
 - результаты тестов для выбранного закона распределения;
 - графики;
 - выводы по каждому пункту работы.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Выполнение лабораторной работы разбито на два этапа:

Этап 1. Определение закона распределения по исходным данным.

Этап 2. Расчет основных показателей надежности для заданной выборки.

Выполнение этапа 1

Шаг 1. Обработка исходных данных.

Построение гистограммы наработки до отказа. Для этого необходимо:

- определить интервал наработки $[t_{\min}, t_{\max}]$ и его длину

$$\zeta t = t_{\max} - t_{\min}$$

(в данной работе время начала эксперимента считается равным нулю);

- определить Δt – шаг гистограммы:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i;$$

- подсчитать частоты появления отказов во всех k интервалах:

$$\overline{p_i} = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N},$$

где $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале $[t_i, t_i + \Delta t]$.

Очевидно, что

$$\sum_0^k \overline{p_i} = 1;$$

- полученный статистический ряд представить в виде гистограммы.

Шаг 2. Используя знания, полученные в процессе обучения, и изложенный выше теоретический материал, подобрать закон распределения наработки на отказ. В качестве критерия для проверки соответствия закона распределения использовать критерии Хи-квадрат и Колмогорова-Смирнова.

Выполнение этапа 2

Шаг 1. Расчет эмпирических функций.

Используя данные сформированного статистического ряда, определяются статистические оценки показателей надежности, так называемые эмпирические функции:

- функция распределения отказов (оценка ВО):

$$\bar{Q}(t_{\min}) = \frac{n(t_{\min})}{N} = 0,$$

$$\bar{Q}(t_1) = \frac{n(t_1)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1)}{N},$$

$$\bar{Q}(t_2) = \frac{n(t_2)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1) + \Delta n(t_1, t_2)}{N},$$

...

$$\bar{Q}(t_{\max}) = \frac{n(t_{\max})}{N};$$

- функция надежности (оценка ВБР):

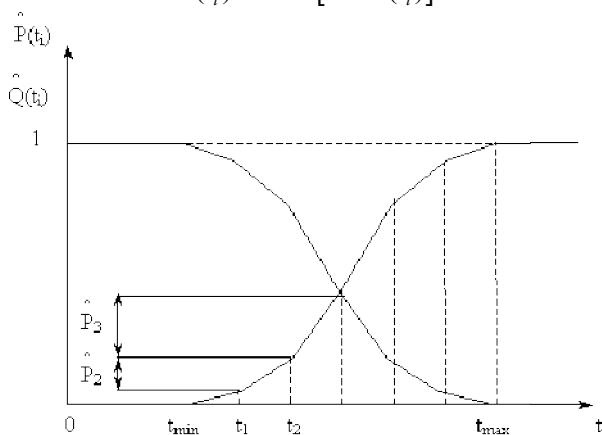
$$\bar{P}(t_i) = 1 - \bar{Q}(t_i);$$

- плотность распределения отказов (оценка ПРО):

$$\bar{f}(t_i) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N \cdot \Delta t} = \frac{\bar{P}_i}{\Delta t};$$

- интенсивность отказов (оценка ИО):

$$\bar{\lambda}(t_i) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N(t_i) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{[N - n(t_i)] \cdot \Delta t}.$$



К:

1 2 3 4 5 6

Рис. 5. Оценка ВО и ВБР

Шаг 2. Расчет статистических оценок числовых характеристик.

Для расчета статистических оценок числовых характеристик можно воспользоваться данными сформированного статистического ряда.

Оценки характеристик определяются по следующим формулам:

– *оценка средней наработки до отказа (статистическое среднее наработки)*:

$$\overline{T}_0 = \sum_{i=1}^k \overline{t}_i \cdot \overline{P}_i,$$

где $\overline{t}_i$ – значение, равное середине каждого временного интервала, $\overline{t}_i = t_i + \Delta t / 2 = t_{i+1} - \Delta t / 2$, то есть среднее значение наработки в интервале;

– *оценка дисперсии наработки до отказа (эмпирическая дисперсия наработки)*:

$$\overline{D} = \sum_{i=1}^k (\overline{t}_i - \overline{T}_0)^2 \cdot \overline{P}_i;$$

– *оценка СКО*:

$$\overline{D} = \overline{S}^2.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Перечислите основные показатели надежности.
2. Каковы правила выбора показателей надежности?
3. Назовите законы распределения наработки до отказа, наиболее распространенные в теории надежности.
4. Как проверяется согласие эмпирического закона распределения случайной величины и выдвинутой гипотезы?
5. Что такое квантиль функции распределения случайной величины?
6. В каких случаях на практике встречается экспоненциальный закон распределения наработок до отказа?
7. Какие отказы чаще всего приводят к распределению наработок по закону Вейбулла?
8. Назовите признаки и свойства простейшего потока отказов.
9. Как использовать коэффициент вариации для обоснования гипотезы о характере закона распределения случайной величины?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ СО СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Время выполнения лабораторной работы (аудиторные часы) – 4 часа.
Время самостоятельной работы студента (дополнительные часы) – 4 часа.

Цель работы: закрепить теоретические знания и приобрести практические навыки по применению математических методов исследования надежности систем.

Ключевые понятия, которые необходимо знать: структурная избыточность, коэффициент готовности.

Для исследования показателей надежности систем обработки информации в качестве математического аппарата применяется теория вероятностей, теория случайных процессов, алгебра логики. Данная работа посвящена построению и анализу модели для изучения одного из показателей надежности, а именно коэффициента готовности системы (вероятности существования работоспособного пути между узлами сети) передачи данных. Для построения модели используется аппарат теории вероятностей и алгебра логики.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Комплексные показатели надежности

При расчетах показателей надежности как восстанавливаемых, так и невозстанавливаемых объектов можно использовать комплексные показатели надежности изделий.

Нестационарный коэффициент готовности $K_z(t)$ есть вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в момент времени t в периоде применения по назначению. Используя статистические данные, можно оценить нестационарный коэффициент готовности с помощью соотношения

$$K_z(t) = \frac{N(t)}{N(0)},$$

где $N(t)$ – число работоспособных в момент времени t изделий из общего числа изделий $N(0)$.

В практических задачах обычно используют *стационарное значение коэффициента готовности k_z* , к которому стремится функция $K_z(t)$ при $t \rightarrow \infty$:

$$k_z = \lim_{t \rightarrow \infty} K_z(t) = \frac{N}{N(0)},$$

где N – число работоспособных изделий из общего числа изделий $N(0)$ в произвольный момент времени стационарного периода эксплуатации.

Коэффициент оперативной готовности – это комплексный показатель надежности, определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени t .

$$K_{o.e.}(t) = K_e \cdot P(t_x, t),$$

где $P(t_x, t)$ – условная вероятность безотказной работы системы на интервале $(t_x, t_x + t)$.

В статистической форме это отношение числа объектов, работоспособных в момент времени t и проработавших безотказно до момента времени $t + t_x$, к общему числу объектов в момент времени t .

$$\bar{K}_{o.e.}(t) = \frac{N(t, t + t_x)}{N}.$$

Следует отметить, что для невосстанавливаемых объектов коэффициент готовности совпадает со значением вероятности исправной работы.

2. Методы расчета надежности систем со сложной структурой

2.1. Метод перебора состояний

Расчету надежности любой системы независимо от метода предшествует определение двух непересекающихся множеств состояний элементов, соответствующих работоспособному и неработоспособному состояниям системы. Каждое из этих состояний характеризуется набором элементов, находящихся в работоспособном l и неработоспособном k состояниях.

При независимых отказах вероятность каждого из состояний определяется произведением вероятностей нахождения элементов в соответствующих состояниях, то есть при числе состояний, равном m , вероятность работоспособного состояния системы:

$$P = \sum_{j=1}^m \prod_{l_j} p_{l_j} \prod_{k_j} q_{k_j},$$

вероятность отказа:

$$Q = 1 - \sum_{j=1}^m \prod_{l_j} p_{l_j} \prod_{k_j} q_{k_j},$$

где m – общее число работоспособных состояний, в каждом j -м из которых число исправных элементов равно l_j , а вышедших из строя – k_j .

2.2. Расчет надежности системы с использованием формулы Уоринга

Вторая модель предусматривает построение функции работоспособности как дизъюнкции всех кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ) или с использованием формулы Уоринга:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P(A_i) \cdot P(A_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n P(A_i) \cdot P(A_j) \cdot P(A_k) - \dots + (-1)^{n+1} P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n),$$

где A_i – i -й минимальный путь; $P(A_i)$ – вероятность исправной работы по i -му минимальному пути; n – количество минимальных путей в системе; $i = 1 \dots n$.

3. Важность элементов в смысле вероятности надежной работы

Меру важности j -го элемента в смысле вероятности надежности работы определим следующим образом:

$$I_k(j) = \frac{\partial P_\varphi}{\partial p_j} = P(1_j, \vec{p}) - P(0_j, \vec{p}),$$

где $P(1_j, \vec{p})$ – вероятность исправной работы системы, рассчитанная для случая, когда i -й элемент абсолютно надежен; $P(0_j, \vec{p})$ – вероятность исправной работы системы, рассчитанная для случая, когда i -й элемент абсолютно ненадежен.

Свойства меры:

- 1) поскольку $0 \leq p_i \leq 1$ и система монотонная, то $0 \leq I_r(i) \leq 1, \forall i$;
- 2) эта мера может быть использована для оценки повышения надежности системы при повышении надежности отдельного элемента:

$$\frac{dP_\varphi}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_\varphi}{\partial p_j} \frac{dp_j}{dt} \rightarrow \Delta P_\varphi = \sum_{j=1}^n I_k(j) \Delta p_j.$$

Приращение надежности системы пропорционально мере, следовательно, зависит от важности элемента. Таким образом, чем важнее элемент, тем больший вес он вносит в надежность системы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для отдельных структурных подразделений предприятия «XXX» предлагается следующая система передачи данных между различными узлами (представлена на рис. 5). Ввиду повышенных требований к системе в структуру введены избыточные элементы. Для предлагаемой системы необходимо:

- определить коэффициент готовности системы применительно к одной из пар узлов (вероятность наличия хотя бы одного работоспособного пути между двумя заданными вершинами графа);
- определить по каждой линии системы передачи данных значимость (меру важности) и ее вклад в надежность системы в целом.

Исходными данными для проведения расчетов являются:

- структура системы передачи данных в виде неориентированного графа;
- индивидуальный вариант исследуемой структуры системы для каждого студента (в соответствии с данными таблицы Б.1 приложения Б);
- коэффициенты готовности линий связи (ребер графа), приведенные в таблице Б.2 приложения Б.

При проведении расчетов можно считать, что узлы системы (вершины графа) являются абсолютно надежными.

ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Разработать и реализовать на ЭВМ аналитические модели для определения K_r пути между вершинами:

1 и 6 для вариантов задания 1–12;

3 и 6 для вариантов задания 13–24.

Исследуемая структура графа определяется рис. 6 и перечнем ребер графа в соответствии с индивидуальным заданием для каждого студента (таблицы Б.1 и Б.2).

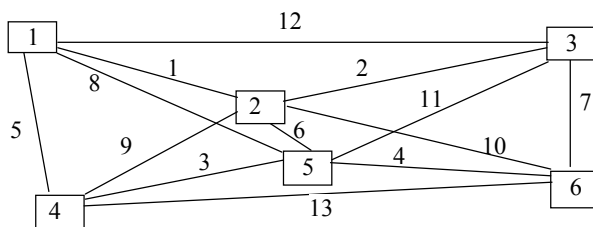


Рис. 6. Граф исходной структуры сети

Следует построить два вида моделей:

- на основе метода перебора возможных состояний системы;
- на основе построения функции работоспособности системы с использованием (КПУФ) – формулы Уоринга.

Модели должны позволить производить расчет при различных значениях вероятности работоспособного состояния каждого из ребер графа.

2. Произвести расчеты K_r системы, если все линии имеют одинаковые значения коэффициента готовности, равные 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, и построить соответствующий график зависимости.

3. Определить ребро или ребра, которые дают максимальное приращение K_r при увеличении их надежности.

4. Провести анализ результатов расчетов и сформулировать выводы по результатам исследования.

5. Рассчитать показатели значимости и вклада линий связи в надежность системы, сформулировать выводы о влиянии этих элементов на обеспечение надежности системы.

6. Оформить отчет о проделанной работе, который должен содержать:

- исследуемый вариант структуры сети;
- перечень путей успешного функционирования сети и перечень состояний работоспособности сети;
- форму записи функции работоспособности;
- результаты расчета K_r системы для двух моделей и заданных значений коэффициентов готовности ребер графа;
- результаты оценки степени влияния надежности ребер на K_r системы;
- результаты расчета структурных характеристик надежности элементов системы;
- выводы по результатам исследования влияния надежности элементов на надежность системы.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Этап 1. Подготовка исходных данных

В соответствии с заданным вариантом воспроизводится конкретная структура системы, подлежащая исследованию.

Для полученной структуры в целях удобства построения моделей производится перенумерация ребер. Определяются КПУФ как перечни ребер, одновременная работоспособность которых обеспечивает возможность передачи информации между вершинами 1 и 6 (варианты 1–12) или 3 и 6 (варианты 13–24).

Этап 2. Реализация модели расчета коэффициента готовности системы с использованием метода перебора состояний

Для реализации модели осуществляется перебор всех возможных состояний системы, определяемых различными комбинациями работоспособности ребер выбранной структуры. И так как каждое ребро может находиться только в одном из двух состояний (работоспособно, неработоспособно), то возможные состояния сети можно охарактеризовать двоичными числами. Количество возможных состояний сети будет равно 2^m , где m – количество ребер в графе. Каждый разряд m -разрядного двоичного числа соответствует конкретному ребру графа. Например, двоичное число 00110111 соответствует такому состоянию, когда первое, второе и пятое ребро неработоспособны, а третье, четвертое, шестое, седьмое и восьмое ребра работоспособны.

Все эти состояния системы несовместны и, следовательно, вероятности таких состояний можно складывать.

Коэффициент K_r системы определяется как сумма вероятностей всех состояний, которые соответствуют наличию хотя бы одного работоспособного пути. Приведенное число 00110111 соответствует, например, пути работоспособности 4, 8. Вероятность такого состояния составит:

$$(1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot (1 - p_5) \cdot p_6 \cdot p_7 \cdot p_8,$$

где p_i – вероятность работоспособного состояния i -го ребра.

Непосредственно саму модель для расчета K_r системы целесообразно реализовать с помощью табличного процессора. Каждому ребру отводится один столбец таблицы. В строках таблицы записываются двоичные числа от 0 до $2^m - 1$. В соседнем столбце вычисляются вероятности состояний. Еще один столбец отводится на задание признака работоспособности системы для каждого состояния: 1 – работоспособное, 0 – неработоспособное. Производится суммирование вероятностей тех состояний, которые соответствуют условию работоспособности.

Этап 3. Реализация модели расчета коэффициента готовности системы с использованием формулы Уоринга

Переход от функции работоспособности к вероятностной функции осуществляется заменой логической переменной коэффициентом K_r , а отрицание логической переменной $1 - K_r$ соответствующего ребра.

Расчет по данной модели также можно осуществить с помощью табличного процессора.

Рассмотрим пример расчета с использованием формулы Уоринга для схемы, представленной на рис. 7, в которой требуется провести расчет для вершин (1)–(5):

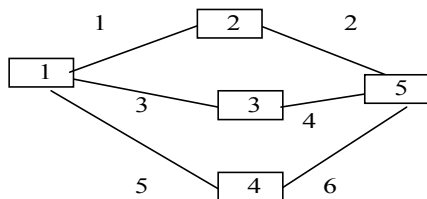


Рис. 7. Упрощенный пример сети

1. Перечислим минимальные пути: $\alpha_1 = x_1x_2$; $\alpha_2 = x_3x_4$; $\alpha_3 = x_5x_6$.

2. Для использования в формуле нам потребуются:

$\alpha_1\alpha_2 = -x_1x_2x_3x_4$, $\alpha_1\alpha_3 = -x_1x_2x_5x_6$, $\alpha_2\alpha_3 = -x_3x_4x_5x_6$, взятые (по формуле) со знаком «-»;

$\alpha_1\alpha_2\alpha_3 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6$.

При записи результатов логического перемножения состояний следует помнить, что $x \times x = x$.

3. Перейдем к обозначениям вероятностей, и итоговая формула запишется в виде:

$$P_c = p_1p_2 + p_3p_4 + p_5p_6 - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_5p_6 - p_3p_4p_5p_6 + p_1p_2p_3p_4p_5p_6.$$

Примечание: значения вероятностей работоспособности отдельных ребер графа целесообразно поместить в отдельные клетки таблицы и задавать их конкретные значения.

Этап 4. Построение графика зависимости коэффициента готовности для случая равной надежности всех линий связи

Осуществляется по любой из реализованных моделей подстановкой равных значений вместо заданных для каждого ребра реализуемой струк-

туры. Результаты расчета коэффициента готовности системы фиксируются и интерпретируются графически.

Этап 5. Определение значимости линий связи

Определение ребер, которые дают наибольшее приращение K_r системы, производится путем перебора: последовательно одному из K_r конкретного ребра дается приращение (например, на 10 %) по сравнению со всеми другими ребрами. Результаты расчетов фиксируются. Такой расчет можно проводить по одной из моделей.

Анализ результатов и формирование выводов должны включать:

- оценку влияния возрастания надежности ребер графа на K_r системы;
- выявление ребер, оказывающих наибольшее влияние на K_r системы;
- анализ трудоемкости моделирования и различий в результатах моделирования.

Этап 6. Определение показателей значимости и вклада линий связи в надежность системы в целом

Используя аналитическое выражение для расчета показателя коэффициента готовности системы по каждому ребру рассчитывается:

а) мера важности каждого ребра $I_k(j)$;

б) показатель вклада ребра в надежность системы:

$$B_j = I_k(j) \cdot K_{zj}$$

и относительного вклада:

$$b_j = \frac{B_j}{\sum_{i=1}^n B_i}.$$

По результатам расчета формулируются выводы о фактическом влиянии элементов на надежность системы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Показатели надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем.
2. Что такое структурное резервирование? Назовите его виды.
3. Методы оценки надежности систем со структурной избыточностью.
4. Показатели, оценивающие влияние надежности элементов на надежность системы.
5. Применение параметра "вес элемента" при исследовании надежности системы.
6. Понятие значимости и вклада элемента в надежность системы, порядок их расчета.
7. Применение параметров "значимость" и "вклад" при исследовании надежности системы.
8. Возможные другие подходы к оценке влияния элементов на надежность системы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Время выполнения лабораторной работы (аудиторные часы) – 4 часа.
Время самостоятельной работы студента (дополнительные часы) – 4 часа.

Цель работы: приобрести практические навыки по применению математических методов расчета надежности восстанавливаемых систем.

Ключевые понятия, которые необходимо знать: граф состояний, интенсивность отказа, интенсивность восстановления, Марковские процессы.

Оборудование и программное обеспечение: работа выполняется на ПЭВМ типа IBM PC с использованием пакета прикладных программ MathCad.

Для расчета показателей надежности как восстанавливаемых, так и невосстанавливаемых систем с различными вариантами резервирования, можно использовать Марковские модели (применительно к графу состояний систем).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При расчете показателей надежности восстанавливаемых объектов и систем наиболее распространено *допущение*:

- экспоненциальное распределение наработки между отказами;
- экспоненциальное распределение времени восстановления.

Допущение во многом справедливо, поскольку во-первых, экспоненциальное распределение наработки описывает функционирование системы на участке нормальной эксплуатации, во-вторых, экспоненциальное распределение описывает процесс без «предыстории» [5].

Применение экспоненциального распределения для описания процесса восстановления позволяет при ординарных независимых отказах представить анализируемые системы в виде Марковских систем и использовать для расчета надежности *метод дифференциальных уравнений для вероятностей состояний (уравнений Колмогорова)*.

При использовании метода в общем случае для системы S необходимо иметь *математическую модель* в виде множества состояний системы $S_1, S_2, \dots, S_n$, в которых она может находиться при отказах и восстановлениях элементов.

Для рассмотрения принципа составления модели введены допущения:

- отказавшие элементы системы (или сам рассматриваемый объект) восстанавливаются;
- отсутствуют ограничения на число восстановлений;
- если все потоки событий, переводящих систему (объект) из состояния в состояние, являются пуассоновскими (простейшими), то слу-

чайный процесс переходов будет Марковским процессом с непрерывным временем и дискретными состояниями $S_1, S_2, \dots, S_n$.

Основные правила составления модели:

– Математическую модель изображают в виде графа состояний.

Элементы графа:

а) *кружки (вершины графа $S_1, S_2, \dots, S_n$)* – возможные состояния системы S , возникающие при отказах элементов;

б) *стрелки* – возможные направления переходов из одного состояния S_i в другое S_j .

Над/под стрелками указываются интенсивности переходов.

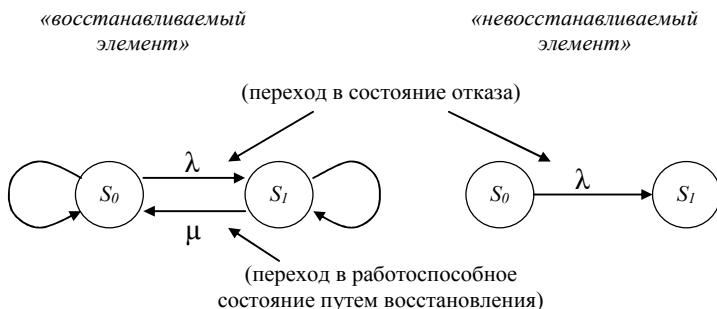


Рис. 8. Пример графа:

S_0 – работоспособное состояние; S_1 – состояние отказа

«Петлей» обозначаются задержки в том или ином состоянии S_0 и S_1 : исправное состояние продолжается или состояние отказа продолжается (в дальнейшем петли на графах не рассматриваем).

Граф состояний отражает конечное (дискретное) число возможных состояний системы $S_1, S_2, \dots, S_n$. Каждая из вершин графа соответствует одному из состояний.

– Для описания случайного процесса перехода состояний (отказ/восстановление) применяют вероятности состояний $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$.

– По графу состояний составляется система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнений Колмогорова), имеющих вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{l=1}^{\theta} \lambda_{li} \cdot P_l(t) - P_i(t) \cdot \sum_{j=1}^q \lambda_{ij}, \quad j = 1 \dots q; \quad l = 1 \dots \theta,$$

где λ_{li} – интенсивность перехода; θ и q – число входящих и исходящих стрелок соответственно.

В общем случае интенсивности потоков λ_{li} и μ_{li} могут зависеть от времени t .

При составлении дифференциальных уравнений пользуются простым mnemonicским правилом:

- а) в левой части – производная по времени t от $P_i(t)$;
- б) число членов в правой части равно числу стрелок, соединяющих рассматриваемое состояние с другими состояниями;
- в) каждый член правой части равен произведению интенсивности перехода на вероятность того состояния, из которого выходит стрелка;
- г) знак произведения положителен, если стрелка входит (направлена острием) в рассматриваемое состояние, и отрицателен, если стрелка выходит из него.

Проверкой правильности составления уравнений является равенство нулю суммы правых частей уравнений.

Чтобы решить систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний $P_1(t), P_i(t), \dots, P_n(t)$, необходимо задать начальное значение вероятностей $P_1(t) (0), P_i(0), \dots, P_n(0)$ при $t = 0$, сумма которых равна единице.

Если в начальный момент $t = 0$ состояние системы известно, например, $S(t = 0) = S_i$, то $P_i(0) = 1$, а остальные равны нулю.

Метод дифференциальных уравнений может быть использован для расчета показателей надежности и невозстанавливаемых объектов (систем).

В этом случае неработоспособные состояния системы являются «поглощающими» и интенсивности μ выхода из этих состояний исключаются.

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений используют методы, изученные в курсе высшей математики. В данной лабораторной работе предлагается использовать возможности математического пакета MathCad.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве практического примера восстанавливаемой системы используем упрощенную схему системы производства электроэнергии и теплоты. В общем случае на электрических станциях установлены комплексы оборудования и устройств, при помощи которых различные виды природной энергии преобразуются в электрическую. Основными элементами электростанции являются: котельная установка, производящая пар высоких параметров (далее котельная); турбинная или паротурбинная установка (далее турбина), преобразующая теплоту пара в механическую энергию вращения ротора турбоагрегата; и электрические устройства, обеспечивающие выработку электроэнергии.

В данной работе рассмотрим пример расчета коэффициента готовности для упрощенной схемы энергоблока (рис. 9).



Рис. 9. Упрощенная принципиальная схема энергоблока

Требуется рассчитать коэффициент готовности системы для двух способов подключения котельных установок.

Способ 1: обе котельные подключены к главному паропроводу. Расход пара на турбину может быть обеспечен одной котельной при ее номинальной нагрузке. Это позволяет рассматривать одну из котельных как находящуюся в нагруженном резерве.

Способ 2: одна котельная подключена к главному паропроводу, что полностью обеспечивает потребность пара на турбину. Вторая котельная находится в состоянии готовности к включению. Это позволяет рассматривать вторую котельную как находящуюся в ненагруженном резерве.

Исходная информация для реализации модели:

- упрощенная принципиальная схема энергоблока;
- средние наработки до отказа и среднее время восстановления элементов после отказа.

(В работе заданы значения наработок, которые могут использоваться в качестве контрольного примера).

ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с теоретическими основами расчета надежности восстанавливаемых систем.
2. Освоить технологию построения графа состояний по принципиальной схеме энергоблока.
3. Изучить методику составления уравнений Колмогорова по графу состояний системы.
4. Рассчитать коэффициент готовности энергоблока по исходным данным, в соответствии с вариантом задания по таблице В.1 приложения В для различных методов резервирования:
 - а) одна из котельных находится в нагруженном резерве;
 - б) одна из котельных находится в холодном резерве.
5. Для различных вариантов резервирования исследовать влияние:

- а) времени восстановления котельной и турбины на коэффициент готовности;
 - б) средней наработки до отказа на величину коэффициента готовности;
 - в) начальных состояний энергоблока на показатели надёжности.
6. Оформить отчет о проделанной работе, который должен содержать:
- графы состояний для обоих вариантов реализации системы;
 - результаты исследований и выводы по каждому из них.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Методику выполнения лабораторной работы рассмотрим на примере расчета одного из вариантов структур, реализованных с использованием пакета MathCad.

Шаг 0. На основании принципиальной схемы строится граф состояний системы, приведенный на рис. 10.

Множество состояний энергоблока:

S_0 – работоспособное состояние энергоблока;

S_1 – отказ одной котельной;

S_2 – отказ двух котельных;

S_3 – отказ турбины.

Шаг 1. Ввод исходных данных:

- среднее время безотказной работы котельной (ч): $\tau_1 := 4500$,
- среднее время восстановления котельной (ч): $\tau_{v1} := 1000$,
- среднее время безотказной работы турбины (ч): $\tau_2 := 5000$,
- среднее время восстановления турбины (ч): $\tau_{v2} := 1000$.

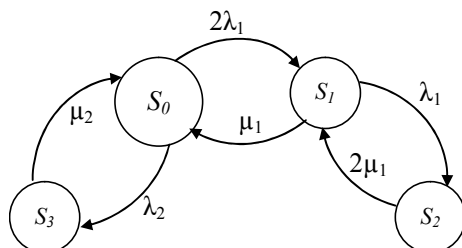


Рис. 10. Граф состояний энергоблока: вариант нагруженного резерва

Шаг 2. На основании исходных данных рассчитаем значения интенсивностей переходов (величин, обратных среднему времени безотказной работы и восстановления соответственно):

- интенсивность отказа котельной: $\lambda_1 := \frac{1}{\tau_1} = 0.00022$,
- интенсивность отказа турбины: $\lambda_2 := \frac{1}{\tau_2} = 0.0002$,
- интенсивность восстановления котельной: $\mu_1 := \frac{1}{\tau_{v1}} = 0.001$,
- интенсивность отказа турбины: $\mu_2 := \frac{1}{\tau_{v2}} = 0.00154$.

Шаг 3. Ввод вектора начальных состояний – начальные значения вероятностей нахождения объекта в каждом из четырех состояний. Следует учесть, что сумма всех начальных состояний должна быть равна единице.

$$p := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{Проверка: } \sum_j p_j = 1.$$

Шаг 4. Для описанной системы по графу состояний составляем систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка – уравнений Колмогорова.

В матрицу $D(t, p)$ записываются правые части уравнений:

$$D(t, p) := \begin{bmatrix} -(2 \cdot \lambda_1 \cdot p_0) + \mu_1 \cdot p_1 - \lambda_2 \cdot p_0 + \mu_2 \cdot p_3 \\ 2 \cdot \lambda_1 \cdot p_0 - (\mu_1 + \lambda_1) \cdot p_1 + 2 \cdot \mu_1 \cdot p_2 \\ - 2 \cdot \mu_1 \cdot p_2 + \lambda_1 \cdot p_1 \\ - \mu_2 \cdot p_3 + \lambda_2 \cdot p_0 \end{bmatrix}.$$

Шаг 5. Для определения значений вероятности воспользуемся встроенной функцией `rkfixed(init, x1, x2, proints, D)`, использующей метод Рунге-Кутты для численного решения дифференциальных уравнений. Параметры функции:

- `init` – вектор начальных состояний;
- `x1, x2` – значения интервала, на котором определяется решение (значение `init` считается значением функции в точке `x1`);
- `proints` – число тактов поиска решений;
- `D` – векторная функция $D(t, p)$, являющаяся правой частью системы:

$$\frac{dy}{dx} = D(x, y) = \begin{bmatrix} f_1(x, y) \\ f_2(x, y) \\ \dots \\ f_n(x, y) \end{bmatrix}.$$

Результат решения записывается в матрицу Z , столбцы которой содержат значения искомым функций (на каждом такте поиска решений).

$$Z := \text{rfixed}(p, 0, 2000, 500, D)$$

Шаг 6. Рассчитаем значение вероятности исправного состояния на конечной точке интервала наблюдения, что будет соответствовать стационарному значению коэффициента готовности.

Для этого введем дополнительную переменную:

$$\text{station} := \text{rows}(Z) - 1$$

и зафиксируем расчетное значение стационарного коэффициента готовности:

$$K := Z_{\text{station},1}$$

Иллюстрация изменения коэффициента готовности энергоблока от начального состояния до стационарного значения представлена на рис. 11 ($n := 0.. \text{station}$ – вспомогательная переменная).

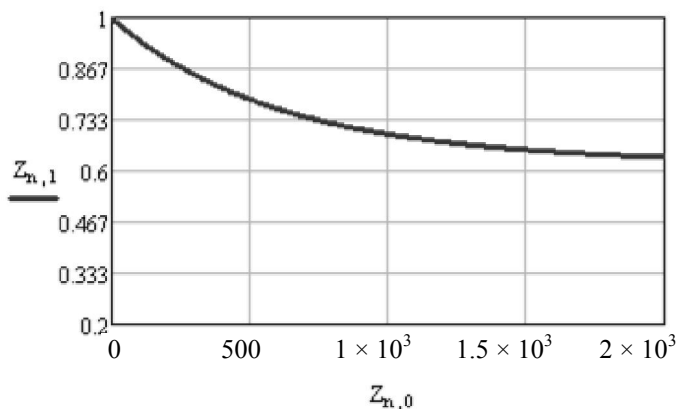


Рис. 11. Коэффициент готовности энергоблока при использовании котельных в режиме горячего (нагруженного) резерва

Для второго варианта реализации системы необходимо выполнить аналогичные расчеты с учетом особенностей графа состояний для холодного резерва.

СЦЕНАРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперимент 1. Оценить влияние времени восстановления котельных и турбины на коэффициент готовности для обоих методов резервирования, для этого необходимо зафиксировать значения коэффициента готовности при 5–20 % отклонении от исходного значения. Сделать выводы по полученным результатам.

Эксперимент 2. Оценить влияние изменения средней наработки до отказа на коэффициент готовности для обоих методов резервирования. Для этого необходимо зафиксировать значения коэффициента готовности при 5–20 % отклонении от исходного значения. Сделать выводы по полученным результатам.

Эксперимент 3. Исследовать влияние начальных состояний энергоблока на показатели надёжности. Необходимо рассмотреть следующие варианты:

- в начальный момент времени система находится в неработоспособном состоянии;
- в начальный момент времени одна из котельных находится в состоянии отказа;
- за начальный момент времени взят пятый шаг работы исходной схемы, т. е. информация о начальном состоянии известна неточно, а заданы только вероятностные значения нахождения системы в каждом из состояний.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Каковы основные этапы расчета надежности при использовании Марковской модели?
2. При каком законе надёжности применима Марковская модель процесса изменения состояний объекта?
3. Каковы основные правила составления графа состояний? Приведите пример графа состояний для простейших структур.
4. Что такое интенсивность отказов, интенсивность восстановления?
5. Как изменяется интенсивность отказов с увеличением наработки объекта?
6. Что такое коэффициент готовности?
7. Как влияет резервирование на коэффициент готовности объекта?
8. Как влияет увеличение времени восстановления на коэффициент готовности?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кизим, А. Ф. Учебно-методический комплекс «Надежность, эргономика и качество АСОИУ» / А. В. Кизим; ВолгГТУ. – Волгоград, 2003.
2. Барлоу, Б. Статическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 327 с.
3. Математическая статистика: учеб. для вузов / В. Б. Горяинов [и др.]; Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 423 с.
4. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 524 с.
5. Волков, Л. И. Безопасность и надежность систем. / Л. И. Волков. – М.: Издательство СИП РИА, 2003. – 268 с.
6. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев [и др.]; Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
7. Сервер Правительства Хабаровского края. Пятый международный инвестиционный форум. Секция: «Энергетика и топливно-энергетические ресурсы» [Электронный ресурс] / Электрон. дан. Хабаровск. [2003] – Режим доступа: http://www.adm.khv.ru/invest2.nsf/pages/ru/news/invforum_morgun.htm, свободный. – Загл с экрана. – Яз. рус.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 1

Таблица А.1

Результаты исследования изделий на отказ

Вариант	Параметр	Номер интервала наблюдения								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Наработка до отказа, ч	96	192	288	384	480	576	672	768	864
	Количество отказов	4	5	12	17	23	24	11	4	0
2	Наработка до отказа, ч	126	142	268	394	520	646	772	898	1024
	Количество отказов	3	2	14	22	30	15	9	5	0
3	Наработка до отказа, ч	1974	3948	5922	7896	9870	11844	13818	15792	17766
	Количество отказов	44	34	9	9	1	0	3	0	0
4	Наработка до отказа, ч	126	252	378	504	630	756	882	1008	1134
	Количество отказов	3	9	20	20	23	19	6	0	0
5	Наработка до отказа, ч	139	278	417	556	695	834	973	1112	1251
	Количество отказов	2	1	10	25	31	19	9	3	0
6	Наработка до отказа, ч	1754	3508	5262	7016	8770	10524	12278	14032	15786
	Количество отказов	58	25	7	7	3	0	0	0	0
7	Наработка до отказа, ч	312	624	936	1248	1560	1872	2184	2496	2808
	Количество отказов	4	7	18	25	20	19	7	0	0
8	Наработка до отказа, ч	562	1124	1686	2248	2810	3372	3934	4496	5058
	Количество отказов	10	5	18	11	23	10	12	11	0
9	Наработка до отказа, ч	674	1348	2022	2696	3370	4044	4718	5392	6066
	Количество отказов	4	5	22	25	19	13	7	5	0
10	Наработка до отказа, ч	58	116	174	232	290	348	406	464	522
	Количество отказов	5	2	14	31	27	14	7	0	0
11	Наработка до отказа, ч	482	964	1446	1928	2410	2892	3374	3856	4338
	Количество отказов	4	7	10	23	25	20	8	3	0
12	Наработка до отказа, ч	258	516	774	1032	1290	1548	1806	2064	2322
	Количество отказов	3	4	23	34	23	9	3	1	0

Приложение Б

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 2

Таблица Б.1

Варианты исследуемых структур сети

№ пп	Наличие ребер графа сети												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
8	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
10	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
11	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
12	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
13	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
14	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
15	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
16	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
17	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
18	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
19	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
20	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
21	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
22	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
23	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
24	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0

Примечание:

- № пп соответствуют вариантам задания структуры сети;
- содержание строки таблицы характеризует наличие соответствующих ребер в конкретном варианте структуры: 1 означает наличие ребра; 0 – отсутствие.

Таблица Б.2

Коэффициенты готовности

№ пп	Коэффициенты готовности линий связи												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,7	0,9	0,5	0,75	0,8	0,85	0,7	0	0	0	0	0	0
2	0,75	0,8	0,9	0,75	0,9	0,75	0	0,8	0	0	0	0	0
3	0,6	0,85	0,6	0,75	0,75	0,9	0	0	0,7	0	0	0	0
4	0,9	0,6	0,65	0,9	0,7	0,5	0	0	0	0,85	0	0	0
5	0,8	0,75	0,9	0,8	0,75	0,6	0	0	0	0	0,75	0	0
6	0,85	0,85	0,7	0,8	0,8	0,6	0	0	0	0	0	0,75	0
7	0,95	0,6	0,8	0,85	0,6	0,7	0	0	0	0	0	0	0,7
8	0,6	0,9	0,8	0,85	0,6	0	0,8	0,9	0	0	0	0	0
9	0,6	0,9	0,9	0,65	0,75	0	0,85	0	0,7	0	0	0	0
10	0,75	0,85	0,6	0,65	0,85	0	0,6	0	0	0,6	0	0	0
11	0,85	0,6	0,6	0,95	0,7	0	0,75	0	0	0	0,75	0	0
12	0,8	0,65	0,8	0,95	0,7	0	0,8	0	0	0	0	0,6	0
13	0,9	0,7	0,85	0,75	0,6	0	0,9	0	0	0	0	0	0,8
14	0,95	0,95	0,7	0,75	0	0,7	0,85	0	0,9	0	0	0	0
15	0,85	0,7	0,7	0,8	0	0,95	0	0	0,65	0,8	0	0	0
16	0	0,65	0,85	0,8	0,7	0	0,8	0	0,6	0	0	0	0
17	0	0,95	0,85	0,8	0,8	0	0,8	0	0	0,5	0	0	0
18	0	0,9	0,95	0,6	0,75	0	0,5	0	0	0	0,6	0	0
19	0	0,8	0,65	0,6	0,75	0	0,5	0	0	0	0	0,7	0
20	0	0,65	0,65	0,9	0,65	0	0,7	0	0	0	0	0	0,5
21	0	0,6	0,85	0,9	0	0,8	0,6	0	0,8	0	0	0	0
22	0	0,75	0,8	0,7	0	0,9	0	0	0,6	0,9	0	0	0
23	0	0,9	0,75	0,7	0,8	0,6	0,6	0	0	0	0	0	0
24	0	0,75	0,75	0,85	0,7	0,6	0	0,5	0	0	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 3

Таблица В.1

Средние наработки до отказа и среднее время восстановления элементов системы после отказа

Вариант	Среднее время безотказной работы, ч		Среднее время восстановления, ч	
	t ₁ котельной	t ₂ турбины	t _{v1} котельной	t _{v2} турбины
1	4100	5000	600	300
2	4000	5200	600	400
3	4000	5100	500	200
4	4000	6500	600	300
5	5000	5600	700	400
6	5100	4000	700	300
7	5100	5000	700	300
8	5000	6500	800	400
9	6000	4200	600	350
10	5000	6200	1000	600
11	4200	3000	1000	500
12	4000	3500	500	200
13	4500	5200	600	250
14	4500	5300	700	350
15	4500	6300	800	400
16	5500	6600	800	300
17	5500	3600	500	200
18	5500	5000	650	100
19	6200	4700	560	500
20	6200	4700	550	800