

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Техническое обеспечение телекоммуникационных систем»
для студентов направления подготовки
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

СОДЕРЖАНИЕ

- 1 Исследование статистических характеристик технического обслуживания замкнутых систем массового обслуживания с ожиданием.
- 2 Исследование применимости законов распределения отказов для оценки надежности радиоэлектронных систем
- 3 Исследование количественных характеристик надежности РЭС при различных видах структурного резервирования.
- 4 Исследование способа граничных испытания для оценки запаса параметрической надежности радиотехнических элементов.
- 5 Исследование методов оценки технического состояния радиоэлектронных средств.
- 6 Исследование алгоритмов поиска неисправности на базе радиоприемника.
- 7 Исследование способов контроля работоспособности РЭС.
- 8 Исследование и оптимизация сетевого графика регламентных работ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Тема №1:

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОЖИДАНИЕМ

Время– 2 часа

Целевая установка лабораторного занятия:

В ходе лабораторного занятия студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- оценивать и сравнивать качество предоставляемых услуг связи с нормативными показателями, контролировать качество предоставляемых услуг (ПК-2);
- контролировать работоспособность замкнутых систем массового обслуживания с ожиданием путем определения статистических характеристик технического обслуживания (ПК-2);
- навыками контроля и оценки системы технического обслуживания оборудования для поддержания показателей качества работы сети в пределах нормативных значений (ПК-2).

Учебно-материальное обеспечение:

- 1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:
 - Microsoft Word для оформления отчетов по практическому занятию;
 - Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.
- 2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы.

Общие сведения о применении теории массового обслуживания для определения статистических характеристик технического обслуживания

Теория массового обслуживания (ТМО) изучает статистические характеристики систем массового обслуживания. **Система массового обслуживания** (СМО) – это совокупность однородных обслуживающих устройств (приборов, мастерских и т.д.), называемых каналами обслуживания. Примерами СМО могут служить сборочные цеха, ремонтные мастерские, инженерно-авиационная служба, восстанавливаемая резервированная аппаратура, телефонные станции, все виды транспорта (вместе с билетными кассами) и т.д.

Основными элементами СМО, определяющими их пропускную способность, являются: число каналов обслуживания, быстродействие каждого канала и поток событий (заявок на обслуживание, поток обслуженных заявок и т.д.).

По признаку потерь заявок на обслуживание СМО подразделяются на три типа: *с отказами, с ожиданием и смешанного типа*.

В **СМО с отказами** заявки обслуживаются немедленно, если каналы свободны, или получают отказ и теряются, если все каналы заняты. Пример такой СМО – телефонная сеть. В **СМО с ожиданием** (например, в системах ремонта техники) все заявки выстраиваются в очередь, если каналы заняты. В **СМО смешанного типа** имеются ограничения на время пребывания заявки в системе или на длину очереди. При невыполнении требуемого ограничения заявка покидает СМО необслуженной.

По числу каналов обслуживания, которые могут одновременно обслуживать входные заявки, СМО делят на **одноканальные и многоканальные**.

Если обслуженная заявка покидает СМО, то СМО называют **открытыми**, а если снова поступает на обслуживание в СМО, то **замкнутыми**.

При выполнении лабораторной работы исследуется замкнутая многоканальная СМО с ожиданием, наиболее подходящую для описания процесса эксплуатации техники, в частности, для расчета характеристик ТО и показателей надежности резервируемой аппаратуры в зависимости от числа каналов и их производительности.

Пусть СМО с ожиданием содержит n работающих приборов и r каналов обслуживания. При одном отказе прибора получается одна заявка. Поток отказов порождает поток заявок, которые немедленно удовлетворяются обслуживанием, а когда все r каналов обслуживания заняты, заявки выстраиваются в очередь. В этом случае $r \leq k < n$, где k – число отказов приборов. Требуется найти вероятности пребывания системы в состоянии $P_k(t)$ в любой момент времени t для различных значений k . Вероятность $P_k(t)$ – это вероятность состояния системы, при котором k приборов отказали, из них r приборов обслуживаются, а остальные $(k - r)$ стоят в очереди. Найденные значения $P_k(t)$ позволяют рассчитать все критерии, характеризующие степень удовлетворения потока заявок и степень использования каналов обслуживания.

Предполагается, что вероятность безотказной работы любого прибора изменяется во времени по экспоненциальному закону $P(t) = \exp(-\lambda t)$, причём интенсивность отказов (поступления заявок) λ не зависит от времени. Если до момента t прибор был исправен, то вероятность отказа $P_{отк}(\Delta t)$ в малом промежутке времени Δt , следующем за временем t , для нашего случая определяется приближенным выражением:

$$P_{отк}(\Delta t) \approx \lambda \Delta t, \text{ при } \lambda \Delta t \ll 1 \quad (1)$$

По аналогии определяется вероятность завершения обслуживания заявки к моменту $t + \Delta t$, поступившей в момент t на обслуживание:

$$P_{обс}(\Delta t) \approx \mu \Delta t, \text{ при } \mu \Delta t \ll 1 \quad (2)$$

В (2) μ – это интенсивность восстановления (обслуживания, ремонта) в одном канале. Граф изменения состояний замкнутой многоканальной СМО с ожиданием представлен на рисунке 1.

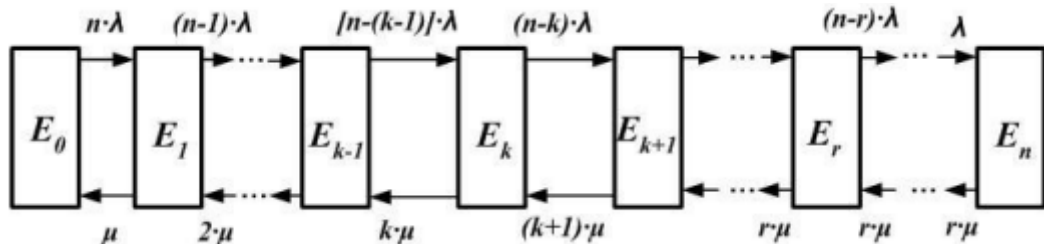


Рисунок 1 – Граф изменения состояний замкнутой многоканальной СМО с ожиданием

Под термином **техническое состояние** E_k понимают совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемую в определённый момент признаками, установленными технической документацией.

На рисунке 1 введены следующие обозначения:

- E_k – техническое состояние СМО, при котором k из n работающих приборов находятся в состоянии неработоспособности;
- r – число каналов обслуживания;
- λ [ч⁻¹] – интенсивность поступления заявок, равная интенсивности отказов одного прибора;
- μ [ч⁻¹] – интенсивность обслуживания (восстановления или ремонта) в одном канале.

Указанная СМО может использоваться как система технического обслуживания не только приборов, средств телекоммуникаций, но и транспорта (парки самолетов, автомобилей и т.п.).

Академик А.Н. Колмогоров сформулировал инженерное правило составления дифференциальных уравнений по виду графа или по виду схемы состояний:

«Производная от вероятности пребывания системы в любой момент времени в состоянии k равна алгебраической сумме произведений интенсивностей переходов в k -ое состояние (или из k -ого состояния) на вероятность того состояния, откуда совершается переход в k -ое

состояние. Причем, тем слагаемым, которым соответствуют уходящие стрелки из k -ого состояния, приписывается знак «минус», а входящим – «плюс».

Анализ графа (см. рис. 1) позволяет вывести дифференциальное уравнение для вероятностей состояний:

$$\frac{dP_k}{dt} = n - k + 1 * \lambda * P_{k-1} * t - (n - k * \lambda + k * \mu) * P_k * t + k + 1 * \mu * P_{k+1} * t \quad (3)$$

Для установившегося режима $\frac{dP_k}{dt} = 0$, так как P_k в этом случае не меняется во времени, и уравнение для вероятности состояний примет вид:

$$(n - k + 1)\lambda * P_{k-1} + [(n - k) * \lambda + k * \mu] * P_k + (k + 1)\mu * P_{k+1} = 0 \quad (4)$$

Решение уравнения для вероятностей в этом случае дает результат:

$$P_k = A_k * P_0 \quad (5)$$

где P_0 – вероятность того, что работают все приборы.

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_k A_k} \quad (6)$$

$$A_k = \frac{n!}{2^{k-2} * 2! * (n - k)!} * \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \quad (7)$$

Для проверки правильности расчета P_k используется нормировочное отношение:

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1 \quad (8)$$

Суммарная погрешность расчета P_k находится из выражения:

$$\delta_{\Sigma} = 1 - \sum_{k=0}^n P_k \quad (9)$$

Полученные выражения для P_k (вероятностей пребывания системы в состоянии k) позволяют с помощью схемы для определения статических характеристик СМО, изображенной на рисунке 2, определять эти характеристики:

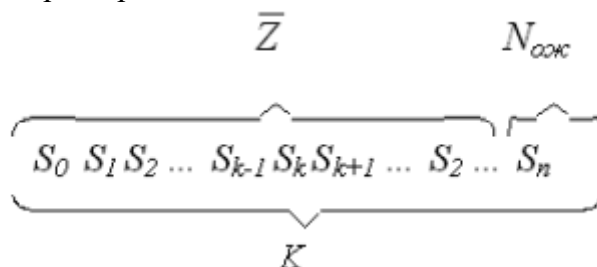


Рисунок 2 – Схема определения статических характеристик СМО

Основные статические характеристики СМО:

– **среднее количество заявок в каналах обслуживания**, то есть среднее количество каналов, занятых на ремонте:

$$\bar{Z} = \sum_{k=0}^r kP_k + \sum_{k=r+1}^n rP_k \quad (10)$$

где первое слагаемое характеризует отсутствие очереди, а второе – очередь;

– **пропускная способность:**

$$M = \frac{\bar{Z}}{T_B} = \bar{Z} * \mu \quad (11)$$

где T_B – среднее время восстановления одного прибора, величина обратная интенсивности восстановления;

– **среднее число заявок, находящихся в СМО** (как в каналах обслуживания, так и в очереди на обслуживание):

$$K = \sum_{k=0}^n k * P_k = n - \bar{Z} * \frac{\mu}{\lambda} \quad (12)$$

– *среднее число заявок, находящихся в очереди на обслуживание:*

$$N_{ож} = \sum_{k=r+1}^n k * P_k = n - \bar{Z} * \left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right) \quad (13)$$

– *среднее число простаивающих каналов обслуживания из-за отсутствия заявок:*

$$R_{пр} = \sum_{k=0}^{r-1} (r - k) * P_k \quad (14)$$

– *среднее относительное время простоя каждого канала СМО из-за отсутствия заявок:*

$$T_{пр} = \frac{R_{пр}}{r}, \text{ при } r > 1 \quad (15)$$

– *среднее относительное значение времени пребывания заявок в очереди на обслуживание:*

$$T_{ож} = \frac{N_{ож}}{n} \quad (16)$$

– *среднее относительное значение времени пребывания заявок в очереди и в канале обслуживания:*

$$T_{обс} = \frac{K}{n} \quad (17)$$

– при определении минимального количества каналов обслуживания r_{min} , обеспечивающего отсутствие очереди на обслуживание, используют неравенство:

$$r_{min} > \frac{n * \lambda}{\lambda + \mu} = n * K_{\Pi} = n * 1 - K_{\Gamma} \quad (18)$$

где K_{Π} и K_{Γ} – коэффициенты простоя и готовности, соответственно.

– *вероятность отказа системы:*

$$P_{n+m} = \frac{\rho^{r+m}}{r^m * r!} * P_0 \quad (19)$$

где P_0 - вероятность нахождения системы в нулевом состоянии и определяется по формуле:

$$P_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^r}{r!} + \frac{\rho^r}{r!} * \frac{\frac{\rho}{r} - \left(\frac{\rho}{r}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho}{r}} \right)^{-1} \quad (20)$$

где ρ - поступающая нагрузка; m – объем накопителя.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к лабораторной работе:

- 1) Характеристика и классификация систем массового обслуживания (СМО).
- 2) Характеристика замкнутой многоканальной СМО с ожиданием.
- 3) Граф изменения состояний замкнутой многоканальной СМО с ожиданием.
- 4) Характеристика СМО как системы технического обслуживания.
- 5) Правило составления дифференциальных уравнений по виду графа или по виду схемы состояний СМО.
- 6) Решение дифференциального уравнения для вероятностей состояний СМО.
- 7) Схема определения статических характеристик СМО.
- 8) Основные статические характеристики СМО: физический смысл и математические выражения.

Содержание практической работы в ходе занятия

Описание рабочего оборудования:

Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчетов по практическому занятию;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

Требования безопасности при выполнении работы:

- К проведению практического занятия допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- Включение компьютеров осуществляется только с разрешения преподавателя.
- При проведении практического занятия не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.
- Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов рабочего оборудования (компьютеров).
- При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование (компьютер) от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.
- При возгорании оборудования (компьютера) его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.
- По окончании работы с оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание для работы:

Базового уровня:

1) Составить математическую модель СМО, состоящая из n работающих приборов и $г$ каналов обслуживания. Рассчитать характеристики данной СМО.

2) Исследовать зависимости пропускной способности, среднего время заявки в очереди, среднего время обслуживания заявки и оптимальное число каналов для СМО от числа рабочих приборов.

Повышенного уровня:

3) Исследовать зависимость вероятности отказа от поступающей нагрузки при фиксированном числе каналов.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Разработать математическую модель СМО, состоящая из n работающих приборов и $г$ каналов обслуживания. Рассчитать характеристики данной СМО.

Постановка задачи:

Составить в Mathcad Professional математическую модель СМО для расчета среднего количества заявок, пропускной способности, среднего количества заявок в СМО, среднего числа заявок в очереди, среднего время заявки в очереди, среднего время обслуживания заявки и оптимального число каналов для СМО.

Варианты индивидуальных исходных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения задания 1.

Номер варианта	Число работающих приборов, n	Число каналов, $г$	Интенсивность заявок, λ	Интенсивность обслуживания, μ
1	8	2	0.1	1
2	9	3	0.2	0.9
3	10	4	0.3	0.8
4	11	5	0.4	0.7
5	12	5	0.5	0.6
6	11	4	0.6	0.5
7	10	3	0.7	0.4

8	9	2	0.8	0.3
9	8	5	0.9	0.2
10	10	4	1	0.2
11	11	3	0.9	0.3
12	12	2	0.8	0.4
13	8	2	0.7	0.5
14	9	4	0.6	0.6
15	10	3	0.5	0.7
16	11	5	0.4	0.8
17	12	5	0.3	0.9
18	8	4	0.2	1
19	9	3	0.1	0.9
20	10	2	1	0.8

Порядок математического моделирования.

1) В Mathcad Professional произвести расчет параметров элементов схемы замещения.

Для этого выполнить следующие действия:

1.1) В открытом окне программы ввести по заданному варианту исходные данные:

- число рабочих приборов;
- число каналов;
- интенсивность заявок;
- интенсивность обслуживания;

1.2) Ввести формулы и рассчитать следующие параметры:

– расчет вспомогательных коэффициентов:

$$A_k := \frac{n!}{r^{k-r} \cdot r! \cdot (n-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k;$$

– вероятность исправности всех приборов:

$$P_0 := \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n A_k};$$

– вероятность нахождения системы в k-ом состоянии:

$$P_k := P_0 \cdot A_k;$$

– среднее время нахождения заявок в каналах обслуживания:

$$Z := \sum_{k=0}^r (P_k \cdot k) + \sum_{k=r+1}^n (r \cdot P_k);$$

– пропускная способность:

$$M := Z \cdot \mu;$$

– среднее количество заявок в СМО:

$$K := n - Z \cdot \frac{\mu}{\lambda};$$

– среднее количество заявок в ожидании:

$$N_{OЖ} := n - Z \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right);$$

– среднее количество простаивающих каналов:

$$R_{\text{ПП}} := \sum_{k=0}^{r-1} [(r-k) \cdot P_k]$$

– среднее относительное время простоя:

$$T_{\text{ПП}} := \frac{R_{\text{ПП}}}{r}$$

– среднее относительное значение времени заявки в очереди:

$$T_{\text{ОЖ}} := \frac{N_{\text{ОЖ}}}{n}$$

– среднее относительное значение времени заявки в СМО:

$$T_{\text{ОБС}} := \frac{K}{n}$$

– коэффициент готовности:

$$K_{\Gamma} := \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

– оптимальное количество каналов обслуживания

$$r_{\text{ОПТ}} := \text{ceil}\left(\frac{n \cdot \lambda}{\lambda + \mu}\right)$$

Пример расчетов.

Исходные данные

$$\lambda := 0.1671 \quad n := 9 \quad r := 3 \quad \mu := 0.3$$

$$k := 1..n$$

Расчет вспомогательных коэффициентов

$$A_k := \frac{n!}{r^{k-r} \cdot r! \cdot (n-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k$$

$$A_k =$$

7.52
11.169
14.516
16.171
15.012
11.149
6.21
2.306
0.428

$$P_0 := \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n A_k} = 0.012 \quad \text{Вероятность того, что все приборы исправны}$$

$$P_k := P_0 \cdot A_k \quad \text{Вероятность нахождения системы в k-ом состоянии}$$

$$P_k =$$

0.088
0.131
0.17
0.189
0.176
0.13
0.073
0.027
$5.009 \cdot 10^{-3}$

$$Z := \sum_{k=0}^r (P_k \cdot k) + \sum_{k=r+1}^n (r \cdot P_k) = 2.658 \quad \text{Среднее количество заявок в каналах обслуживания}$$

$$M := Z \cdot \mu = 0.797 \quad \text{Пропускная способность}$$

$$K := n - Z \cdot \frac{\mu}{\lambda} = 4.227 \quad \text{Среднее количество заявок находящихся в СМО}$$

$$N_{\text{ОЖ}} := n - Z \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right) = 1.569 \quad \text{Среднее количество заявок находящихся в ожидании}$$

$$R_{\text{ПР}} := \sum_{k=0}^{r-1} [(r-k) \cdot P_k] = 0.307 \quad \text{Среднее количество простаивающих каналов}$$

$$T_{\text{ПР}} := \frac{R_{\text{ПР}}}{r} = 0.102 \quad \text{Среднее относительное время простоя}$$

$$T_{\text{ОЖ}} := \frac{N_{\text{ОЖ}}}{n} = 0.174 \quad \text{Среднее относительное значение времени заявки в очереди}$$

$$T_{\text{ОБС}} := \frac{K}{n} = 0.47 \quad \text{Среднее относительное значение времени заявки в СМО}$$

$$K_{\Gamma} := \frac{\mu}{\lambda + \mu} = 0.642 \quad \text{Коэффициент готовности}$$

$$r_{\text{ОПТ}} := \text{ceil}\left(\frac{n \cdot \lambda}{\lambda + \mu}\right) = 4 \quad \text{Необходимое количество каналов для обеспечения отсутствия очереди}$$

- 2) Полученные результаты в ходе математического моделирования занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Полученные в задании 1 результаты моделирования

Параметр	Z	M	K	Нож	R _{ПР}	T _{ПР}	T _{ОЖ}	T _{ОБС}	K _Г	r _{опт}
Значение	2.658	0.797	4.227	1.569	0.307	0.102	0.174	0.47	0.642	4

- 3) Сделать выводы по результатам моделирования и расчетов.

Задание 2. Исследовать зависимости пропускной способности, среднего время заявки в очереди, среднего время обслуживания заявки и оптимальное число каналов для СМО от числа рабочих приборов.

Постановка задачи:

По разработанной в задании 1 математической модели провести исследование заданных характеристик СМО от числа рабочих каналов.

Исходные данные для исследования по вариантам представлены в табл. 3.
Таблица 3 – Исходные данные для выполнения задания 2.

Номер варианта	Количество каналов (п)			
	6	8	10	12
1.	6	8	10	12
2.	7	9	11	13
3.	6	8	12	14
4.	5	7	9	13
5.	7	10	11	15
6.	8	10	12	14
7.	5	8	9	10
8.	6	8	11	13
9.	7	9	13	15
10.	6	11	12	14
11.	7	10	13	15
12.	6	8	10	14
13.	6	9	11	12
14.	7	9	13	15
15.	4	7	9	10
16.	5	9	10	12
17.	9	11	13	14
18.	7	10	11	13
19.	8	9	10	12
20.	5	9	11	15

Порядок исследования:

Для проведения исследования необходимо выполнить следующие действия (операции):

1) В разработанной математической модели, изменять параметр п в соответствии с вариантом (см. табл. 3).

2) Занести новые рассчитанные значения пропускной способности, оптимального числа каналов, среднего времени заявки в очереди, среднего времени обслуживания заявки в таблицу результатов 4.

Таблица 4 – Полученные в задании 2 результаты исследования (пример)

п	М	Тож	Тобс	гопт
17	0.9	0.507	0.683	7
18	0.9	0.534	0.701	7
19	0.9	0.559	0.717	7
20	0.9	0.581	0.731	8

3) Построить графики зависимостей пропускной способности, оптимального числа каналов, среднего времени заявки в очереди, среднего времени обслуживания заявки от количества рабочих приборов. Пример показан на рис.2.

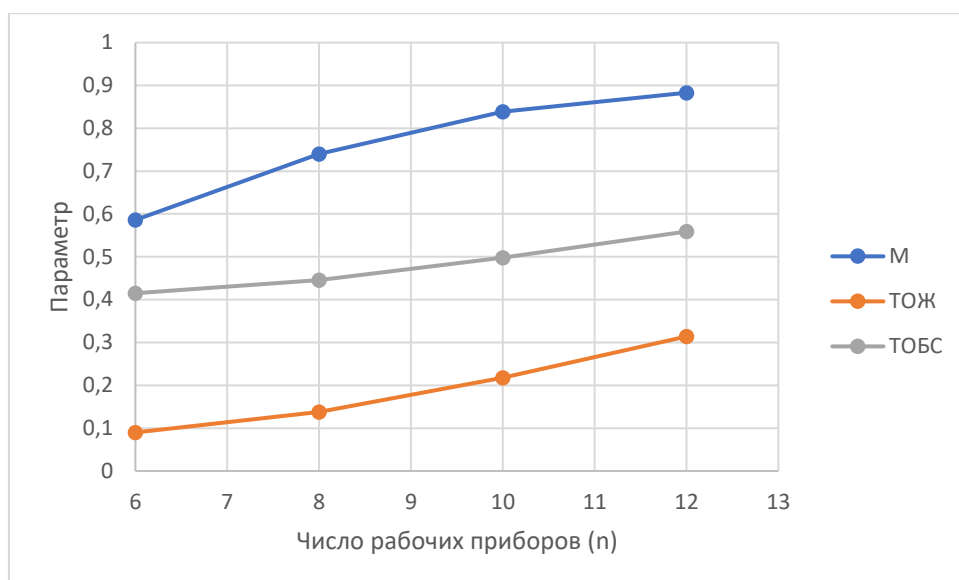


Рисунок 2 – Пример графиков зависимости

- 4) Вернуть математическую модель в исходное состояние.
- 5) Сделать выводы по результатам проведенного исследования.

Задание 3. Исследовать зависимость вероятности отказа от поступающей нагрузки при фиксированном числе каналов (повышенный уровень).

Постановка задачи:

Разработать в Mathcad Professional новую математическую модель для проведения исследования. Исследовать зависимость вероятности отказа при фиксированном числе каналов. Исходные данные для исследования по вариантам представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Исходные данные для выполнения задания 3.

Номер варианта	Количество каналов (r)			
1.	1	3	6	8
2.	2	4	7	9
3.	3	4	6	8
4.	2	3	5	7
5.	2	4	7	10
6.	3	5	8	10
7.	1	3	5	8
8.	2	3	6	8
9.	2	3	7	9
10.	1	2	6	11
11.	2	3	7	10
12.	3	4	6	8
13.	2	4	6	9
14.	3	5	7	9
15.	1	3	4	7
16.	2	3	5	9
17.	3	7	9	11
18.	1	5	7	10
19.	2	4	8	9
20.	3	4	5	9

Порядок исследования:

Для проведения исследования необходимо следующие действия (операции):

1) Самостоятельно составить в Mathcad Professional математическую модель, воспользовавшись формулами (19) и (20):

– вероятность отказа системы:

$$P_{n+m} = \frac{\rho^{r+m}}{r^m * r!} * P_0 \quad (19)$$

где P_0 - вероятность нахождения системы в нулевом состоянии и определяется по формуле:

$$P_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^r}{r!} + \frac{\rho^r}{r!} * \frac{\frac{\rho}{r} - \left(\frac{\rho}{r}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho}{r}} \right)^{-1} \quad (20)$$

где ρ - поступающая нагрузка; m – объем накопителя.

2) Для каждого заданного объема накопителя $m = 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50$; последовательно изменяя заданное в табл. 5 фиксированное число каналов r рассчитать вероятность отказа системы от количества поступающей нагрузки ρ . Результаты расчетов занести в таблицу 6 для каждого фиксированного числа канала.

Таблица 6 – Полученные в задании 3 результаты исследования.

$\rho \backslash m$	1	5	10	20	30	40	50
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

3) Построить график зависимости вероятности отказа от поступающей нагрузки. Пример приведен на рис. 3.

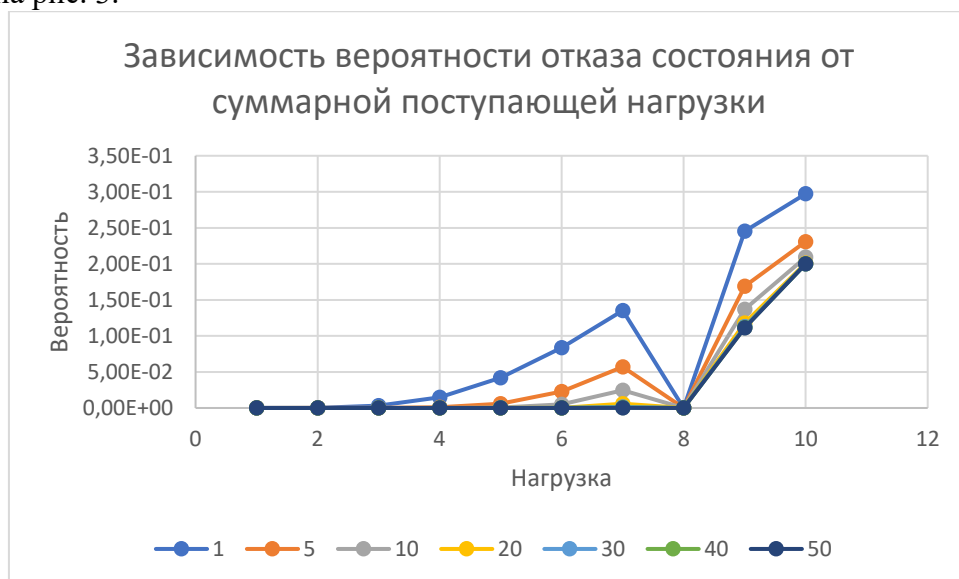


Рисунок 3 – Пример графика зависимости

4) Сделать выводы по результатам исследования. В том числе объяснить причину наличия на графике точек, в которых вероятность отказа равна нулю.

Задание 4. Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

- тему и цель работы, задания для исследований;
- листинги составленных программ моделирования в Mathcad Professional;
- полученные результаты расчетов, представленные в таблицах;
- полученные в ходе исследования графики;
- выводы по результатам проделанной работы и выполнения заданий.

2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

**Лабораторное занятие разработано
доцентом кафедры инфокоммуникаций,
кандидатом технических наук, доцентом, профессором РАЕ**

К.М. Сагдеевым

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Тема №2: ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Время– 2 учебных часов.

Целевая установка лабораторного занятия:

В ходе лабораторного занятия студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- выполнять расчеты характеристик надежности РЭС действующего оборудования систем связи для контроль проектных параметров работы оборудования связи (ПК-6);
- применять рассчитанные характеристики и показатели для обоснования эксплуатационной надежности РЭС и прогнозирования оценки соответствия технических параметров РЭС установленным эксплуатационно-техническим нормам (ПК-7).

Учебно-материальное обеспечение:

1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчетов по лабораторной работе;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы.

Продолжительность работы изделия (элемента, устройства и т.д.), измеренную в часах, циклах переключения или других единицах, в технике называют наработкой. В радиоэлектронике наработка элементов и устройств в большинстве случаев выражается в часах. Для некоторых элементов (переключатели, реле и др.) наработка может измеряться в циклах переключения или в циклах функционирования.

В теории и практике надёжности часто интересуются **наработкой** изделий **до отказа**. В качестве наработки элементов до отказа рассматривается суммарное время (без учёта перерывов) с момента начала эксплуатации до момента возникновения отказа. В этом случае наработку до отказа обычно называют временем безотказной работы или временем до отказа.

Надежность объекта на стадии эксплуатации можно иллюстрировать **графиком типичной зависимости интенсивности отказов объекта от времени эксплуатации**, представленном на рисунке 1.



Рис. 1 – График интенсивности отказов РЭС

По графику $\lambda(t)$ можно определить *три периода эксплуатации изделия*:

I – период приработки. Во время приработки наблюдаются приработочные отказы, обусловленные наличием бракованных изделий со скрытыми дефектами. Интенсивность отказов уменьшается с течением времени. Этот период продолжается от нескольких часов до сотен часов.

II – период нормальной эксплуатации. Характеризуется минимальным количеством отказов, которые имеют постоянное значение до времени t_3 . В этот период наблюдаются, в основном, внезапные отказы, предупредить которые не предоставляется возможным, а их интенсивность отказов является постоянной функцией времени.

III – период износа и старения. Характеризуется наступлением отказов вследствие износа и старения материалов и компонентов. В течение этого периода интенсивность отказов растет. Завершается этот период, и вместе с ним эксплуатация приборов, когда интенсивность отказов приближается к максимально допустимой.

Известно, что отказ элементов РЭУ по своей физической сущности является событием случайным. Случайной величиной, описывающей отказ, является время до отказа. *Для математического описания времени до отказа элементов (кратко говорят – описания отказов) наиболее часто используются следующие законы:* экспоненциальный, нормальный, Вейбулла-Гнеденко.

Экспоненциальный закон наиболее популярен в инженерной практике, поскольку он находит свое применение для описания отказов на II периоде нормальной эксплуатации. Так, промежуток времени между двумя соседними отказами в простейшем потоке отказов есть непрерывная случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону. В последнее время установлено, что время до отказа ряда элементов лучше описывается другими законами – нормальным, Вейбулла, логарифмически нормальным.

Распределение Вейбулла-Гнеденко (см. рис. 2) хорошо описывает время до отказа большинства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также некоторых механических элементов. Кроме того, применяется для описания отказов на I периоде приработки.

При $k = 1$ распределение Вейбулла-Гнеденко (см. рис. 2, а) превращается в экспоненциальное распределение, при $k > 1$ – приближается к нормальному закону (см. рис. 2, б).

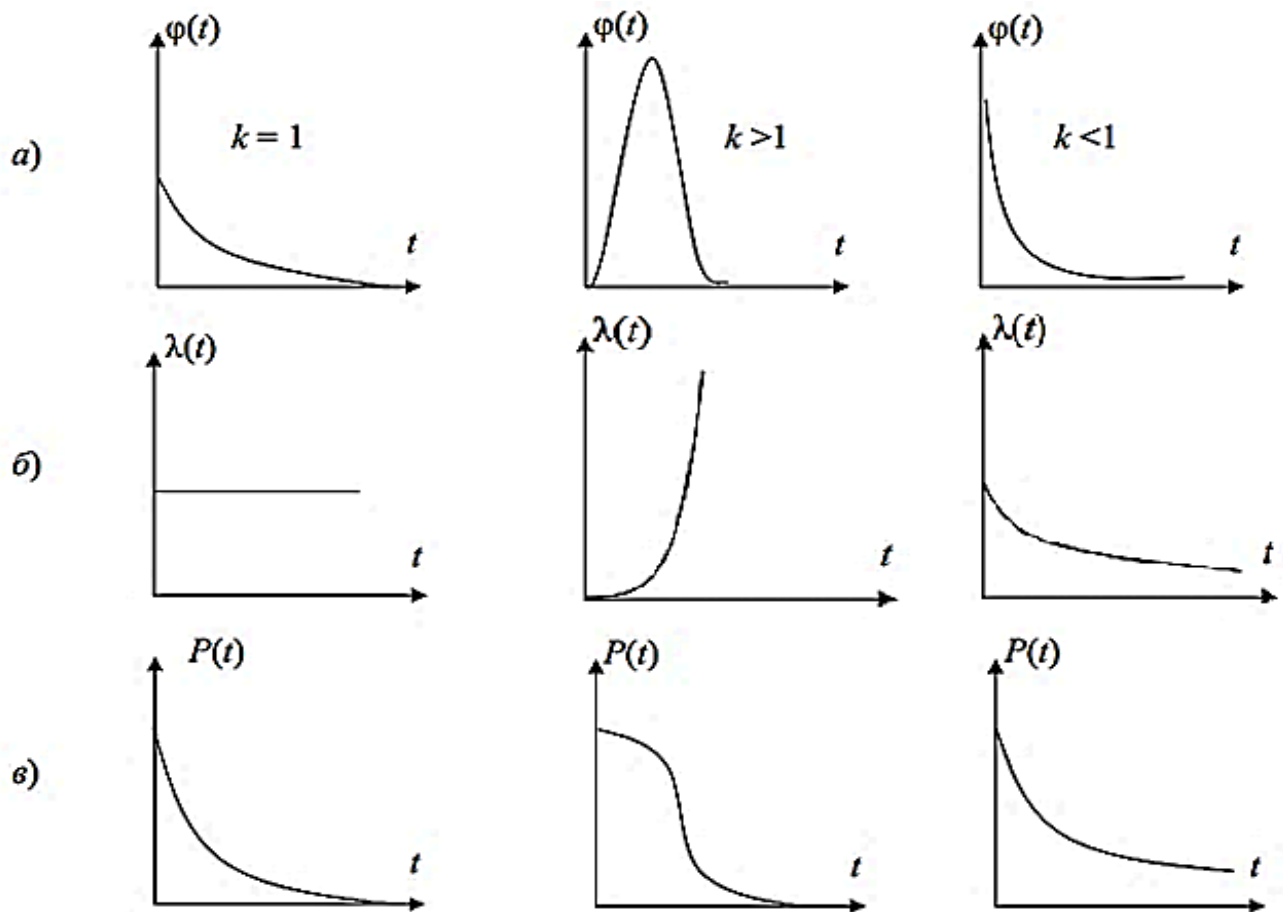


Рис. 2 – Графики функций распределения Вейбулла-Гнеденко

Отказы некоторых типов элементов хорошо описываются **нормальным законом распределения**. Так как наработка до отказа – величина сугубо положительная, то распределение является не чисто нормальным, а усечённым нормальным. Усечённым его называют потому, что область отрицательных значений наработки, как не имеющую физического смысла, отбрасывают (отсекают).

При значении $\tau_{cp}/\sigma t > 2$ в расчётах пользуются чисто нормальным распределением, не принимая во внимание область отрицательных значений наработки до отказа, лишённую физического смысла.

Нормальный закон распределения характерен для элементов, работа которых сопровождается заметными процессами старения и износа (электроннолучевые трубки, кинескопы, тумблеры, переключатели и т.п.). Кроме того, описывает отказы на III периоде износа и старения.

Для элементов, отказ которых происходит в результате усталостного разрушения, наработка до отказа подчинена логарифмически нормальному закону.

Характеристики надёжности радиоэлектронных систем при различных законах распределения времени до отказа

Формулы, по которым определяются количественные характеристики надёжности изделия, имеют вид:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = 1 - \int_0^t \varphi(t) dt; \quad (1)$$

$$Q(t) = 1 - P(t); \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}; \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(t)}{P(t)}; \quad (4)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до t ; $Q(t)$ – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t ; $\varphi(t)$ – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия $T_{\text{ср}}$; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов изделия; $T_{\text{ср}}$ – среднее время безотказной работы изделия.

Формулы для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad (5)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad (7)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}}; \quad (8)$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}.$$

Формулы для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$P(t) = 0,5 - \Phi(U); U = \frac{t - \bar{T}_{\text{ср}}}{\sigma_t}; \quad (9)$$

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(U); \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^U e^{-\frac{u^2}{2}} du; \quad (10)$$

$$\varphi(t) = \frac{\Phi(U)}{\sigma_t}; \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad (11)$$

$$\lambda(t) = \frac{\Phi(U)}{\sigma(t)} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}; \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad (12)$$

где $\Phi(U)$ – функция Лапласа, обладающая свойствами:

$$\Phi(U) = 0; \quad (13)$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U); \quad (14)$$

$$\Phi(\infty) = 0,5; \quad (15)$$

Здесь $\bar{T}_{\text{ср}}$ – среднее значение случайной величины; $\sigma(t)$ – дисперсия случайной величины T ; $T_{\text{ср}}$ – время безотказной работы изделия.

Формулы (16) – (19) для закона распределения Вейбулла-Гнеденко времени безотказной работы изделия имеют вид:

$$P(t) = e^{-at^k}; \quad (16)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-at^k}; \quad (17)$$

$$\varphi(t) = akt^{k-1} \cdot P(t); \quad (18)$$

$$\lambda(t) = akt^{k-1}; \quad (19)$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{a^{\frac{1}{k}}}; \quad (20)$$

где a, k – параметры закона распределения Вейбулла; $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к практическому занятию:

1) Нарботка изделий до отказа.

- 2) Характеристика периодов эксплуатации изделия.
- 3) Интенсивность отказов изделий.
- 4) Законы распределения времени до отказа.
- 5) Характеристика экспоненциального закона.
- 6) Характеристика нормального закона.
- 7) Характеристика закона Вейбулла-Гнеденко.
- 8) Основные характеристики надежности радиоэлектронных систем.
- 9) Формулы для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия.
- 10) Формулы для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия.
- 11) Формулы для закона распределения Вейбулла-Гнеденко времени безотказной работы изделия.

Содержание практической работы в ходе занятия

Описание рабочего оборудования:

Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчетов по практическому занятию;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

Требования безопасности при выполнении работы:

- К проведению практического занятия допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- Включение компьютеров осуществляется только с разрешения преподавателя.
- При проведении практического занятия не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.
- Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов рабочего оборудования (компьютеров).
- При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование (компьютер) от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.
- При возгорании оборудования (компьютера) его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.
- По окончании работы с оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задания для работы:

Базового уровня:

- 1) Провести моделирование закона Вейбулла-Гнеденко распределения времени отказов и исследование его характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.
- 2) Провести моделирование экспоненциального закона распределения времени отказов и исследование его характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.
- 3) Провести моделирование нормального закона распределения времени отказов и исследование его характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.

Повышенного уровня:

- 4) Провести моделирование и исследование интенсивности отказов в процессе эксплуатации РЭС.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Провести моделирование закона Вейбулла-Гнеденко распределений времени отказов и исследование их характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.

Постановка задачи:

Смоделировать, провести исследование и анализ закона Вейбулла-Гнеденко распределений времени отказов РЭС.

Исходные данные для исследования по вариантам представлены в табл. 1.

Порядок выполнения задания:

1.1) Смоделировать в Mathcad Professional закон распределения Вейбулла-Гнеденко.

Для выполнения этой задачи запустить программный пакет Mathcad Professional и занести необходимые исходные данные и расчетные формулы:

а) внести в программу начальные исходные данные: параметры распределения в виде коэффициента формы $k := 0.5$ и коэффициента масштаба $a := 10 \cdot 10^{-3}$;

б) ввести в программу формулу для расчета частоты отказов РЭС или плотности вероятности времени его безотказной работы, т.е.

$$\varphi_V(t) := a \cdot k \cdot t^{k-1} \cdot \exp(-a \cdot t^k);$$

в) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости частоты отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до $a/10$. Пример графика представлен на рис. 3.

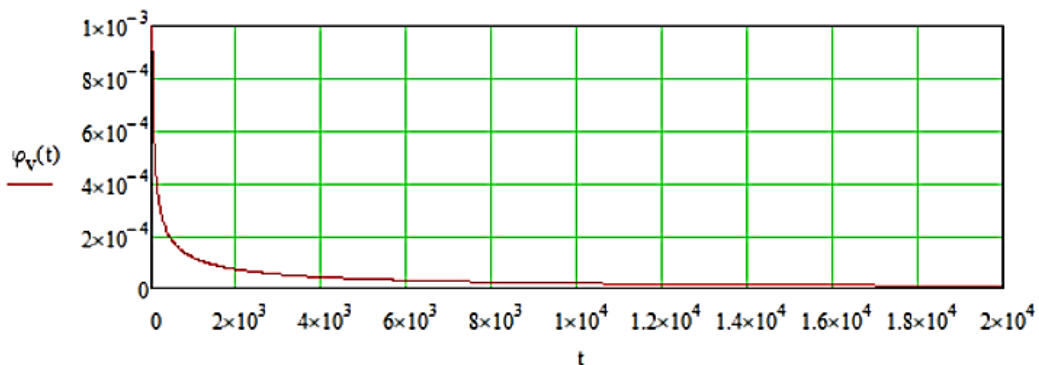


Рис. 3 – График частоты отказов РЭС для закона Вейбулла-Гнеденко

г) ввести в программу формулу для расчета функции распределения Вейбулла, характеризующей распределение случайной величины в виде вероятности того, что время отказа РЭС примет значение меньшее t , т.е.

$$F_V(t) := 1 - \exp(-a \cdot t^k);$$

д) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости функции распределения Вейбулла от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 4.

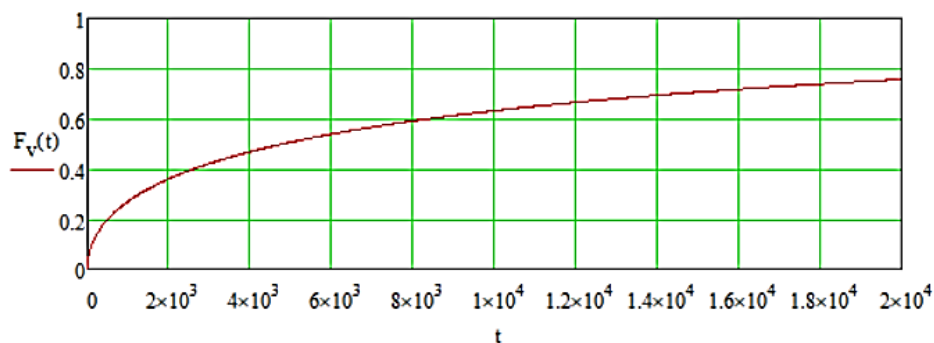


Рис. 4 – График функции распределения Вейбулла (вероятности отказа)

е) ввести в программу формулу для расчета вероятности безотказной работы РЭС на интервале времени от 0 до t , т.е.

$$P_V(t) := \exp(-a \cdot t^k);$$

ж) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости вероятности безотказной работы РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 5.

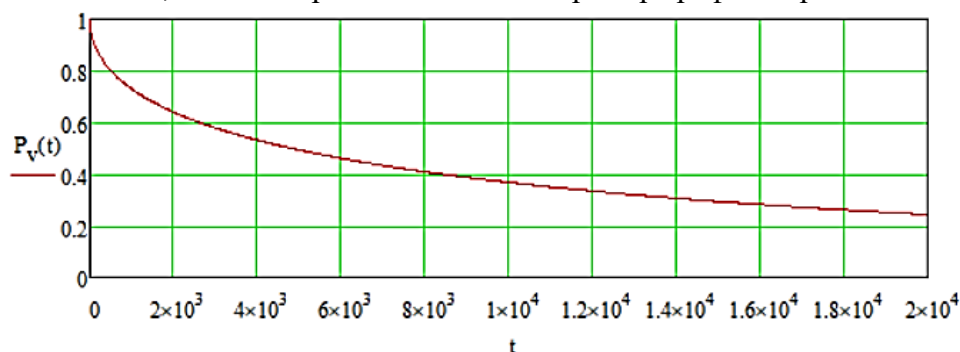


Рис. 5 – График вероятности безотказной работы РЭС

з) ввести в программу формулу для расчета интенсивность отказов РЭС

$$\lambda_v(t) := a \cdot k \cdot t^{k-1};$$

и) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости интенсивность отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до $a/10$. Пример графика представлен на рис. 6.

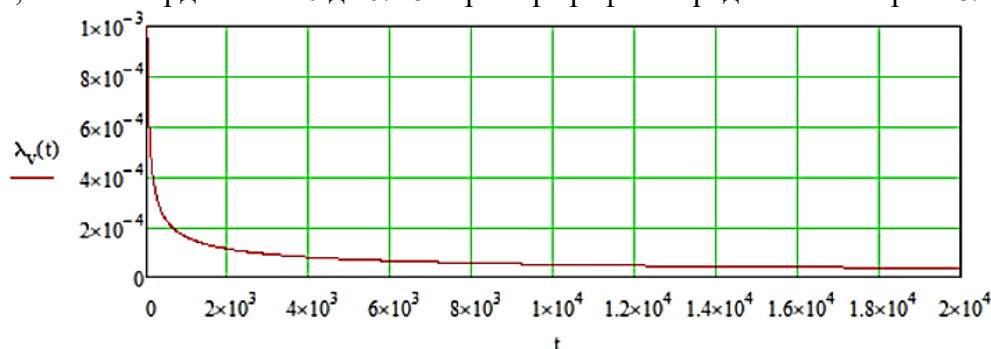


Рис. 6 – График интенсивность отказов РЭС

к) ввести в программу формулу для среднее время безотказной работы РЭС

$$T_{cpv} := \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\frac{1}{a}} = 20 \times 10^3$$

л) сделать выводы по результатам моделирования.

1.2) Провести исследование характеристик надежности РЭС с помощью закона распределения отказов Вейбулла-Гнеденко.

Выполнение этой задачи осуществляется на основе составленной математической модели в пакете Mathcad Professional. Для ее выполнения необходимо привести следующие операции:

а) внести в программу заданные по варианту исходные данные (см. таблицу 1);

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения задания 1.

Вариант	Параметр a	Вариант	Параметр a
1.	$11 \cdot 10^{-3}$	2.	$21 \cdot 10^{-3}$
3.	$12 \cdot 10^{-3}$	4.	$22 \cdot 10^{-3}$
5.	$13 \cdot 10^{-3}$	6.	$23 \cdot 10^{-3}$
7.	$14 \cdot 10^{-3}$	8.	$24 \cdot 10^{-3}$

9.	$15 \cdot 10^{-3}$	10.	$25 \cdot 10^{-3}$
11.	$16 \cdot 10^{-3}$	12.	$26 \cdot 10^{-3}$
13.	$17 \cdot 10^{-3}$	14.	$27 \cdot 10^{-3}$
15.	$18 \cdot 10^{-3}$	16.	$28 \cdot 10^{-3}$
17.	$19 \cdot 10^{-3}$	18.	$29 \cdot 10^{-3}$
19.	$20 \cdot 10^{-3}$	20.	$30 \cdot 10^{-3}$

б) получить для заданных исходных данных характеристики надежности РЭС: частоту отказов; функцию распределения (вероятность отказов), вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднее время безотказной работы. Занести в отчет по ЛР полученные графики и результаты;

в) провести исследования характеристики надежности РЭС от величины a коэффициента масштаба закона распределения, для этого, последовательно изменяя заданный параметр на величину $\pm 5 \cdot 10^{-3}$, повторить задания по пункту б). Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты;

г) провести исследования характеристики надежности РЭС от величины k коэффициента формы закона распределения, для этого, вернуть значение коэффициента a в исходное значение согласно варианту, установить значение k , равное 0.25, повторить задания по пункту б). Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты.

1.3) Сделать выводы по результатам исследования, установив как значения исследуемых параметров закона распределения влияют на частоту отказов, вероятность отказов, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, а также определить на каком периоде эксплуатации РЭС следует пользоваться данным законом распределения для оценки его надежности.

Задание 2. Провести моделирование экспоненциального закона распределений времени отказов и исследование их характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.

Постановка задачи:

Смоделировать, провести исследование и анализ экспоненциального закона распределений времени отказов РЭС.

Порядок выполнения задания:

2.1) Смоделировать в Mathcad Professional экспоненциальный закон распределения.

Для выполнения этой задачи запустить программный пакет Mathcad Professional и занести необходимые исходные данные и расчетные формулы:

а) внести в программу начальные исходные данные: параметр распределения в виде коэффициента масштаба $\lambda_0 := 100 \cdot 10^{-6}$ (1/час), имеющий смысл интенсивности отказов;

б) ввести в программу формулу для расчета частоты отказов РЭС или плотности вероятности времени его безотказной работы, т.е.

$$\varphi_e(t) := \lambda_0 \cdot \exp(-\lambda_0 \cdot t);$$

в) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости частоты отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до λ_0 . Пример графика представлен на рис. 7.

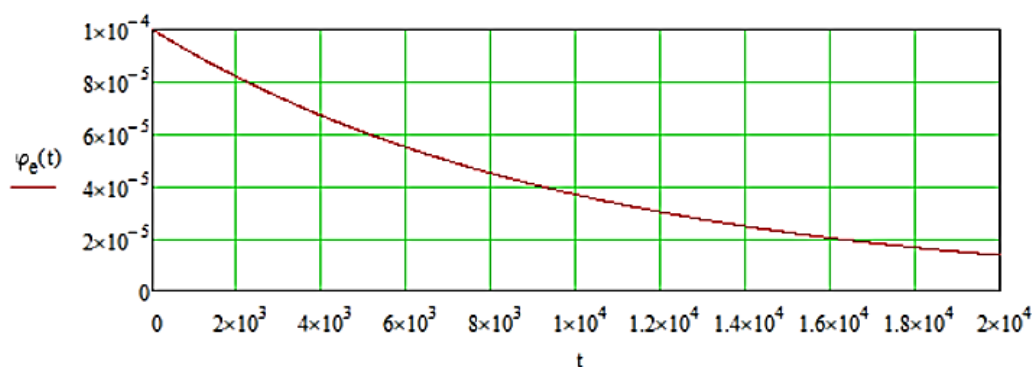


Рис. 7 – График частоты отказов РЭС для экспоненциального закона

г) ввести в программу формулу для расчета функции экспоненциального распределения, характеризующей распределение случайной величины в виде вероятности того, что время отказа РЭС примет значение меньшее t , т.е.

$$F_e(t) := 1 - \exp(-\lambda_0 \cdot t);$$

д) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости функции экспоненциального распределения от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 8.

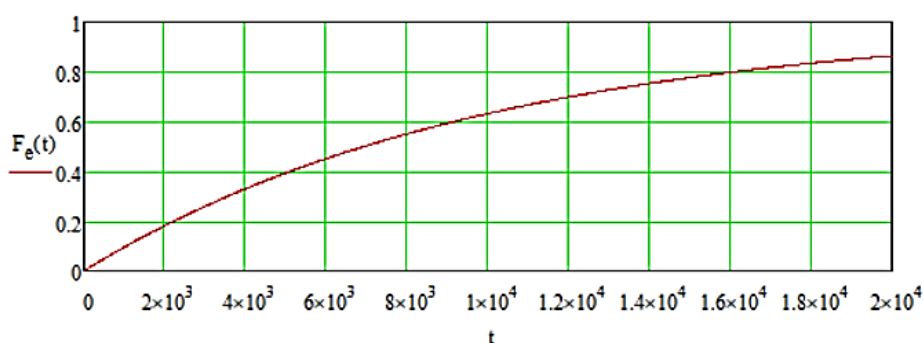


Рис. 8 – График функции экспоненциального распределения (вероятности отказа)

е) ввести в программу формулу для расчета вероятности безотказной работы РЭС на интервале времени от 0 до t , т.е.

$$P_e(t) := \exp(-\lambda_0 \cdot t);$$

ж) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости вероятности безотказной работы РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 9.

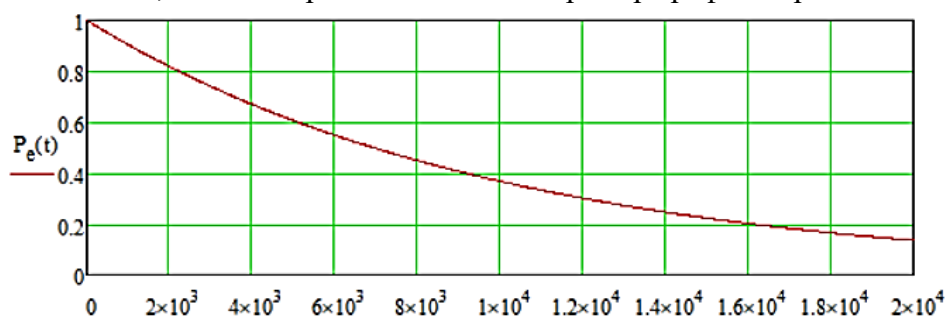


Рис. 9 – График вероятности безотказной работы РЭС

з) ввести в программу формулу для расчета интенсивность отказов РЭС

$$\lambda_e(t) := \frac{\varphi_e(t)}{P_e(t)};$$

и) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости интенсивности отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до $2\lambda_0$. Пример графика представлен на рис. 10.

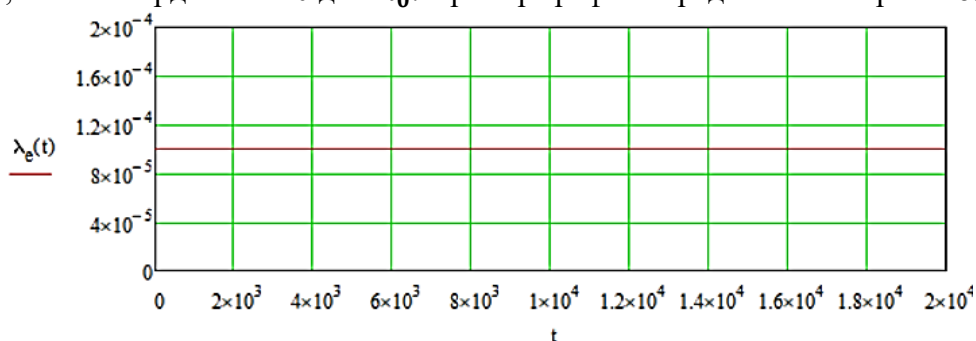


Рис. 10 – График интенсивность отказов РЭС

к) ввести в программу формулу для среднее время безотказной работы РЭС

$$T_{\text{ср}} := \frac{1}{\lambda_0};$$

л) сделать выводы по результатам моделирования.

2.2) Провести исследование характеристик надежности РЭС с помощью экспоненциального закона распределения отказов.

Выполнение этой задачи осуществляется на основе составленной математической модели в пакете Mathcad Professional. Для ее выполнения необходимо привести следующие операции:

а) внести в программу заданные по варианту исходные данные (см. таблицу 2);

Таблица 2 – Исходные данные для выполнения задания 2.

Вариант	Параметр λ_0	Вариант	Параметр λ_0
1.	$50 \cdot 10^{-6}$	2.	$185 \cdot 10^{-6}$
3.	$60 \cdot 10^{-6}$	4.	$190 \cdot 10^{-6}$
5.	$70 \cdot 10^{-6}$	6.	$175 \cdot 10^{-6}$
7.	$80 \cdot 10^{-6}$	8.	$165 \cdot 10^{-6}$
9.	$90 \cdot 10^{-6}$	10.	$145 \cdot 10^{-6}$
11.	$75 \cdot 10^{-6}$	12.	$135 \cdot 10^{-6}$
13.	$120 \cdot 10^{-6}$	14.	$150 \cdot 10^{-6}$
15.	$140 \cdot 10^{-6}$	16.	$130 \cdot 10^{-6}$
17.	$160 \cdot 10^{-6}$	18.	$110 \cdot 10^{-6}$
19.	$180 \cdot 10^{-6}$	20.	$125 \cdot 10^{-6}$

б) получить для заданных исходных данных характеристики надежности РЭС: частоту отказов; функцию распределения (вероятность отказов), вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднее время безотказной работы. Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты;

в) провести исследования характеристики надежности РЭС от величины λ_0 коэффициента масштаба закона распределения, для этого, последовательно изменяя заданный параметр на величину $\pm 25 \cdot 10^{-6}$, повторить задания по пункту б). Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты.

2.3) Сделать выводы по результатам исследования, установив как значения исследуемых параметров закона распределения влияют на частоту отказов, вероятность

отказов, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, а также определить на каком периоде эксплуатации РЭС следует пользоваться данным законом распределения для оценки его надежности.

Задание 3. Провести моделирование нормального закона распределений времени отказов и исследование их характеристик, позволяющих оценивать надежность РЭС.

Постановка задачи:

Смоделировать, провести исследование и анализ нормального (гауссова) закона распределений времени отказов РЭС.

Порядок выполнения задания:

3.1) Смоделировать в Mathcad Professional нормальный закон распределения.

Для выполнения этой задачи запустить программный пакет Mathcad Professional и занести необходимые исходные данные и расчетные формулы:

а) внести в программу начальные исходные данные: параметры распределения в виде математического ожидания времени отказа $T_{cp} := 10 \cdot 10^3$ (час) и дисперсии времени отказа $\sigma := 400$;

б) ввести в программу формулу для расчета частоты отказов РЭС или плотности вероятности времени его безотказной работы, т.е.

$$\varphi_n(t) := \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[\frac{-(t - T_{cp})^2}{2 \cdot \sigma^2} \right];$$

в) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости частоты отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до $\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma}$. Пример графика представлен на рис. 11.

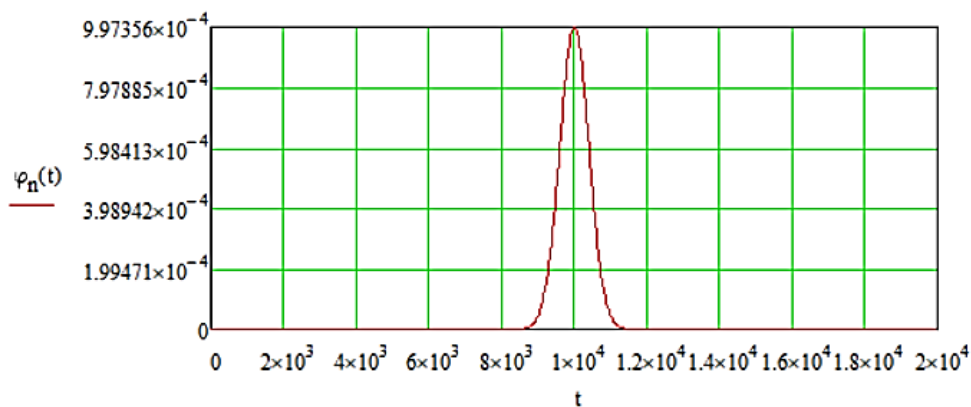


Рис. 11 – График частоты отказов РЭС для нормального закона

г) ввести в программу формулу для расчета функции нормального распределения, характеризующей распределение случайной величины в виде вероятности того, что время отказа РЭС примет значение меньшее t , т.е.

$$F_n(t) := \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_0^t \exp \left[\frac{-(t - T_{cp})^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] dt;$$

д) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости функции нормального распределения от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 12.

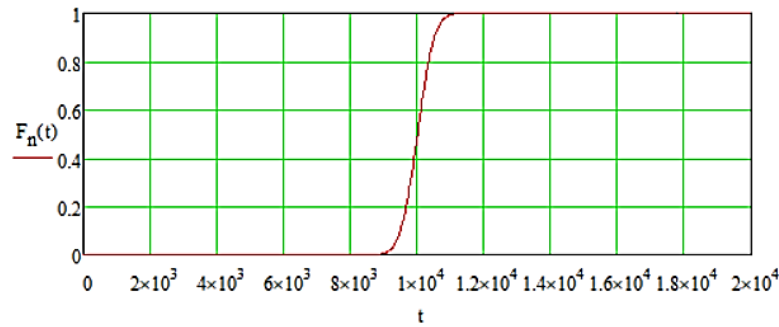


Рис. 12 – График функции нормального распределения (вероятности отказа)
 е) ввести в программу формулу для расчета вероятности безотказной работы РЭС на интервале времени от 0 до t , т.е.

$$P_n(t) := 1 - \int_0^t \varphi_n(t) dt ;$$

ж) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости вероятности безотказной работы РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $20 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 1. Пример графика представлен на рис. 13.

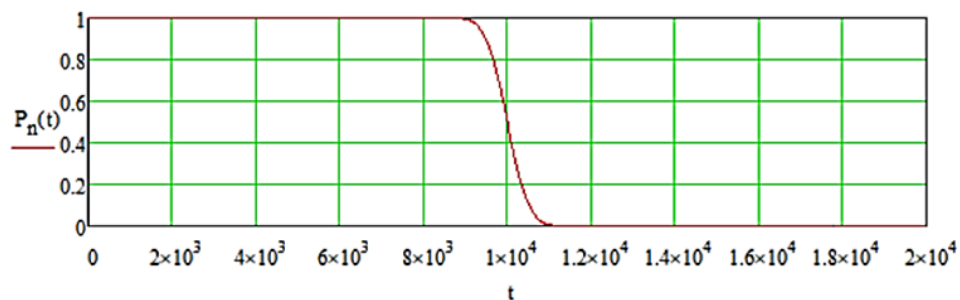


Рис. 13 – График вероятности безотказной работы РЭС

з) ввести в программу формулу для расчета интенсивность отказов РЭС

$$\lambda_n(t) := \frac{\varphi_n(t)}{P_n(t)} ;$$

и) построить и занести в отчет по ЛР график зависимости интенсивность отказов РЭС от времени. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 0 до $12.5 \cdot 10^3$ час, а на оси ординат от 0 до 0.02. Пример графика представлен на рис. 14.

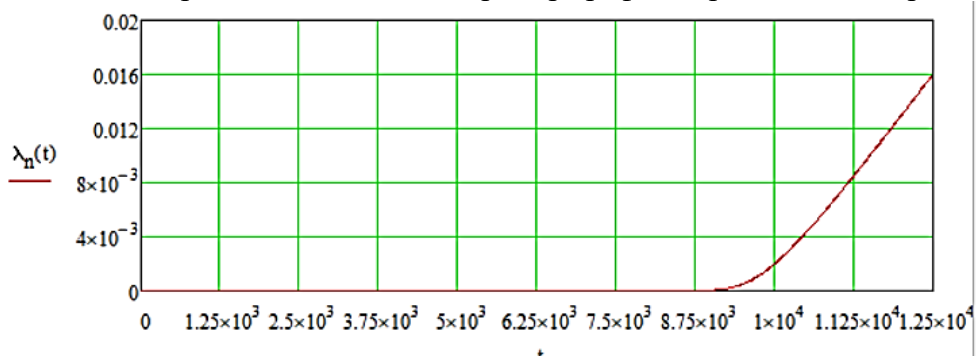


Рис. 14 – График интенсивность отказов РЭС

к) ввести в программу формулу для среднее время безотказной работы РЭС

$$T_{срн} := T_{ср} ;$$

л) сделать выводы по результатам моделирования.

3.2) Провести исследование характеристик надежности РЭС с помощью нормального закона распределения отказов.

Выполнение этой задачи осуществляется на основе составленной математической модели в пакете Mathcad Professional. Для ее выполнения необходимо привести следующие операции:

а) внести в программу заданные по варианту исходные данные (см. таблицу 3);

Таблица 3 – Исходные данные для выполнения задания 3.

<i>Вариант</i>	$T_{\text{ср, час}}$	σ	<i>Вариант</i>	$T_{\text{ср, час}}$	σ
1.	$7.5 \cdot 10^3$	400	2.	$13.5 \cdot 10^3$	500
3.	$8 \cdot 10^3$	400	4.	$14 \cdot 10^3$	500
5.	$8.5 \cdot 10^3$	400	6.	$14.5 \cdot 10^3$	350
7.	$9 \cdot 10^3$	400	8.	$15 \cdot 10^3$	350
9.	$9.5 \cdot 10^3$	450	10.	$15.5 \cdot 10^3$	350
11.	$10.5 \cdot 10^3$	450	12.	$16 \cdot 10^3$	350
13.	$11 \cdot 10^3$	450	14.	$7 \cdot 10^3$	300
15.	$11.5 \cdot 10^3$	450	16.	$6.5 \cdot 10^3$	300
17.	$12.5 \cdot 10^3$	500	18.	$6 \cdot 10^3$	300
19.	$13 \cdot 10^3$	500	20.	$5.5 \cdot 10^3$	300

б) получить для заданных исходных данных характеристики надежности РЭС: частоту отказов; функцию распределения (вероятность отказов), вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднее время безотказной работы. Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты;

в) провести исследования характеристики надежности РЭС от величины $T_{\text{ср}}$ математического ожидания закона распределения, для этого, последовательно изменяя заданный параметр на величину $\pm 2 \cdot 10^3$, повторить задания по пункту б). Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты;

г) провести исследования характеристики надежности РЭС от величины σ дисперсии закона распределения, для этого, вернуть значение $T_{\text{ср}}$ в исходное значение согласно варианту, последовательно изменяя σ на величину ± 100 , повторить задания по пункту б). Занести в отчет по лабораторной работе полученные графики и результаты.

3.3) Сделать выводы по результатам исследования, установив как значения исследуемых параметров закона распределения влияют на частоту отказов, вероятность отказов, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, а также определить на каком периоде эксплуатации РЭС следует пользоваться данным законом распределения для оценки его надежности.

Задание 4. Провести моделирование и исследование интенсивности отказов в процессе эксплуатации РЭС (повышенный уровень.

Постановка задачи:

Смоделировать зависимость интенсивности отказов РЭС в процессе его эксплуатации с учетом особенностей каждого из трех периодов эксплуатации. Моделирование произвести на основе закона Вейбулла-Гнеденко распределения времени отказов, имеющего возможность превращаться в экспоненциальное и нормальное распределения путем изменения коэффициента формы. Зависимость интенсивности отказов в первом период эксплуатации смоделировать с помощью распределения Вейбулла, а во втором и третьем периодах – с помощью экспоненциального и нормального распределений соответственно. Провести исследование зависимости интенсивности отказов РЭС во времени в каждом периоде эксплуатации. Исходные данные для моделирования по заданным вариантам приведены в таблицах 1 – 3.

Порядок выполнения задания:

4.1) Смоделировать в Mathcad Professional зависимость интенсивности отказов РЭС в процессе его эксплуатации.

Для выполнения этой задачи запустить программный пакет Mathcad Professional и занести необходимые исходные данные и расчетные формулы:

а) внести в программу начальные исходные данные:

- коэффициент формы для распределения Вейбулла-Гнеденко $k_v := 0.5$;
- коэффициент формы для экспоненциального распределения $k_e := 1$;
- коэффициент формы для нормального распределения $k_n := 3.3$;
- коэффициент масштаба для распределения Вейбулла $\lambda_{0v} := a/10$ (a из таблицы 1);
- коэффициент масштаба (интенсивность) для экспоненциального распределения $\lambda_{0e} := \lambda_0$ (λ_0 из таблицы 2);
- математическое ожидание (среднее время безотказной работы) для нормального распределения $T := T_{cp}$ (T_{cp} из таблицы 3);

— коэффициент масштаба для нормального распределения $\lambda_{0n} := 1 \cdot 10^{-17}$ для нечетных вариантов и $\lambda_{0n} := 1 \cdot 10^{-16}$ – для четных вариантов;

б) ввести в программу формулы для расчета интенсивностей отказов РЭС в трех периодах эксплуатации, т.е.

$$\lambda_v(t) := \lambda_{0v} \cdot k_v \cdot t^{k_v-1}, \quad \lambda_e(t) := \lambda_{0e} \cdot k_e \cdot t^{k_e-1} \quad \text{и} \quad \lambda_n(t) := \lambda_{0n} \cdot k_n \cdot (t - T)^{k_n-1};$$

в) построить и занести в отчет по ЛР графики зависимостей интенсивностей отказов РЭС от времени для трех периодов эксплуатации. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 1 до 10^6 час в логарифмическом масштабе, а на оси ординат от 0 до 0.001. Пример графика представлен на рис. 15.

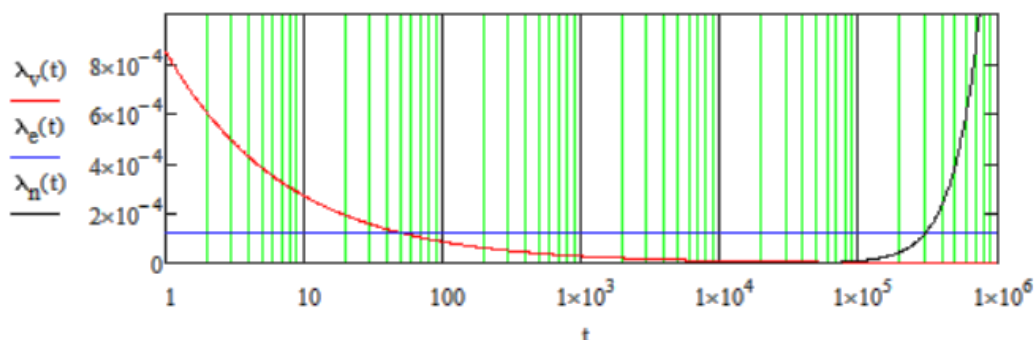


Рис. 15 – Графики интенсивностей отказов РЭС

г) определить с помощью графиков время окончания первого периода эксплуатации $t1$ (точка пересечения графиков красного и синего цветов) и время окончания второго периода – $t2$ (точка пересечения графиков черного и синего цветов), занести эти значения $t1$ и $t2$ в качестве исходных данных для дальнейшего моделирования;

д) ввести в программу обобщенную формулу для расчета интенсивности отказов РЭС в процессе эксплуатации, т.е.

$$\lambda(t) := \begin{cases} \lambda_v(t) & \text{if } t \leq t1 \\ \lambda_e(t) & \text{if } t1 < t < t2 \\ \lambda_n(t) & \text{if } t \geq t2 \end{cases};$$

е) построить и занести в отчет по ЛР требуемый график зависимости интенсивности отказов РЭС в процессе эксплуатации. Для наглядности на графике установить на оси абсцисс интервал времени от 1 до 10^6 час в логарифмическом масштабе, а на оси ординат от 0 до 0.001. Пример полученного графика представлен на рис. 16;

ж) сделать выводы по результатам моделирования.

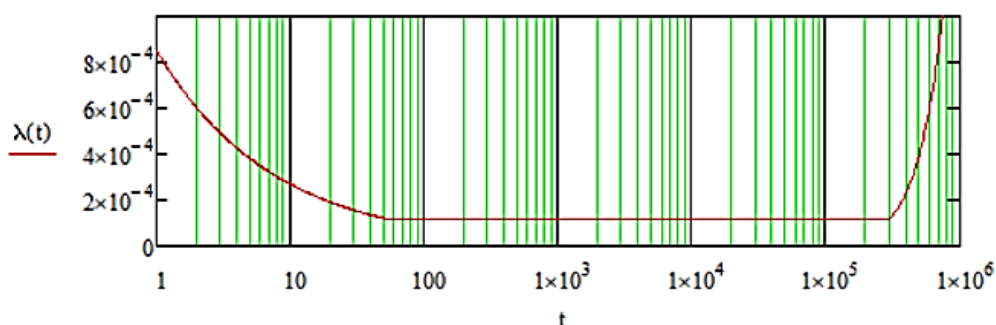


Рис. 16 – График зависимости интенсивности отказов РЭС в процессе эксплуатации

4.2) Провести исследование зависимости интенсивности отказов РЭС во времени в каждом периоде эксплуатации.

Выполнение этой задачи осуществляется на основе составленной математической модели в пакете Mathcad Professional. Для ее выполнения необходимо привести следующие операции:

а) установить, как влияет на длительность первого периода эксплуатации РЭС величина коэффициента масштаба для распределения Вейбулла λ_{0v} , для этого, изменяя эту величину на $\pm 10 \cdot 10^{-4}$, определить значения времени t_1 и занести их в отчет по ЛР;

б) установить, как измениться график интенсивности отказов РЭС от величины коэффициента масштаба λ_{0e} экспоненциального распределения, для этого изменяя эту величину на $\pm 50 \cdot 10^{-6}$, определить значения времен t_1 и t_2 , занести их в отчет по ЛР;

в) установить, как влияет на длительность второго периода эксплуатации РЭС коэффициент масштаба для нормального распределения λ_{0n} , для этого, изменяя эту величину на один порядок, например, введя для рассматриваемого примера 10^{-16} и 10^{-18} , определить значения времени t_2 и занести их в отчет по ЛР.

4.3) Сделать выводы по результатам исследования, установив как значения исследуемых параметров влияют на зависимость интенсивности отказов РЭС, а также определить на каком периоде эксплуатации РЭС используется тот или иной закон распределения.

Задание 5. Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

- тему и цель работы, задания для исследований;
- листинги составленных программ моделирования в Mathcad Professional;
- полученные результаты расчетов, представленные в таблицах;
- полученные в ходе исследования графики;
- выводы по результатам проделанной работы и выполнения заданий.

2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

Лабораторная работа разработана
доцентом кафедры инфокоммуникаций,
кандидатом технических наук, доцентом, профессором РАЕ
К.М. Сагдеевым

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Тема №4: ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ СТРУКТУРНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Время – 2 учебных часа.

Целевая установка лабораторной работы:

В ходе занятия студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- осуществлять эксплуатацию систем связи путем применения метода структурного резервирования РЭС для повышения их надежности (ПК-6);
- выполнять расчеты показателей надежности РЭС действующего оборудования систем связи с учетом различных видов структурного резервирования (ПК-6);
- применять способы структурного резервирования, в том числе осуществлять их оптимизацию при ограничении на затраты, для обеспечения надежности РЭС, соответствующей установленным эксплуатационно-техническим нормам (ПК-7).

Учебно-материальное обеспечение:

1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы.

Показателей надежности при общем резервировании

Вероятность наступления отказа всей системы при общем резервировании определяется одновременным отказом основной и m резервных цепей.

Вероятность отказа основной цепи

$$Q_{\text{осн}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t); \quad (1)$$

для всей системы:

$$Q_c(t) = Q_{\text{осн}}(t) \prod_{j=1}^m q_j(t). \quad (2)$$

Зная, что $Q_{\text{осн}}(t) = q_j(t)$, имеем

$$Q_c(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}. \quad (3)$$

Переходя к *вероятности безотказной работы*, получаем

$$P_{\text{общ}}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}, \quad (4)$$

где n – количество элементов основной цепи; $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента основной цепи; m – количество резервных цепей.

При экспоненциальном законе надежности, когда $P_i = e^{-\lambda_i t}$, при

$$P_{\text{общ}}(t) = 1 - \left[1 - e^{-n\lambda_i t} \right]^{m+1} = 1 - \left[1 - e^{-\Lambda t} \right]^{m+1}, \quad (5)$$

одинаковой надежности элементов для общего резервирования, полагая $n\lambda_i = \Lambda$,

Для численных значений кратности резервирования ниже приведены значения коэффициента A_m для различных m .

m	1	2	3	4	5
A_m	1,5	1,83	2,08	2,28	2,45

Если проанализировать выражение для вероятности безотказной работы системы с общим постоянным резервированием **можно сделать следующие выводы:**

1) с увеличением кратности резервирования «m» вероятность безотказной работы увеличивается, однако очень медленно;

2) наибольший прирост вероятности безотказной работы наблюдается при переходе от нерезервированной системы к резервированной с кратностью $m=1$ (при равной надежности этих цепей вероятность безотказной работы увеличится в 1,5 раза).

Итак, общее постоянное резервирование при постоянном включении резерва целесообразно при небольшой кратности резервирования. С увеличением кратности резервирования выигрыш в надежности снижается. Поэтому рассматриваемый **общий резерв целесообразно применять при резервировании сравнительно простых блоков и систем. Основное достоинство общего постоянного резервирования – простота и экономичность.**

Раздельное резервирование:

Для схемы с раздельным резервированием i -й группы элементов вероятность безотказной работы

$$P_i(t)_{\text{разд}} = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} [1 - P_i(t)] = 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1}. \quad (6)$$

Вероятность безотказной работы всей системы при поэлементном резервировании

$$P_{\text{разд}}(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - [1 - P_i(t)]^{m+1} \right\}. \quad (7)$$

Для раздельного резервирования и экспоненциального закона надежности при одинаковой вероятности отказов всех элементов получаем, что **вероятность безотказной работы всей системы равна**

$$P_{\text{разд}}(t) = \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda_i t} \right)^{m+1} \right]^n, \quad (8)$$

Из анализа схем построения систем при общем и раздельном (поэлементном) резервировании с учетом выражений следует, что **раздельное резервирование** (в предположении абсолютной надежности устройств переключения резервных элементов) **приводит к большому эффекту в повышении надежности системы по сравнению с общим резервированием.**

Сравнительную оценку эффективности общего и раздельного резервирования произведем на гипотетическом примере: оценке надежностей системы, у которой все блоки равнонадежны. При этом $P_i = 0,9$; $m = 1$; $n = 3$. Для этой системы безотказность работы при общем резервировании определяется выражением:

$$P_{\text{об}}(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m-1} = 0,92$$

При раздельном резервировании по формуле:

$$P_p(t) = \left[1 - (1 - P_i)^{m+1} \right]^n \equiv 0,97.$$

Из сравнительной оценки результатов расчета видно, что для нашего случая при раздельном резервировании надежность системы выше приблизительно на половину порядка.

Однако раздельное резервирование в реальных условиях требует гораздо большего количества переключателей и устройств контроля технического состояния и резервных элементов системы. **Эти устройства обладают своей ненадежностью, что необходимо учитывать при построении систем со структурной избыточностью.**

Оптимизация резервирования

Под оптимальным резервированием понимают резервирование, обеспечивающее получение наибольшего эффекта повышения надежности с минимальными затратами.

Под «затратами» понимают факторы, определяющие оптимальность резервирования в зависимости от конкретных требований.

Максимальная надежность аппаратуры с раздельным резервированием может быть обеспечена только лишь при некотором оптимальном числе резервирующих элементов, если известна вероятность отказов коммутирующих устройств и кратность резервирования.

Осуществляя оптимизацию резервирования с учетом ограничений по стоимости, весу или габаритам, **следует рассматривать два аспекта этой задачи:**

- 1) обеспечение заданной надежности при минимальных затратах на резервирование;
- 2) обеспечение максимальной надежности при известных допустимых затратах на резервирование.

Реализацию оптимизации системы (объекта) можно представить в виде следующего процесса: в качестве исходной рассматривается система (объект) без резерва, а затем отыскивается участок для резервирования, дающий наилучший результат. Далее отыскивается новый участок резервирования для новой системы (системы с одним зарезервированным участком). Аналогично процесс продолжается до тех пор, пока не будет удовлетворено условие одной из задач.

Используя резервирование и другие способы повышения надежности, можно получить сколько угодно высокую надежность РЭС. Однако при этом наблюдается рост массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому **правомерна постановка и решение задачи оптимального резервирования, которая формулируется в одном из следующих вариантов:**

- 1) Меняя число резервных элементов и способ резервирования обеспечить максимальное значение показателя надежности при выполнении заданных ограничений на массогабаритные или стоимостные показатели:

$$\left. \begin{array}{l} P(t) \rightarrow \max \\ c \leq c_{\text{зад}}; m \leq m_{\text{зад}}; V \leq V_{\text{зад}}. \end{array} \right\} \quad (10)$$

- 2) Варьируя числом резервных элементов и способом резервирования, обеспечить минимум стоимости (массы, объема) при выполнении заданных ограничений на показатели надежности:

$$\left. \begin{array}{l} c \rightarrow \min; m \rightarrow \min; V \rightarrow \min \\ P(t) \geq P_{\text{зад}}(t) \end{array} \right\} \quad (11)$$

Известны две группы методов для решения задач оптимального резервирования – точные методы (метод полного перебора, динамического программирования, метод ветвей и границ) и приближенные методы (метод множителей Лагранжа и метод наискорейшего спуска (градиентный метод)).

Для высоконадежных систем, к которым относятся техника связи специального можно использовать приближенные методы, они дают достаточно точные результаты.

Рассмотрим *градиентный метод оптимизации*. Сущность данного метода оптимизации заключается в том, что процесс оптимизации разворачивается во времени таким образом, что на каждом шаге отыскивается участок резервирования, подключение к которому одного элемента дает наибольший выигрыш в виде увеличения показателя надежности на единицу затрат, то есть *дает наибольшее значение градиента*:

$$\gamma_i^1 = \frac{P_i^1 - P^0}{C_i^1 - C^0}; \quad i = 1 \dots n, \quad (12)$$

где P_i^1 и C_i^1 – соответственно вероятность безотказной работы и стоимость системы на первом шаге оптимизации при условии, что с целью повышения надежности зарезервирован i -й участок; P^0 и C^0 – вероятность безотказной работы и стоимость исходной нерезервированной системы; γ_i^1 – градиент i -ого участка на первом шаге оптимизации.

Этот участок резервируется и первый шаг оптимизации заканчивается.

На следующем шаге рассматривается система, у которой i -ый участок уже зарезервирован. Опять *отыскивается участок системы, у которого будет наибольший градиент*:

$$\gamma_j^2 = \frac{P_j^2 - P_i^1}{C_j^2 - C_i^1}; \quad j = 1 \dots n, \quad (13)$$

где P_j^2 и C_j^2 – соответственно вероятность безотказной работы и стоимость системы на втором шаге оптимизации при условии, что с целью повышения надежности зарезервирован j -й участок; γ_j^2 – градиент j -ого участка на втором шаге оптимизации.

Этот участок резервируется, и второй шаг оптимизации заканчивается.

Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто либо требуемое значение вероятности безотказной работы системы, либо не будет превышено допустимое значение стоимости.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к лабораторной работе:

- 1) Надежность. Исправность и работоспособность. Отказ.
- 2) Безотказность. Показатели надежности, характеризующие безотказность.
- 3) Структурная схема надежности. Определение вероятности безотказной работы для последовательного и параллельного соединения элементов.
- 4) Сущность, структурная схема надежности и формула для определения вероятности безотказной работы при общем постоянном резервировании.
- 5) Сущность, структурная схема надежности и формула для определения вероятности безотказной работы при поэлементном постоянном резервировании.
- 6) Сущность, структурная схема надежности и формула для определения вероятности безотказной работы при резервировании замещением.
- 7) Оптимальное резервирование и процесс оптимизации.
- 8) Суть градиентного метода оптимизации.

Содержание практической работы в ходе занятия

Описание лабораторного оборудования:

Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

Требования безопасности при выполнении работы:

- 1) К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2) Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3) При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4) Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5) При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6) При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7) По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание для работы по первому и второму учебному вопросу

Базового уровня:

1) Провести исследование показателей надежности РЭС при общем резервировании.

2) Провести исследование показателей надежности РЭС при раздельном резервировании.

Повышенного уровня:

3) Провести оптимизацию структурного резервирования РЭС при ограничениях на стоимость.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Провести исследование показателей надежности РЭС при общем резервировании.

Постановка задачи: РЭС состоит из четырёх последовательно соединённых блоков, интенсивности отказов которых распределены по экспоненциальному закону. Схема устройства представлена на рис.1. Варианты индивидуальных исходных данных приведены в таблице 1. С помощью общего структурного резервирования обеспечить вероятность безотказной работы РЭС $R_{\text{общ.зад}}$ не меньше 0,99.

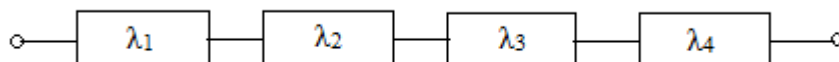


Рисунок 1 – Модель надежности РЭС

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения задания 1 и 2

Номер варианта	Условие задачи
1.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $15 \cdot 10^3$ часов.
2.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $20 \cdot 10^3$ часов.
3.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $25 \cdot 10^3$ часов.
4.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $30 \cdot 10^3$ часов.
5.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$, $6 \cdot 10^{-6}$ и $8 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $35 \cdot 10^3$ часов.
6.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $40 \cdot 10^3$ часов.

Номер варианта	Условие задачи
7.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $45 \cdot 10^3$ часов.
8.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $50 \cdot 10^3$ часов.
9.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $55 \cdot 10^3$ часов.
10.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $60 \cdot 10^3$ часов.
11.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $50 \cdot 10^3$ часов.
12.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $45 \cdot 10^3$ часов.
13.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $40 \cdot 10^3$ часов.
14.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $35 \cdot 10^3$ часов.
15.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $2 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $35 \cdot 10^3$ часов.
16.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $95 \cdot 10^3$ часов.
17.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $90 \cdot 10^3$ часов.
18.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $80 \cdot 10^3$ часов.
19.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $75 \cdot 10^3$ часов.
20.	Интенсивность отказов блоков РЭС равна $1 \cdot 10^{-6}$, $3 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-6}$ и $0.5 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Время непрерывной работы – $70 \cdot 10^3$ часов.

Порядок исследований в задании 1:

- 1) Открыть Mathcad Professional, ввести исходные данные из таблицы 1.
- 2) Вести формулу для расчета вероятности безотказной работы системы и вероятности отказа системы без резервирования:

$$P_c := \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i t} \quad \text{и} \quad Q_c := 1 - P_c.$$

- 3) Рассчитать и занести в таблицу 2 значения вероятностей без резервирования.
- 4) Вести формулу для расчета среднего времени безотказной работы системы без резервирования:

$$T_{cp} := \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}.$$

- 5) Рассчитать и занести в таблицу 2 значение среднего времени безотказной работы РЭС без резервирования.

Таблица 2 – Полученные в задании 1 результаты исследования

<i>Число резервных цепей m</i>	<i>Без резервирования</i>	<i>m=1</i>	<i>m=2</i>	<i>m=3</i>	<i>m=4</i>	
Вероятности безотказной работы РЭС при общем резервировании, $P_{общ}$						
Вероятность отказа системы при общем резервировании, $Q_{общ}$						
Среднее время безотказной работы, $T_{ср}$						
Выигрыш надежности по вероятности отказа, G_Q						
Выигрыш надежности по среднему времени безотказной работы, A_T						

6) Проанализировать полученные результаты, сделать вывод о том, какими способами можно повысить надежность РЭС.

7) Провести исследование параметров надежности заданной схемы РЭС при общем резервировании.

а) Смоделировать структурно резервированную РЭС и провести исследование ее свойств при общем резервировании одной резервной цепью. Для этого выполнить следующие действия:

– ввести в схему модели надежности РЭС, представленной на рис.1., резервную цепь ($m=1$); построить схему надежности, занести её в отчет по лабораторной работе.

– ввести формулу для расчета вероятности безотказной работы системы при общем резервировании:

$$P_{общ} := 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i \cdot t} \right)^{m+1};$$

– рассчитать и занести в таблицу 2 значение вероятности безотказной работы РЭС при общем резервировании одной резервной цепью;

– ввести формулу для расчета вероятности отказа системы при общем резервировании:

$$Q_{общ} := 1 - P_{общ};$$

– рассчитать и занести в таблицу 2 значение вероятности отказа РЭС при общем резервировании одной резервной цепью;

– ввести формулу для расчета среднего времени безотказной работы РЭС при общем резервировании:

$$T_{ср.общ} := T_{ср} \cdot \sum_{j=1}^{m+1} \frac{1}{j};$$

– рассчитать и занести в таблицу 2 значение среднего времени безотказной работы РЭС при общем резервировании одной резервной цепью;

– ввести формулу для расчета выигрыша надежности по вероятности отказа при общем резервировании:

$$G_Q := \frac{Q_c}{Q_{общ}};$$

- рассчитать и занести в таблицу 2 значение выигрыша надежности по вероятности отказа при общем резервировании одной резервной цепью;
- ввести формула для расчета выигрыша надежности по среднему времени безотказной работы при общем резервировании:

$$A_T := \sum_{j=1}^{m+1} \frac{1}{j};$$

- рассчитать и занести в таблицу 2 значение выигрыша надежности по среднему времени безотказной работы при общем резервировании одной резервной цепью;
- сделать вывод об эффективности способа общего резервирования при наличии одной резервной цепи.

б) Провести исследование свойств структурно резервированной РЭС при общем резервировании несколькими резервными цепями. Для этого выполнить следующие действия:

- последовательно, устанавливая число резервных цепей, равное $m = 2, 3, 4$ (а при необходимости $m=5$ для обеспечения $P_{\text{общ.зад}} \geq 0,99$), выполнить все операции, приведенные в пункте 7), а); полученные результаты занести в таблицу 2;

- рассчитать и занести в отчет по ЛР необходимое количество резервных цепей m_n для получения заданной вероятности безотказной работы системы при общем резервировании, воспользовавшись формулой

$$m_n := \frac{\ln(1 - P_{\text{общ.зад}})}{\ln(1 - P_c)} - 1;$$

- экспериментально определить необходимое количество резервных цепей m_n для получения заданной вероятности безотказной работы системы при общем резервировании, сравнить полученные результаты;

- ввести формулы для построения зависимостей вероятностей безотказной работы от времени:

$$P_c(t) := \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i t} \quad \text{и} \quad P_{\text{общ}}(t, m) := 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i t} \right)^{m+1}$$

- построить и занести в отчет по ЛР графики зависимостей вероятностей безотказной работы РЭС без общего резервирования $P_c(t)$ и с общим резервированием $P_{\text{общ}}(t, m)$ при количестве цепей резервирования $m = 1, 2, 3$ и 4; пример данных зависимостей представлен на рис. 2.

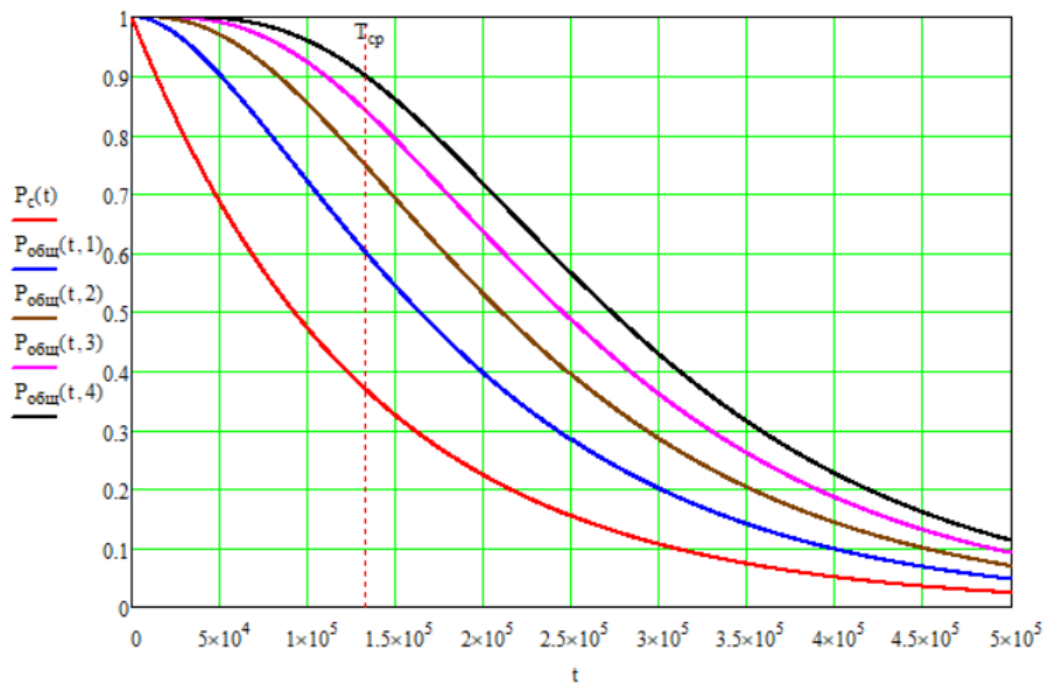


Рис. 2 – Графики зависимостей вероятностей безотказной работы от времени

8) Уменьшить интенсивность отказов блоков РЭС в 2 или 3 раза. Повторить исследования параметров надежности заданной схемы РЭС при общем резервировании, выполнив все операции, указанные в пунктах 7), а) и б), до тех пор пока не будет выполнено условие $P_{\text{общ,зад}} \geq 0,99$. Полученные результаты занести в новую таблицу 2, а.

9) Сделать вывод об эффективности способа общего резервирования, о том, как влияет увеличение числа резервных цепей m на параметры надежности, о целесообразности ввода такого числа резервных цепей.

Задание 2. Провести исследование показателей надежности РЭС при раздельном резервировании.

Постановка задачи: РЭС состоит из четырех последовательно соединенных блоков, интенсивности отказов которых распределены по экспоненциальному закону. Схема устройства представлена на рис.1. Варианты индивидуальных исходных данных приведены в таблице 1. С помощью раздельного структурного резервирования обеспечить вероятность безотказной работы не меньше 0,99.

Порядок исследования:

- 1) В новом файле Mathcad Professional ввести исходные данные из табл. 1.
- 2) Скопировать из предыдущего файла и внести в новый файл формулы для расчета вероятностей безотказной работы системы и отказа системы без резервирования, а также для расчета среднего времени безотказной работы системы без резервирования:

$$P_c := \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i t}, \quad Q_c := 1 - P_c, \quad T_{\text{ср}} := \frac{1}{\sum_{i=1}^4 \lambda_i}.$$

- 3) Рассчитать и занести в таблицу 3 значения полученных параметров заданной РЭС без резервирования.

Таблица 3 – Полученные в задании 2 результаты исследования

<i>Число резервных цепей m</i>	<i>Без резервирования</i>	<i>$m=1$</i>	<i>$m=2$</i>	<i>$m=3$</i>
Вероятности безотказной работы РЭС при раздельном резервировании, $P_{\text{разд}}$				
Вероятность отказа системы при раздельном резервировании, $Q_{\text{разд}}$				
Среднее время безотказной работы, $T_{\text{ср}}$				
Выигрыш надежности по вероятности отказа, G_Q				
Выигрыш надежности по среднему времени безотказной работы, A_T				

Проанализировать полученные результаты, сделать вывод о том, какими способами можно повысить надежность РЭС.

4) Провести исследование параметров надежности заданной схемы РЭС при раздельном резервировании.

а) Смоделировать структурно резервированную РЭС и провести исследование ее свойств при раздельном (поблочном) резервировании отдельными резервными блоками. Для этого выполнить следующие действия:

- ввести в схему модели надежности РЭС, представленной на рис.1., по одному резервному блоку ($m=1$); построить схему надежности, занести её в отчет по лабораторной работе;
- ввести формулу для расчета вероятности безотказной работы системы при раздельном резервировании:

$$P_{\text{разд}} := \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda_i t} \right)^{m+1} \right];$$

- рассчитать и занести в таблицу 3 значение вероятности безотказной работы РЭС при раздельном резервировании каждого блока РЭС одним резервным блоком;
- ввести формулу для расчета вероятности отказа системы при раздельном резервировании:

$$Q_{\text{разд}} := 1 - P_{\text{разд}};$$

- рассчитать и занести в таблицу 3 значение вероятности отказа РЭС при раздельном резервировании каждого блока РЭС одним резервным блоком;
- ввести формулу для расчета среднего времени безотказной работы РЭС при раздельном резервировании:

$$T_{\text{ср.разд}} := T_{\text{ср}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left[(-1)^i \cdot \sum_{j=0}^m \left[(-1)^j \cdot \frac{1}{(m+1) \cdot i + j + 1} \right] \right];$$

- рассчитать и занести в таблицу 3 значение среднего времени безотказной работы РЭС при раздельном резервировании каждого блока РЭС одним резервным блоком;
- ввести формулу для расчета выигрыша надежности по вероятности отказа при раздельном резервировании:

$$G_{Q.\text{разд}} := \frac{Q_c}{Q_{\text{разд}}};$$

- рассчитать и занести в таблицу 3 значение выигрыша надежности по вероятности отказа при раздельном резервировании каждого блока РЭС одним резервным блоком;
- ввести формула для расчета выигрыша надежности по среднему времени безотказной работы при раздельном резервировании:

$$A_{T, \text{разд}} := \sum_{i=0}^{n-1} \left[(-1)^i \cdot \sum_{j=0}^m \left[(-1)^j \cdot \frac{1}{(m+1) \cdot i + j + 1} \right] \right];$$

- рассчитать и занести в таблицу 3 значение выигрыша надежности по среднему времени безотказной работы при раздельном резервировании каждого блока РЭС одним резервным блоком;

– сделать вывод об эффективности способа раздельного резервирования при наличии одной резервной цепи, когда каждый блок РЭС резервируется одним резервным блоком.

б) Провести исследование свойств структурно резервированной РЭС при раздельном резервировании несколькими резервными цепями. Для этого выполнить следующие действия:

- последовательно, устанавливая число резервных цепей, равное $m = 2$ и 3 выполнить все операции, приведенные в пункте 4), а); полученные результаты занести в таблицу 3;
- рассчитать и занести в отчет по ЛР необходимое количество резервных цепей $m_{н.р}$ для получения заданной вероятности безотказной работы системы при раздельном резервировании, воспользовавшись формулой

$$m_{н.р} := \frac{\ln \left(1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд.зад}}} \right)}{\ln \left(1 - e^{-\lambda \cdot t} \right)} - 1,$$

где λ – максимальная интенсивность отказов, из числа заданных интенсивностей отказов блоков;

- экспериментально определить необходимое количество резервных цепей $m_{н.р}$ для получения заданной вероятности безотказной работы системы при раздельном резервировании, сравнить полученные результаты;
- ввести формулы для построения зависимостей вероятностей безотказной работы от времени:

$$P_c(t) := \prod_{i=1}^4 e^{-\lambda_i t} \quad \text{и} \quad P_{\text{разд}}(t, m) := \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda_i t} \right)^{m+1} \right]$$

- построить и занести в отчет по ЛР графики зависимостей вероятностей безотказной работы РЭС без резервирования $P_c(t)$ и с раздельным резервированием $P_{\text{разд}}(t, m)$ при количестве цепей резервирования $m = 1, 2, 3$;

– сравнить полученные графики с графиками для общего резервирования, сделать выводы.

5) Сделать вывод об эффективности способа раздельного поблочного резервирования, в том числе по сравнению с общим резервированием, а также о том, как влияет увеличение числа резервных цепей m на параметры надежности РЭС, о целесообразности ввода такого числа резервных цепей.

Задание 3. Провести оптимизацию структурного резервирования РЭС при ограничениях на стоимость (повышенный уровень).

Постановка задачи:

РЭС состоит из трех последовательно соединенных блоков с вероятностями безотказной работы, равной соответственно $0,78 + 0,01 \cdot N$, $0,68 + 0,01 \cdot N$ и $0,76 + 0,01 \cdot N$, где N – номер варианта по журналу. Стоимость каждого блока равна $1+N$ тыс. руб. Требуется резервировать РЭС таким образом, чтобы затраты были минимальными, а вероятность безотказной работы устройства была не ниже $0,9$. Схема устройства представлена на рис. 3.

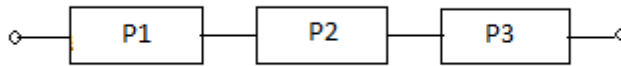


Рис. 3 – Структурная схема РЭС, подвергающегося оптимальному резервированию

Порядок исследования:

1) Открыть новый файл в Mathcad Professional ввести заданные по варианту исходные данные для составления математической модели. Стоимость одного блока ввести в тысячах рублей.

Пример листинга программы:

$$N := 0 \quad \text{номер варианта}$$

$$P1 := 0.78 + 0.01 \cdot N = 0.78$$

$$P2 := 0.68 + 0.01 \cdot N = 0.68$$

$$P3 := 0.76 + 0.01 \cdot N = 0.76$$

$$C_0 := (1 + N) \cdot 3 = 3 \quad \text{тыс. руб.}$$

2) Ввести формулу для определения вероятности безотказной работы РЭС до резервирования:

$$P_0 := P1 \cdot P2 \cdot P3;$$

3) С помощью градиентного метода произвести оптимизацию структурного резервирования РЭС при поблочном раздельном резервировании. Для этого необходимо выполнить несколько шагов оптимизации:

А) На первом шаге оптимизации:

– рассчитать стоимость РЭС при раздельном резервировании одного из блоков:

$$C_1 := C_0 + (1 + N) = 4 \quad \text{тыс. руб.};$$

– рассчитать вероятности безотказной работы РЭС при поочередном резервировании каждого блока на первом шаге:

$$Pc1_1 := [1 - (1 - P1)^2] \cdot P2 \cdot P3; \quad Pc1_2 := P1 \cdot [1 - (1 - P2)^2] \cdot P3;$$

$$Pc1_3 := P1 \cdot P2 \cdot [1 - (1 - P3)^2];$$

– рассчитать градиенты резервирования РЭС для каждого блока (участка резервирования) при поблочном резервировании:

$$\gamma_{11} := \frac{Pc1_1 - P_0}{C_1 - C_0}, \quad \gamma_{12} := \frac{Pc1_2 - P_0}{C_1 - C_0}, \quad \gamma_{13} := \frac{Pc1_3 - P_0}{C_1 - C_0};$$

– определить блок, резервирование, которого дает наибольшее значение градиента, для рассматриваемого примера это 2-й блок;

– зарезервировать этот блок, внести изменение в структурную схему надежности РЭС;

– изменить значения вероятности безотказной работы, зарезервированной РЭС, присвоив ей новое значение, для рассматриваемого примера $P_1 := Pc1_2$;

– сравнить полученное значение с условием оптимизации, если оно удовлетворяет условию (вероятность безотказной работы РЭС $\geq 0,9$), то процесс оптимизации закончить, если нет, то перейти к следующему шагу.

Б) На втором шаге оптимизации:

– рассчитать новую стоимость РЭС при раздельном резервировании одного из следующих блоков на втором шаге:

$$C_2 := C_1 + (1 + N) = 5 \quad \text{тыс. руб.};$$

– рассчитать вероятности безотказной работы РЭС при поочередном резервировании каждого блока на втором шаге:

$$P_{c2_1} := [1 - (1 - P_1)^2] \cdot [1 - (1 - P_2)^2] \cdot P_3, \quad P_{c2_2} := P_1 \cdot [1 - [1 - [1 - (1 - P_2)^2]]^2] \cdot P_3, \\ P_{c2_3} := P_1 \cdot [1 - (1 - P_2)^2] \cdot [1 - (1 - P_3)^2],$$

– рассчитать новые градиенты резервирования РЭС для каждого блока (участка резервирования) при поблочном резервировании:

$$\gamma_{21} := \frac{P_{c2_1} - P_1}{C_2 - C_1}, \quad \gamma_{22} := \frac{P_{c2_2} - P_1}{C_2 - C_1}, \quad \gamma_{23} := \frac{P_{c2_3} - P_1}{C_2 - C_1};$$

– определить блок, резервирование, которого дает наибольшее значение градиента, для рассматриваемого примера на втором шаге это 3-й блок;

– зарезервировать этот блок, внося изменение в структурную схему надежности РЭС;

– изменить значения вероятности безотказной работы, зарезервированной РЭС, присвоив ей новое значение, для рассматриваемого примера $P_2 := P_{c2_3}$;

– сравнить полученное значение с условием оптимизации, если оно удовлетворяет условию (вероятность безотказной работы РЭС $\geq 0,9$), то процесс оптимизации закончить, если нет, то перейти к следующему шагу.

Б) На третьем шаге оптимизации:

– рассчитать новую стоимость РЭС при раздельном резервировании одного из следующих блоков на третьем шаге:

$$C_3 := C_2 + (1 + N) = 6 \text{ тыс. руб.};$$

– рассчитать вероятности безотказной работы РЭС при поочередном резервировании каждого блока на третьем шаге:

$$P_{c3_1} := [1 - (1 - P_1)^2] \cdot [1 - (1 - P_2)^2] \cdot [1 - (1 - P_3)^2], \\ P_{c3_2} := P_1 \cdot [1 - [1 - [1 - (1 - P_2)^2]]^2] \cdot [1 - (1 - P_3)^2], \\ P_{c3_3} := P_1 \cdot [1 - (1 - P_2)^2] \cdot [1 - [1 - [1 - (1 - P_3)^2]]^2];$$

– рассчитать новые градиенты резервирования РЭС для каждого блока (участка резервирования) при поблочном резервировании:

$$\gamma_{31} := \frac{P_{c3_1} - P_2}{C_3 - C_2}, \quad \gamma_{32} := \frac{P_{c3_2} - P_2}{C_3 - C_2}, \quad \gamma_{33} := \frac{P_{c3_3} - P_2}{C_3 - C_2};$$

– определить блок, резервирование, которого дает наибольшее значение градиента, для рассматриваемого примера на третьем шаге это 1-й блок;

– зарезервировать этот блок, внося изменение в структурную схему надежности РЭС;

– изменить значения вероятности безотказной работы, зарезервированной РЭС, присвоив ей новое значение, для рассматриваемого примера $P_3 := P_{c3_1}$;

– сравнить полученное значение с условием оптимизации, если оно удовлетворяет условию (вероятность безотказной работы РЭС $\geq 0,9$), то процесс оптимизации закончить, если нет, то перейти к следующему шагу.

г) Далее выполнить необходимое число (четыре – пять) шагов оптимизации, достигнув требуемого значения вероятности безотказной работы и определив при этом требуемые затраты (стоимость зарезервированной РЭС).

4) Сделать выводы по результатам процедуры оптимизации структурного отдельного резервирования РЭС.

Задание 4. Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

- тему и цель работы, задания для исследований;
- результаты расчетов, представленные в таблица 2 и 3;
- полученные графики вероятности безотказной работы при общем и отдельном резервировании РЭС;
- структурные схемы надежности зарезервированных РЭС;
- листинг программы оптимизации;
- выводы по результатам проделанной работы и выполнения заданий.

2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

**Лабораторная работа разработана
доцентом кафедры инфокоммуникаций,
кандидатом технических наук, доцентом, профессором РАЕ
К.М. Сагдеевым**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
Тема №5: ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ГРАНИЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ
ОЦЕНКИ ЗАПАСА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАДИО-
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Время – 2 учебных часа.

Целевая установка лабораторного занятия:

В ходе лабораторной работы студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- осуществлять обеспечение надежности на этапах эксплуатации радиоэлектронных средств (ПК-6);
- выполнять граничные испытания для оценки запаса параметрической надежности в рамках планового технического обслуживания на действующем оборудовании систем связи (ПК-6);
- применять полученные показатели параметрической надежности для обоснования необходимости проведения профилактических работ технического обслуживания с целью обеспечения соответствия технических параметров РЭС установленным эксплуатационно-техническим нормам (ПК-7).

Учебно-материальное обеспечение:

- 1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:
 - Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
 - программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12, для симуляции испытуемого РЭС.
 - Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.
- 2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Для того чтобы уяснения понятия параметрической надёжности необходимо рассмотрим соответствующие действующим стандартам определения вероятности безотказной работы, внезапного и постепенного отказов и полной вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Наработка – это продолжительность или объём работы объекта. Нарботка может быть, как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Работоспособное состояние (работоспособность) – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Внезапный отказ – это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапные отказы являются результатом скрытых недостатков технологии производства или скрытых изменений параметров, накопи-

вающихся во время эксплуатации. Они могут происходить и из-за неправильных действий обслуживающего персонала.

Постепенный отказ – это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Постепенные отказы характеризуют зависимостью сравнительно медленного изменения этих параметров, в результате старения или изнашивания элементов. Такие изменения часто можно зарегистрировать с помощью измерительных приборов.

Обратимый постепенный отказ – это отказ, возникающий в результате возрастания по величине дестабилизирующего фактора и исчезающий при уменьшении по величине этого фактора. Дестабилизирующими факторами могут быть температура, влажность, радиация и т.д.

Полная вероятность безотказной работы $P_{\Pi}(\tau)$ (по внезапным и постепенным отказам) в момент времени τ определяется по формуле:

$$P_{\Pi}(\tau) = P_{\tau} \prod_{i=1}^N P_{\text{пост } i}(\tau) \quad (1)$$

где $P_{\Pi}(\tau)$ – вероятность безотказной работы системы по внезапным отказам; N – число учитываемых выходных параметров системы, изменение которых во времени может привести к её отказу; $P_{\text{пост } i}(\tau)$ – вероятность безотказной работы системы по постепенным отказам, связанным с выходом i -го выходного параметра за пределы допустимых значений и возникающим из-за деградиационных процессов старения и износа и из-за воздействия дестабилизирующих факторов.

Так как выход параметра изделия за границы поля допуска считается параметрическим отказом, то вероятность $P_{\text{пост } i}(\tau)$ называют **параметрической надёжностью**.

Метод граничных испытаний состоит в нахождении области таких значений параметров РЭС, при которых значения выходных (вторичных или эксплуатационных) параметров находятся в пределах допуска, т.е. области безотказной работы РЭС. Каждый выходной параметр Y_i (а их может быть счетное множество y) зависит от множества входных параметров $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$, т.е. для каждого выходного параметра можно записать:

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n), \quad (2)$$

где $Y_i \in y$; $i = 1, \dots, k$; $j = 1, \dots, n$.

Для безотказной работы РЭС должно выполняться условие:

$$y_{\min} \leq Y_i \leq y_{\max}, \quad (3)$$

что соответствует изменению значения каждого входного параметра в пределах $x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max}$.

Область безотказной работы РЭС определяется путем изменения значений входных параметров и фиксации предельных значений выходных параметров, превышение которых приводит к отказам РЭС.

Граничные испытания выполняют в процессе проектирования и в процессе эксплуатации аналитическим, графическим или графоаналитическим способами.

Аналитический способ применяют для испытания изделий, имеющих простую математическую модель, характеризующуюся, как правило, функциональной зависимостью одного выходного и одного входного параметра. **Границы области безотказной работы определяют** расчетным путем с помощью уравнения (2), которое упрощают: $Y_i = f(X_j)$.

Графический способ используют для сложных изделий, когда выходной параметр зависит от нескольких входных. **Границы области безотказной работы определяют** экспериментально путем построения сечения функции (2) для каждого входного параметра X , т.е. находят допустимые пределы изменения значений этих параметров в зависимости от значения выбранного параметра граничных испытаний.

Построение сечения функции выполняют следующим образом. Выбирают один или несколько критериев отказа. Один из параметров РЭС принимают за так называемый параметр граничных испытаний ХГР. Устанавливают номинальные значения входного параметра X_j , по

которому производится сечение функции (2), и параметра ХТР. Значения остальных входных параметров сохраняют номинальными. Изменяют значение параметра ХТР в меньшую и большую сторону от номинального значения до момента отказа РЭС – ухода значения выходного параметра Y_i за границы поля допуска, определяемые неравенством (3). Аналогичные испытания осуществляют для других значений X_j , отличных от номинального значения. В результате получают несколько точек, соответствующих предельным значениям выходного параметра Y_i . Соединив эти точки, устанавливают область безотказной работы РЭС. Пример построения области безотказной работы (графика граничных испытаний) РЭС приведен на рисунке 1, а.



Рис. 1 – Построение области безотказной работы РЭС при изменении значений одного (а) и двух (б) входных параметров

В качестве параметра граничных испытаний выбрано напряжение питания $U_{ГР}$, а в качестве изменяемого входного параметра – сопротивление R_K в коллекторной цепи RC -усилителя. Точки 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', соответствующие предельным значениям выходного параметра, получены при изменении напряжения $U_{ГР}$ в меньшую (1, 2, 3) и в большую (1', 2', 3') сторону от номинального значения при определенных значениях сопротивления R_K . Кривая линия, соединяющая достаточное число подобных точек, является границей, разделяющей область безотказной работы и область отказов РЭС. Аналогично проводят построение сечения функции (2) по входному параметру X_i (например, разделительной ёмкости C RC -усилителя). Изменяя значение параметра граничных испытаний, получают другую область безотказной работы, соответствующую различным значениям X_i . Для всех входных параметров строят ряд графиков, наложив которые друг на друга, можно получить область безотказной работы. Изменение входных параметров производят в пределах, значительно превышающих заданные техническими условиями (ТУ), с целью определения потенциального запаса надежности РЭС. На рисунке 1, б в качестве примера показано построение области безотказной работы для двух входных параметров (R_K и C).

Графики граничных испытаний позволяют: прогнозировать отказы РЭС; определять правильность выбора номинальных значений параметров элементов того или иного изделия, питающих напряжений; сравнивать «запас» надёжности РЭС – по площади областей безотказной работы и положению рабочей точки. Чем больше площадь области безотказной работы и чем дальше отстоит от её границ рабочая точка, тем больше запас надежности. К недостаткам метода граничных испытаний относятся невозможность количественной оценки надежности и большая трудоемкость проведения экспериментов, что не позволяет получать данные об изменении выходных параметров РЭС при изменении комплекса внешних воздействий и взаимодействии элементов.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к лабораторному занятию:

- 1) Вероятность безотказной работы.
- 2) Отказы: классификация и определения.

- 3) Виды отказов, которые учитываются при расчёте полной вероятности безотказной работы.
- 4) Полная вероятность безотказной работы, определение и формула для расчета.
- 5) Параметрическая надёжность, определение и сущность.
- 6) Суть метода граничных испытаний.
- 7) Аналитический способ граничных испытаний.
- 8) Графоаналитический способ граничных испытаний.
- 9) Порядок построения сечения испытываемой функции для определения границы области безотказной работы изделия.
- 10) Область применения результатов граничных испытаний.

Содержание лабораторной работы в ходе занятия

Описание рабочего оборудования:

Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
- программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12, для симуляции испытываемого РЭС;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

Требования безопасности при выполнении работы:

- К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.
- При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.
- Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).
- При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.
- При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.
- По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание для работы по первому учебному вопросу:

Базового уровня:

- 1) Смоделировать в программе EWB электрическую принципиальную схему стабилизатора напряжения.
- 2) Провести граничные испытания модели стабилизатора напряжения для оценки запаса параметрической надежности.

Повышенного уровня:

- 3) Провести статистический анализ граничных испытаний модели стабилизатора напряжения по методу Монте-Карло.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Смоделировать в программе EWB электрическую принципиальную схему стабилизатора напряжения.

Постановка задачи: Смоделировать и отладить в программе EWB устройство, подвергающееся граничным испытаниям. В качестве исследуемого устройства использовать стабилизатор напряжения (см. рис. 2), имеющий значение выходного напряжения, равное 18 В (в пределах заданной погрешности). В качестве нагрузки стабилизатора использовать сопротивление R11, включенное между коллектором транзистора VT2 и общей шиной.

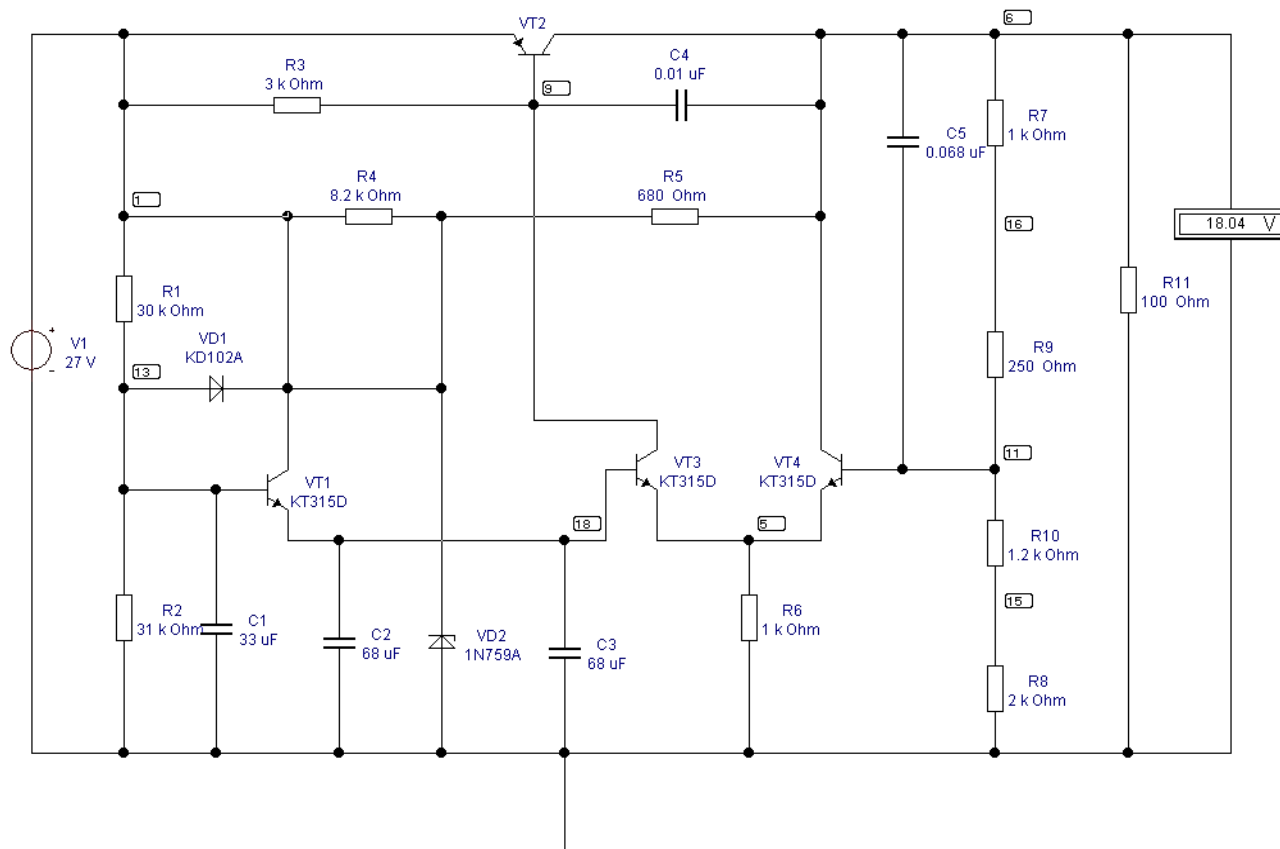


Рис. 2 – Схема стабилизатора напряжения 18 В

Для выполнения задания 1 необходимо:

- 1) Запустить программу моделирования электрических схем EWB и открыть выданный преподавателем файл: Стабилизатор_18_V.ewb.
- 2) Установить сопротивление нагрузки $R11=100$ Ом; источник постоянного напряжения $V1 = 27$ В; диод $VD1$ – КД102А; стабилитрон $VD2$ – 1N759А; транзисторы $VT1$, $VT3$ и $VT4$ – КТ315Д; для транзистора $VT2$ – выбрать идеальную модель.
- 3) Включить симулятор EWB, проверить, а при необходимости отладить до работоспособного состояния собранную электрическую принципиальную схему стабилизатора напряжения. Пример правильной работы схемы стабилизатора с заданным выходным напряжением приведен на рис. 2.
- 4) Сделать выводы по результатам моделирования и отладки.

Задание 2. Провести граничные испытания модели стабилизатора напряжения для оценки запаса параметрической надежности.

Постановка задачи: В качестве параметров граничных испытаний выступают:

- напряжение питания стабилизатора $U_{ст}$, которое по техническим условиям может изменяться в пределах $U_{ст.min} \dots U_{ст.max}$ В;
- температура окружающей среды, изменяющая в пределах -60°C до $+60^\circ\text{C}$ (исходная температура – $+27^\circ\text{C}$);
- погрешность величины указанного по варианту сопротивления ($R1$ или $R2$) делителя напряжения, подающего напряжение смещения на базу транзистора $VT1$.

В этих условиях стабилизатор должен обеспечивать выходное напряжение 18 В с учетом допустимой относительной погрешностью, заданной по варианту.

Необходимо провести граничные испытания модели стабилизатора напряжения в программе EWB для определения предельно допустимых значений заданного по варианту сопротивления, при которых обеспечивается заданный режим эксплуатации стабилизатора; определить его запас параметрической надежности.

Варианты индивидуальных исходных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для выполнения задания 2 и 3

Вариант	Относительная погрешность напряжения, Δ%	Испытуемое сопротивление, кОм
0	11	R2
1	10	R1
2	8	R1
3	7,5	R1
4	6	R1
5	5	R1
6	4,5	R1
7	3,5	R1
8	3	R1
9	2,5	R1
10	2	R1
11	10	R2
12	8	R2
13	7,5	R2
14	6	R2
15	5	R2
16	4,5	R2
17	3,5	R2
18	3	R2
19	2,5	R2
20	2	R2

Порядок исследований в задании 2:

1) Установить заданное напряжение питания стабилизатора $V1=27$ В, запустить симулятор EWB и измерить идеальное выходное напряжение стабилизатора $U_{ст}$, округлив его до целого числа, результат занести в отчет по ЛР (в таблицу результатов 2).

2) Определить допустимое по условиям эксплуатации абсолютное значение погрешности напряжения стабилизатора, воспользовавшись формулой:

$$U_{доп} = \frac{U_{ст} \cdot \Delta\%}{100\%}.$$

Рассчитать и занести в таблицу 2 предельно допустимые выходные напряжения стабилизатора:

$$U_{ст.min} = U_{ст} - U_{доп} \text{ и } U_{ст.max} = U_{ст} + U_{доп}.$$

Для нулевого варианта абсолютная погрешность составляет ± 2 В, т.е. в этом случае выходное напряжение стабилизатора может допустимо находиться в пределах 16...20 В.

Таблица 2 – Полученные в задании 2 результаты испытаний для варианта 0.

$U_{пит}, В$	$U_{ст}, В$	$R2_{min}, кОм$	$R2_{max}, кОм$	A_R	A_U
$U_{пит.min}=24$	16	31	50	9,5	18
27	18	25	38		
$U_{пит.max}=30$	20	18	31		

3) Определить предельно допустимые значения напряжения питания $U_{пит}$ стабилизатора, обеспечивающие его выходное напряжение в заданных пределах $U_{ст} \pm U_{доп}$. Для этого выполнить следующие действия:

— постепенно уменьшая напряжение питания $U_{пит}$, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное $U_{ст.min} = U_{ст} - U_{доп}$, зафиксировать это напряжение питания и занести его в таблицу 2;

— вернуть напряжение питания в исходное значение 27 В, после чего постепенно увеличивая напряжение питания $U_{\text{пит}}$, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное $U_{\text{ст.мах}} = U_{\text{ст}} + U_{\text{доп}}$, зафиксировать это напряжение питания и занести его в таблицу 2;

Для рассматриваемого варианта 0, предельно допустимые напряжения питания равны 24 и 30 В.

4) Определить границы безотказной работы стабилизатора при изменении параметров заданного сопротивления для допустимых значений напряжения питания. Для этого провести следующие граничные испытания:

а) для номинального напряжения питания выполнить следующие действия (операции):

— установить напряжение питания, равное 27 В;

— постепенно изменяя величину заданного сопротивления, в сторону увеличения, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное одному из предельно допустимых значений, зафиксировать величину этого сопротивления и занести его в таблицу 2;

— вернуть значение заданного сопротивления к исходной величине, после чего постепенно уменьшая его значение, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное другому предельно допустимому значению, зафиксировать величину этого сопротивления и занести его в таблицу 2;

б) для минимально допустимого напряжения питания выполнить следующие действия (операции):

— установить напряжение питания, равное $U_{\text{пит.мин}}$ В;

— вернуть исходное значение заданного сопротивления и получить минимально допустимое напряжение на выходе стабилизатора $U_{\text{ст.мин}}$, зафиксировать это значение сопротивления и занести его в таблицу 2;

— постепенно увеличивая значение сопротивления, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное максимальному допустимому значению $U_{\text{ст.мах}}$, зафиксировать это значение сопротивления и занести его в таблицу 2;

в) для максимально допустимого напряжения питания выполнить следующие действия (операции):

— установить напряжение питания, равное $U_{\text{пит.мах}}$ В;

— вернуть исходное значение заданного сопротивления и получить максимально допустимое напряжение на выходе стабилизатора $U_{\text{ст.мах}}$, зафиксировать это значение сопротивления и занести его в таблицу 2;

— постепенно уменьшая значение сопротивления, добиться того, чтобы на выходе стабилизатора имело место напряжение, равное минимальному допустимому значению $U_{\text{ст.мин}}$, зафиксировать это значение сопротивления и занести его в таблицу 2;

г) определить и занести в табл.2 коэффициент влияния A_R изменения сопротивления заданного резистора на изменение выходного напряжения (при $U_{\text{пит}}=27$ В):

$$A_R = \frac{U_{\text{ст.мах}} - U_{\text{ст.мин}}}{R_{\text{мах}} - R_{\text{мин}}/R} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta R/R},$$

д) определить и занести в табл.2 коэффициент влияния A_U изменения напряжения питания на изменение выходного напряжения (при номинальном значении сопротивления):

$$A_U = \frac{U_{\text{ст.мах}} - U_{\text{ст.мин}}}{U_{\text{пит.мах}} - U_{\text{пит.мин}}/U_{\text{пит}}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta U_{\text{пит}}/U_{\text{пит}}},$$

е) построить область безотказной работы стабилизатора при изменении параметров заданного резистора и напряжения питания, воспользовавшись результатами граничных испытаний, записанными в таблице 2. Пример области безотказной работы для варианта 0 представлен на рис.3.

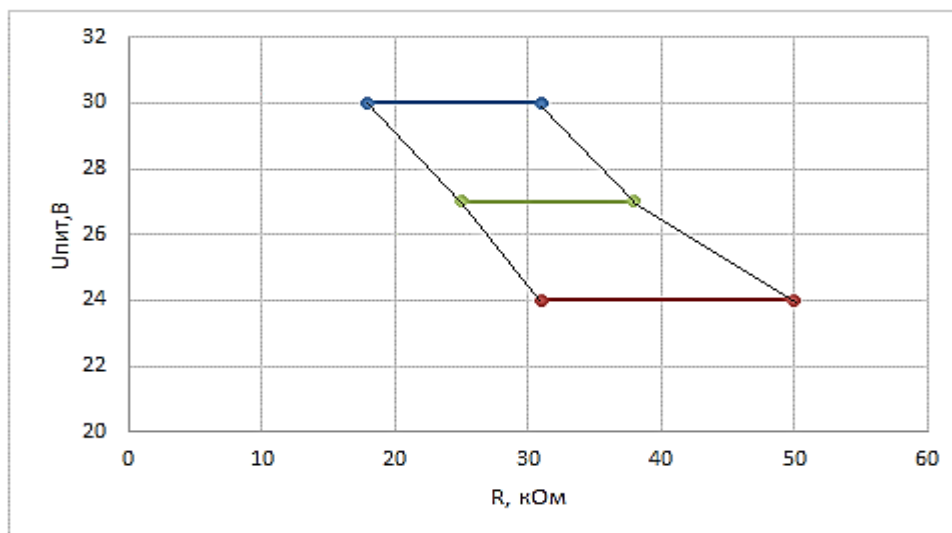


Рис. 3 – График, отображающий область безотказной работы стабилизатора, по результатам граничных испытаний при изменении параметров заданного резистора и напряжения питания

4) Определить границы безотказной работы стабилизатора при изменении параметров заданного сопротивления для допустимых значений температуры окружающей среды, при условии, что температурный коэффициент сопротивления резистора равен $TCR = 500 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Для этого провести следующие граничные исследования:

— рассчитать величины изменения температуры относительно исходной комнатной температуры:

$$\Delta T_{max} = T_{max} - T_o = 60 - 27 = 33 \text{ } ^{\circ}\text{C} \text{ и } T_{min} = T_{min} - T_o = -60 - 27 = 87 \text{ } ^{\circ}\text{C} ;$$

— рассчитать допустимые величины сопротивлений испытуемого резистора при максимально допустимой температуре окружающей среды:

$$R_{min} = R_{ном. min} \cdot (1 - TCR \cdot \Delta T_{max}) \text{ и } R_{max} = R_{ном. max} \cdot (1 - TCR \cdot \Delta T_{max}) ,$$

где $R_{ном. min}$ и $R_{ном. max}$ – соответственно минимально и максимально допустимые значения сопротивлений испытуемого резистора при комнатной температуре (для приведенного примера соответственно 25 и 38 кОм).

— рассчитать допустимые величины сопротивлений испытуемого резистора при минимально допустимой температуре окружающей среды:

$$R_{min} = R_{ном. min} \cdot (1 - TCR \cdot \Delta T_{min}) \text{ и } R_{max} = R_{ном. max} \cdot (1 - TCR \cdot \Delta T_{min}) ,$$

— полученные результаты занести в таблицу 3;

— построить область безотказной работы стабилизатора при изменении параметров заданного резистора и температуры окружающей среды при постоянном напряжении питания, воспользовавшись результатами граничных испытаний, записанными в таблице 3;

— определить и занести в табл.3 коэффициент влияния A_T изменения температуры окружающей среды на изменение сопротивления заданного резистора (при номинальном значении напряжения питания):

$$A_T = \frac{\Delta R}{\Delta T / T_o}.$$

Таблица 3 – Полученные в задании 2 результаты испытаний для варианта 0.

T, $^{\circ}\text{C}$	R2 _{min} , кОм	R2 _{max} , кОм	A _T
T _{max} =+60	24,6	37,3	315 – 517,5
T _o =27	25	38	
T _{min} =-60	26	39,6	

5) Сделать выводы по результатам проведенных испытаний. Оценить правильность выбора величины сопротивления испытуемого резистора и запаса его параметрической

надежности.

Задание 3. Провести статистический анализ граничных испытаний модели стабилизатора напряжения по методу Монте-Карло (повышенный уровень).

Постановка задачи:

Провести статистический анализ стабильности выходного напряжения стабилизатора с учетом допустимого отклонения погрешности параметров электрорадиоэлементов. Для этого воспользоваться анализатором Монте-Карло, встроенным в программу EWB.

Порядок выполнения работы:

- 1) Установить в схеме стабилизатора напряжения все исходные параметры.
- 2) Показать на схеме измерительные узлы, последовательно нажав меню «Circuit», вызвав диалоговое окно «Schematic Options» и установив функцию «Show nodes».
- 3) Определить номер узла подключенного к сопротивлению нагрузки, с которого снимается выходное стабилизированное напряжение.
- 4) Запустить встроенный в меню «Analysis» анализатор Монте-Карло, после чего настроить его для проведения испытаний (пример приведен на рис. 3). Для этого в открывшемся диалоговом окне анализатора установить следующие опции:

Output node – необходимый узел схемы (в примере – 6);

Number of runs — количество статистических испытаний (в примере 100, как правило этого количества испытаний достаточно);

Tolerance — 5% - отклонения параметров электрорадиоэлементов, входящих в испытуемое устройство, а также источников переменного и постоянного тока и напряжения;

Seed — 1 – начальное значение случайной величины (этот параметр определяет начальное значение датчика случайных чисел и может задаваться в пределах 0...32767);

Distribution type — закон распределения случайных чисел: Uniform — равновероятное распределение на отрезке (-1, 1) и Gaussian — гауссовское распределение на отрезке (-1, 1) с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением 0,25; установить – Gaussian.

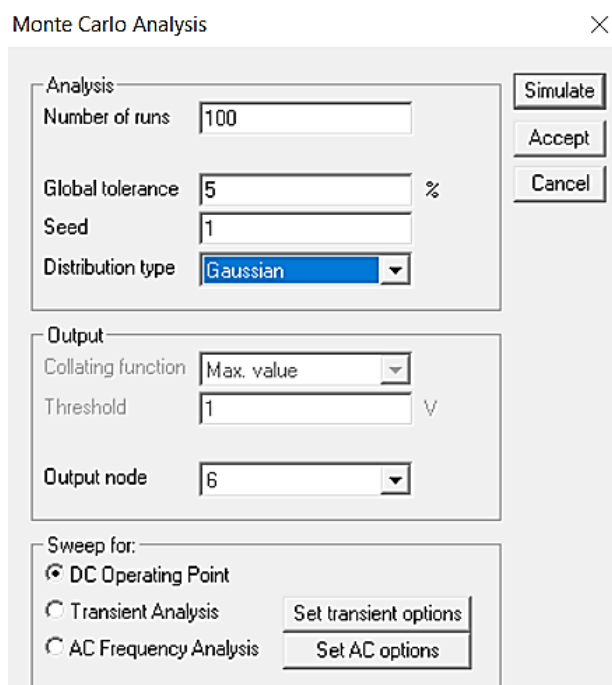


Рис. 3 – Пример настройки анализатора Монте-Карло

- 5) Запустить симулятор анализатора Монте-Карло, определить в открывшемся графике анализатора параметры статистического анализа: диапазон выходного напряжения (т.е. его

максимальное и минимальное значение), среднее значение напряжения и его среднеквадратическое отклонение (см. рис. 4). Отобразить полученный график и рассчитанные статистические параметры в отчете по лабораторной работе.

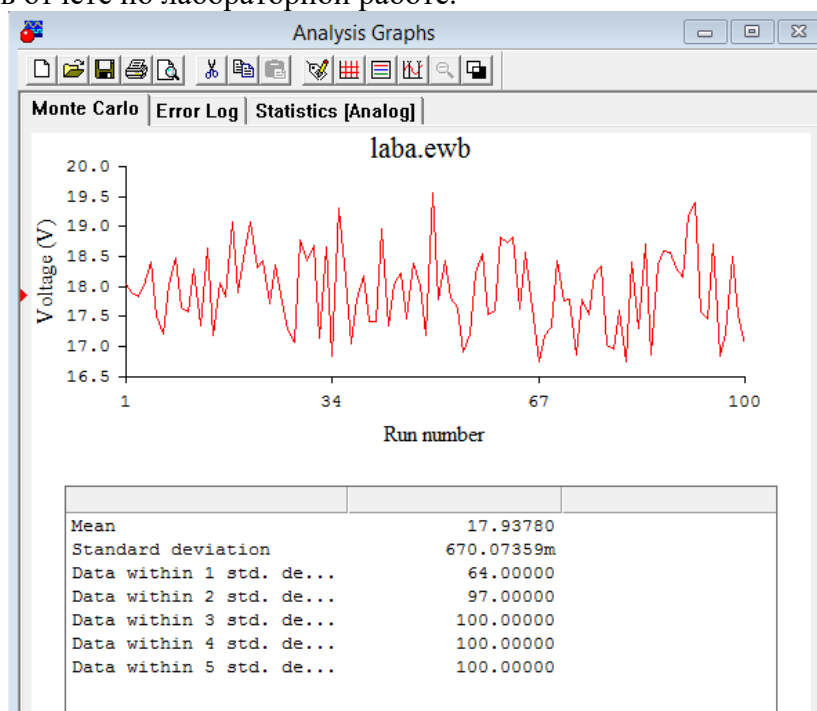


Рис. 4 – Пример статистического анализа по методу Монте-Карло

6) Провести исследование влияния отклонения параметров электрорадиоэлементов стабилизатора от номинальных значений на границы диапазона безотказной работы испытуемого резистора. Для этого выполнить следующие действия (операции):

— добавить в схему стабилизатора дополнительный источник постоянного напряжения V2, подключив его как показано на рис. 5;

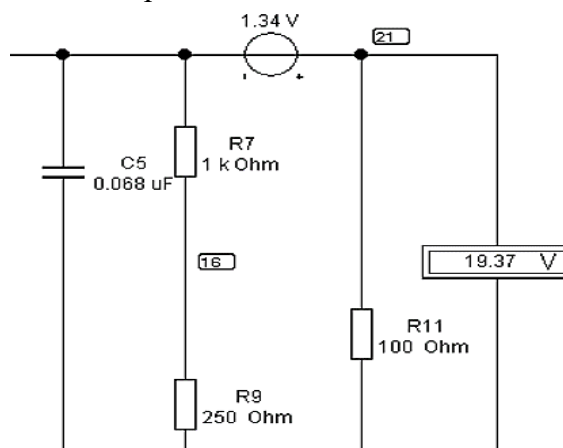


Рис. 5 – Фрагмент схемы стабилизатора напряжения, на котором показано место подключения дополнительного источника напряжения

— установить в дополнительном источнике напряжение, равное среднеквадратическому отклонению в 2σ (σ – standart deviation), в рассматриваемом примере это 1.34 В;

— запустить симулятор EWB, убедиться, что выходное напряжение стабилизатора увеличилось;

— изменять значение сопротивления заданного резистивного элемента до тех пор, пока выходное напряжение стабилизатора не будет находиться на границе допустимого значения, зафиксировать значение этого резистора и занести в отчет по ЛР;

— поменять знак в дополнительном источнике напряжения на противоположенный,

т.е. установить -1.34 В; запустить симулятор EWB, убедиться, что выходное напряжение стабилизатора уменьшилось;

— изменять значение сопротивления заданного резистивного элемента в другую сторону до тех пор, пока выходное напряжение стабилизатора не будет находиться на другой границе допустимого значения, зафиксировать значение этого резистора и занести в отчет по ЛР;

— построить графики, отображающие области безотказной работы стабилизатора, для напряжения питания 27 В с учетом и без учета отклонений параметров резистора;

— сравнить полученные графики областей, для рассматриваемого примера они приведены на рис. 6.

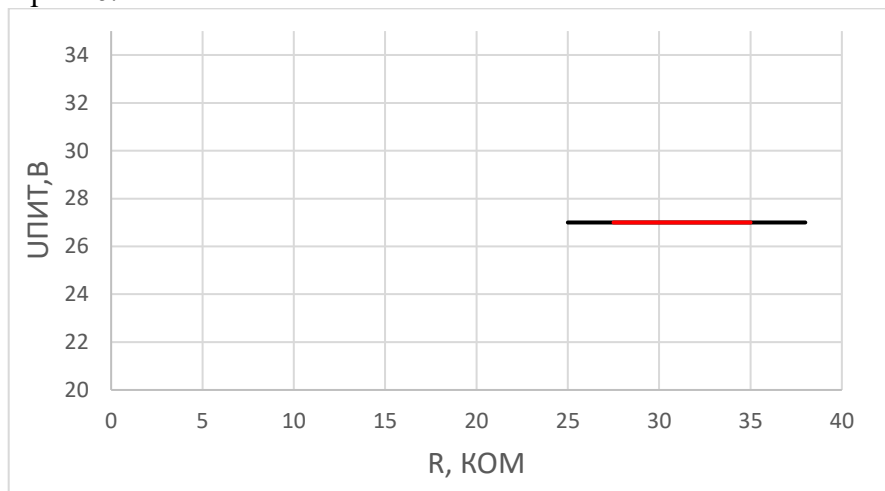


Рис. 6 – Графики, отображающие области безотказной работы стабилизатора, с учетом и без учета отклонений параметров резистора (для напряжения питания 27 В)

7) Сделать вывод о результатах статистических испытаний стабилизатора напряжений, а также о том, как влияет отклонение величины сопротивления резистора на выходное напряжение стабилизатора, и как это влияет на граничную область допустимых значений.

Задание 4. (для самостоятельной работы) Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

- тему и цели работы, задания для исследований и краткий порядок их выполнения;
- схему электрическую принципиальную стабилизатора напряжения, смоделированную в редакторе схематического моделирования EWB;
- таблицы с результатами граничных испытаний и полученными параметрами;
- результаты статистических испытаний по методу Монте-Карло;
- рисунки с областями безотказной работы при заданных условиях;
- выводы по результатам выполнения заданий и в целом по проделанной работе.

2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

**Лабораторное занятие разработано
доцентом кафедры инфокоммуникаций,
кандидатом технических наук, доцентом, профессором РАЕ
К.М. Сагдеевым**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Тема №6: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Время– 4 учебных часа.

Целевая установка практического занятия:

В ходе лабораторной работы студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- оценивать техническое состояние радиоэлектронных средств и оборудования (ПК-5);
- осуществлять в процессе эксплуатации техническую диагностику РЭС путем применения различных методов оценки их состояния (ПК-6);
- выполнять с помощью алгоритмов, предусмотренных в технической документации, испытания оборудования связи для оценки его технического состояния (ПК-7).

Учебно-материальное обеспечение:

- 1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:
 - Microsoft Word для оформления отчетов по лабораторной работе;
 - Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.
- 2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Метод оценки состояния РЭС на основе информационной модели и метода половинных разбиений

В технической диагностике в качестве основных используются понятия «Состояние» и «Признак». Состояния объекта делятся на работоспособные и неработоспособные. В первом случае объект соответствует всем техническим требованиям, во втором – не соответствует хотя бы одному.

Признак – это обобщенное понятие параметра, связанного с какой-то характеризующей объект физической величиной. В отличие от физической величины, с помощью признака фиксируется лишь факт нахождения параметра в заданных пределах. Поэтому признак в формальном виде можно представить в следующих вариантах: «в норме – не в норме», «годен – не годен», «1 – 0». Диагностическая информационная модель объекта представляет собой таблицу признаков (y_i) и состояний (C_i) отдельных частей (блоков, элементов).

Рассмотрим вопрос о выборе контролируемых параметров с целью оценки состояния всего объекта. На практике широко используется метод половинных разбиений. Поясним суть метода на примере устройства, имеющего последовательную структуру и состоящего из восьми блоков (см. рис. 1).

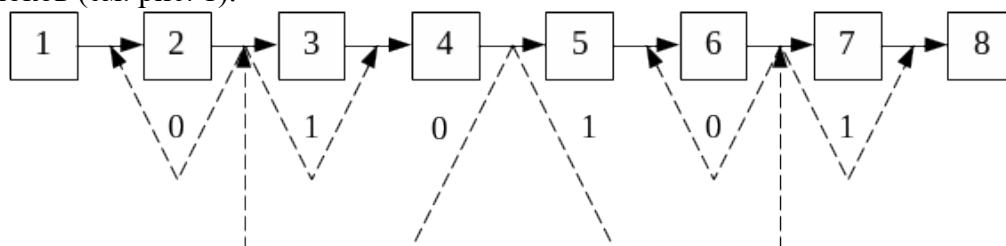


Рис. 1 – Метод половинных разбиений

Сначала контролируется средняя точка схемы (между блоками 4 и 5). По результатам контроля осуществляется переход к проверке либо правой, либо левой части схемы, которые также контролируются в своих средних точках и т.д., пока не будет выявлен неисправный блок. Отметим, что неисправный блок по этому методу может быть определен всего тремя измерениями.

В сложной схеме ее деление пополам осуществляется на основе анализа таблицы признаков и состояний.

Оценка состояния РЭС на основе метода математической логики

Математическая логика - это логика, развиваемая с помощью математических методов.

Математическая логика, возникшая почти 100 лет назад в связи с внутренними потребностями математики, нашла применение в теоретическом и практическом программировании и, судя по всему, взаимодействие этих двух наук в недалеком будущем сможет принести новые плоды.

В недрах математической логики были найдены математически точные понятия алгоритма и вычислимой функции, развита семантика формальных языков и теорий, построены системы логического вывода - и все это было сделано в 30-40-х годах, в т.е. «докомпьютерную эру». Сейчас же данный метод позволяет найти *все возможные* минимальные наборы признаков в радиоэлектронных средствах.

Оценка состояния РЭС на основе комбинированного метода

В основе метода лежит выбор проверяемых элементов схемы с учетом вероятностей их отказов и наибольшей информативности шагов проверки. Метод реализуется с помощью таблицы признаков и состояний, дополненной строкой вероятностей отказов элементов (q_j) и столбцом значений функции предпочтения (W_i). При этом расчет значений W_i осуществляется по формуле

$$W_i = \left| \sum_{1j} q_j - \sum_{0j} q_j \right|. \quad (1)$$

Здесь суммируются q_j в i -той строке отдельно для всех значений i -го признака равных «1» и отдельно для всех значений этого признака равных «0». Полученные суммы вычитаются. Предпочтение отдается проверке признака, расположенного в той строке таблицы, где W_i имеет наименьшее значение. По результатам проверки признака все элементы можно разделить на две группы, и для каждой группы из исходной таблицы образовать две новые. Все действия повторяются до тех пор, пока не произойдет разделение таблиц на отдельные элементы схемы.

Порядок построения дерева поиска неисправности РЭС

Программу поиска неисправности можно изобразить в виде «карты» или «дерева». При этом приняты следующие обозначения. Круг обозначает событие проверки выбранного элемента, а квадратик – состояние РЭС. Переход по левым ветвям осуществляется при обнаружении неисправности в ходе проверки выбранного элемента, а по правым – при отсутствии данных о неисправности.

Метод оценки состояния РЭС на основе метода D-алгоритма

Алгоритм D — алгоритм поиска кратчайшего пути во взвешенном ориентированном графе, где структура графа неизвестна заранее или постоянно подвергается изменению.

D-Алгоритм сформулирован на языке кубических комплексов, координатой кубического комплекса является одно из значений алгоритма. Алгоритм начинается с места проверяемой неисправности и далее двигается от места неисправности к выходам схемы, при этом на каждом цикле вычислений отбрасываются несущественные пути. Эта процедура называется прямой фазой продвижения алгоритма.

Далее алгоритм двигается в обратную сторону – от выходов ко входу, при этом учитываются решения, полученные на прямой фазе продвижения алгоритма.

Основным рабочим инструментом в D-алгоритме является техника кубов. Модели логических элементов представляются также с помощью кубов.

Выявление неисправности методом D-алгоритма заключается в следующем:

1) На место предполагаемой неисправности подается напряжение, которое «активизировало» бы неисправность, т.е. напряжение с противоположным неисправности логическим значением.

2) Составляется так называемая D-цепь, т.е. цепь прохождения логического сигнала через элементы схемы от места неисправности до одного из контролируемых выходов.

3) Определяется уровень напряжения на контролируемом выходе и решается вопрос о наличии предполагаемой неисправности.

Логическое значение напряжения в диагностируемом месте обозначают символом D, если в исправном состоянии оно равно «1», а в неисправном «0». Если же в исправном состоянии значение равно «0», а в неисправном «1», то напряжение обозначают как $\bar{D}$.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к практическому занятию:

1) Суть метода оценки состояния РЭС на основе информационной модели и метода половинных разбиений.

2) Суть метода математической логики для оценки состояния РЭС.

3) Суть комбинированного метода оценки состояния РЭС.

4) Расчет значения функции предпочтения.

5) Построение дерева поиска неисправности.

6) Суть метода оценки состояния РЭС на основе D-алгоритма.

7) Порядок выявления неисправности методом D-алгоритма.

Содержание лабораторной работы в ходе занятия

Описание рабочего оборудования:

Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
- Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.

Требования безопасности при выполнении работы:

— К проведению практического занятия допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

— Включение компьютеров осуществляется только с разрешения преподавателя.

— При проведении практического занятия не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

— Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов рабочего оборудования (компьютеров).

— При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование (компьютер) от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

— При возгорании оборудования (компьютера) его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

— По окончании работы с оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задания для работы по первому учебному вопросу:

Базового уровня:

1) Методом половинных разбиений произвести оценку состояния заданного устройства.

2) Методом математической логики произвести оценку состояния заданного устройства.

3) Построить программу поиска неисправности комбинированным методом для заданного устройства при условии, что вероятности отказов элементов равны $q_1 = 0.05$, $q_2 = 0.10$, $q_3 = 0.15$, $q_4 = q_5 = 0.25$, $q_6 = 0.20$.

Повышенного уровня:

4) Построить древовидный алгоритм поиска неисправности комбинированным методом для заданного устройства.

5) Методом D-алгоритма определить тестовые воздействия и выявить неисправность типа неуправляемый логический «0» в заданной точке схемы.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Методом половинных разбиений произвести оценку состояния заданного по варианту устройства.

Исходные данные для выполнения индивидуальных заданий по заданным вариантам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для решения задания 1

Вариант	Блок-схема
1	<pre> graph TD 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
2	<pre> graph TD 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
3	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 5 5 --> 6 2 --> 6 5 --> 4 6 --> 3 </pre>
4	<pre> graph TD 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
5	<pre> graph TD 1 --> 4 2 --> 5 3 --> 6 2 --> 3 4 --> 5 5 --> 6 </pre>

Вариант	Блок-схема
6	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 4 2 --> 5 3 --> 6 4 --> 5 5 --> 6 </pre>
7	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 4 2 --> 5 3 --> 6 4 --> 5 5 --> 6 </pre>
8	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 4 2 --> 5 3 --> 6 4 --> 5 5 --> 6 6 --> 3 </pre>
9	<pre> graph TD 1 --> 4 2 --> 3 2 --> 5 3 --> 6 4 --> 5 5 --> 6 </pre>
10	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 4 2 --> 3 2 --> 5 3 --> 6 4 --> 5 5 --> 6 </pre>

Постановка задачи: задана функционально-диагностическая схема РЭС (например, см. рис. 2), состоящая из 8 блоков, состояние которых C_i характеризуется информационными признаками y_i , несущими информацию об исправности или неисправности блоков. Причем один информационный признак может содержать информацию об неисправности нескольких блоков, так информационный признак y_2 несет информацию об неисправности блоков C_2 и C_1 .

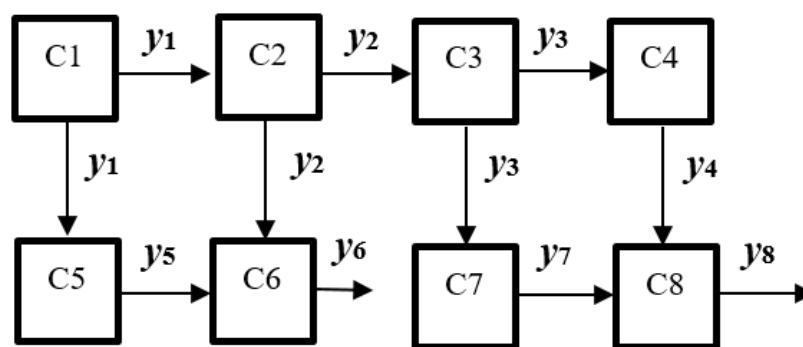


Рис. 2 – Функционально-диагностическая схема РЭС

Пример решения.

В начале необходимо построить информационную модель устройства, представляющую собой таблицу признаков и состояний (см. табл. 2).

Таблица 2 – Таблица признаков и состояний

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	I
y_1	0	1	1	1	1	1	1	1	7
y_2	0	0	1	1	1	1	1	1	12
y_3	0	0	0	1	1	1	1	1	15
y_4	0	0	0	0	1	1	1	1	16
y_5	0	1	1	1	0	1	1	1	12
y_6	0	0	1	1	0	0	1	1	16
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1	16
y_8	0	0	0	0	1	1	0	0	12

Состояние блоков C_i в таблицу 2 заносится следующим образом. Если блок C_i оказывается в неисправном состоянии, то в его колонку записываются значения «0» в ячейки, соответствующие признакам, несущим информацию об его неисправности. Это означает, что неисправный блок дает значение «0» вдоль всей цепочки связанных с ним блоков. Например, согласно схеме, приведенной на рис.2, неисправное состояние блока C_1 (первая колонка таблицы) приводит к неисправному состоянию всего устройства, следовательно, значение «0» записывается во все ячейки для всех признаков.

В противном случае, когда неисправность блока C_i не влияет на какие-то другие блоки, в ячейки этого столбца C_i , соответствующие признакам независимых блоков, записываются значения «1». Например, неисправное состояние блока C_7 не влияет на состояние блоков $C_1 - C_6$, поэтому в ячейки, соответствующие признакам $y_1 - y_6$, записываются значения 1».

В результате признак y_4 несет информацию о том, что неисправность произошла в одном из блоков $C_1 - C_4$, и не имеет сведений о состоянии блоков $C_5 - C_8$.

В последней колонке таблицы приводится количество информации (I) для каждого признака. Расчет количества информации производится по формуле:

$$I = m \cdot (N - m), \quad (2)$$

где m – количество нулей в строке, т.е. возможных неисправных блоков, N – количество столбцов, т.е. блоков, а $N - m$ – количество единиц, т.е. возможно исправных блоков.

Чем больше количества информации, тем более информативным является признак. Действительно признак y_4 содержит больше информации, чем признак y_1 , который сообщает только о том, что имеется неисправность в блоке C_1 , при этом ему неизвестно в каком состоянии находятся остальные блоки.

Для разделения устройства на половины выбирают наиболее информативный признак (с наибольшим значением I) и разделением всех блоков на две группы с одинаковыми (равными) значениями выбранного признака в каждой группе. Если $I_{\max}$ одинаково для нескольких признаков (в таблице $I_{\max} = 16$ для y_4, y_6, y_7), то выбирается любой из этих признаков.

Итак, выберем в качестве контролируемого 4-й блок. Тогда состояния можно разбить на две группы: C_1, C_2, C_3, C_4 – группа, в которой значение признака $y_4 = 0$; и C_5, C_6, C_7, C_8 – группа, в которой значение $y_4 = 1$.

Соответствующие колонки в таблице сгруппируем и отделим группы друг от друга жирной вертикальной линией (см. табл.3). Количество информации (см. выражение 2) теперь подсчитаем в каждой группе и полученные значения сложим, т.е. посчитаем количество информации I_1 в группе C_1, C_2, C_3, C_4 , а также I_2 в группе C_5, C_6, C_7, C_8 , полученные значения сложим для каждого признака.

Таблица 3 – Первичное преобразование таблицы признаков и состояний

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	$I = I_1 + I_2$
y_1	0	1	1	1	1	1	1	1	$3+0=3$
y_2	0	0	1	1	1	1	1	1	$4+0=4$
y_3	0	0	0	1	1	1	1	1	$3+0=3$
y_4	0	0	0	0	1	1	1	1	$0+0=0$
y_5	0	1	1	1	0	1	1	1	$3+3=6$
y_6	0	0	1	1	0	0	1	1	$4+4=8$
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1	$3+3=6$
y_8	0	0	0	0	1	1	0	0	$0+4=4$

Далее ставший неинформативным признак y_4 удалим из таблицы и из дальнейших расчетов исключим. Выберем следующий наиболее информативным будет признак y_6 , т.к. для него $I = 8$ (см. табл. 3).

Делим таблицу, разделенную на две группы (части), еще на подгруппы (подчасти), как показано в таблице 4:

- 1-я подгруппа C_1, C_2 , в которой значение признака $y_6 = 0$;
- 2-я подгруппа C_3, C_4 , в которой значение признака $y_6 = 1$;
- 3-я подгруппа C_5, C_6 , в которой значение признака $y_6 = 0$;
- 4-я подгруппа C_7, C_8 , в которой значение признака $y_6 = 1$.

Рассчитываем количество информации для каждой подгруппы и полученные значения складываем для каждого признака.

Таблица 4 – Вторичное преобразование таблицы признаков и состояний

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	$I = \sum I_{гп}$
y_1	0	1	1	1	1	1	1	1	$1+0+0+0=1$
y_2	0	0	1	1	1	1	1	1	$0+0+0+0=0$
y_3	0	0	0	1	1	1	1	1	$0+1+0+0=1$
y_5	0	1	1	1	0	1	1	1	$1+0+1+0=2$
y_6	0	0	1	1	0	0	1	1	$0+0+0+0=0$
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1	$0+1+0+1=2$
y_8	0	0	0	0	1	1	0	0	$0+0+0+0=0$

Исключим из таблицы уже использованный признак y_6 , в котором $I=0$, и продолжим разбиение по признаку y_5 , так как для него $I = 2$ (см. табл. 4). Делим таблицу дальше еще на части, так чтобы количество информации в признаке y_5 была равна 0 (см. табл. 5). При этом если в подгруппе содержаться только 0 или 1, то количество информации в такой подгруппе равно 0.

Таблица 5 – Третичное преобразование таблицы признаков и состояний.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	$I = \sum I_{cp}$
y_1	0	1	1	1	1	1	1	1	$0+0+0+0+0+0=0$
y_2	0	0	1	1	1	1	1	1	$0+0+0+0+0+0=0$
y_3	0	0	0	1	1	1	1	1	$0+0+1+0+0+0=1$
y_5	0	1	1	1	0	1	1	1	$0+0+0+0+0+0=0$
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1	$0+0+1+0+0+1=2$
y_8	0	0	0	0	1	1	0	0	$0+0+0+0+0+0=0$

Завершающее разбиение выполним по значениям признака y_7 (см. табл. 6).

В результате разобьем все группы и подгруппы на отдельные состояния, соответствующие блокам устройства.

Таблица 6 – Заключительное преобразование таблицы признаков и состояний.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	$I = \sum I_{cp}$
y_1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
y_2	0	0	1	1	1	1	1	1	0
y_3	0	0	0	1	1	1	1	1	0
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1	0
y_8	0	0	0	0	1	1	0	0	0

На этом процесс преобразования завершен.

В результате примененного метода половинного разбиения для устройства, представленного на рис. 2, установлено следующее:

- наиболее информативными оказались признаки y_4 , y_6 , y_5 , y_7 ;
- это минимальный набор признаков, по которому можно определить неисправность любого блока устройства;
- для однозначной идентификации неисправного блока достаточно провести три измерения (определения) информационных признаков, вначале y_4 , затем y_6 , а в заключении или y_5 или y_7 .

Итак, вывод – состояния устройства различаются значениями признаков блоков 4, 5, 6, 7. Идентификация неисправности может быть произведена по 8-ми разным наборам значений признаков согласно таблице 7.

Таблица 7 – Таблицы признаков и состояний, позволяющая идентифицировать неисправность блоков.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
y_4	0	0	0	0	1	1	1	1
y_5	0	1	1	1	0	1	1	1
y_6	0	0	1	1	0	0	1	1
y_7	0	0	0	1	1	1	0	1

Задание 2. Методом математической логики произвести оценку состояния заданного устройства.

Исходные данные по вариантам представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные для задания 2

Вариант	Блок-схема
1	<pre>graph TD; 4[4] -- "Ключ" --> 2[2]; 1[1] --> 2; 2 --> 3[3]; 5[5] --> 2</pre>
2	<pre>graph TD; 4[4] -- "Ключ" --> 2[2]; 1[1] --> 2; 2 --> 3[3]; 5[5] --> 2</pre>
3	<pre>graph TD; 4[4] -- "Ключ" --> 2[2]; 1[1] --> 2; 2 --> 3[3]; 5[5] --> 2</pre>
4	<pre>graph TD; 4[4] --> 2[2]; 1[1] --> 2; 2 --> 3[3]; 5[5] -- "Ключ" --> 2</pre>
5	<pre>graph TD; 4[4] -- "Ключ" --> 2[2]; 1[1] --> 2; 2 --> 3[3]; 5[5] --> 2</pre>

Вариант	Блок-схема
6	<pre> graph TD 4 --> 2 1 --> 2 2 --> 3 5 --> 2 2 --> 1 </pre>
7	<pre> graph TD 4 --> 2 1 --> 2 2 --> 3 5 --> 2 2 --> 1 1 --> 4 </pre>
8	<pre> graph TD 4 --> 2 1 --> 2 2 --> 3 5 --> 2 2 --> 1 </pre>
9	<pre> graph TD 4 --> 2 1 --> 2 2 --> 3 5 --> 2 2 --> 1 </pre>
10	<pre> graph TD 4 --> 2 1 --> 2 2 --> 3 5 --> 2 2 --> 1 </pre>

Постановка задачи: необходимо найти минимальную совокупность выходных параметров (признаков), контроль которых при испытании РЭС позволяет распознавать все возможные состояния системы, т.е. произвести оценку технического состояния РЭС.

Пример решения.

Данный метод позволяет найти все возможные минимальные наборы признаков. Покажем на примере как реализуется метод. Рассмотрим схему РЭС, состоящую из 5 блоков и показанную на рисунке 3.

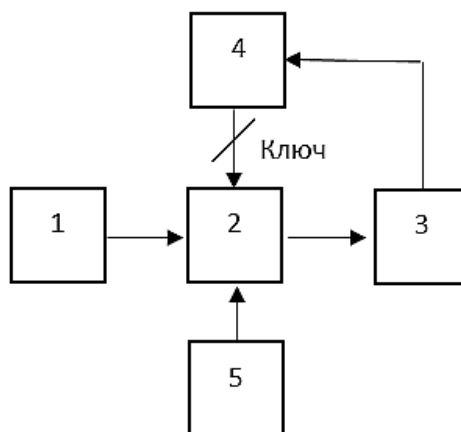


Рисунок 3 – Структурная схема РЭС

Первый шаг. Необходимо построить информационную модель устройства, представляющую собой таблицу признаков и состояний. Данная таблица составляется по методике, приведенной в примере решения предыдущего задания. При этом имеется следующая особенность. Если в структурной схеме РЭС имеется обратная связь, то при составлении таблицы состояний ее не следует учитывать. Физически это означает, что данная связь разомкнута (устранена), например, с помощью электронного ключа, т.е. в схеме, приведенной на рис. 3, отсутствует связь между блоками 4 и 2.

Таблица 9 – Таблица признаков и состояний для оцениваемого РЭС, схема которого приведена на рис. 3, при отсутствии обратной связи

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
y_1	0	1	1	1	1
y_2	0	0	1	1	0
y_3	0	0	0	1	0
y_4	0	0	0	0	0
y_5	1	1	1	1	0

Второй шаг. На основе анализа таблицы признаков и состояний необходимо составить логические выражения (логические суммы). Для этого выделить совокупности признаков, отличающие состояния в парах.

Например, из таблицы 9 видно, что состояния, соответствующие отказам блоков C_1 и C_3 , однозначно различаются по двум признакам y_1 и y_2 . Следовательно, для пары состояний C_1C_3 логическое выражение будет иметь вид: y_1+y_2 . Это означает, что набор признаков в виде логического выражения y_1+y_2 является минимальным, позволяющим оценить их состояния.

Отметим, что отличие всех состояний друг от друга эквивалентно реализации всех парных различий.

Таблица 10 – Таблица пар состояний и соответствующих им логических выражений для оцениваемого РЭС

Пары состояний	Различающие признаки (логические суммы)
C_1C_2	y_1
C_1C_3	y_1+y_2
C_1C_4	$y_1+y_2+y_3$
C_1C_5	y_1+y_5
C_2C_3	y_2
C_2C_4	y_2+y_3

C2C5	y5
C3C4	y3
C3C5	y2+y5
C4C5	y2+y3+y5

Третий шаг. Составить общее логическое выражение для оценки состояния РЭС и минимизировать его.

Общее логическое выражение, характеризующее одновременное появление всех перечисленных независимых пар состояний, равно логическому произведению логических выражений, представленных в правом столбце таблицы 10, т.е.

$$Y = y_1 * (y_1 + y_2) * (y_1 + y_2 + y_3) * (y_1 + y_5) * y_2 * (y_2 + y_3) * y_5 * y_3 * (y_2 + y_5) * (y_2 + y_3 + y_5)$$

Для минимизации этого выражения следует воспользоваться правилом алгебры логики – «правилом поглощения». Последнее формулируется следующим образом: если в скобке с дизъюнкциями признаков имеется хотя бы один признак с индексом, аналогичным индексу признака перед скобкой, то всю скобку можно поглотить (вычеркнуть), т.е.

$$y_i * (y_m + \dots + y_i + \dots + y_n) \equiv y_i.$$

Из общего логического выражения выбираем совокупность выражений, содержащих признак y_1 . Эти выражения в таблице 10 выделены синим цветом. Тогда их произведение минимизируется следующим образом:

$$y_1 * (y_1 + y_2) * (y_1 + y_2 + y_3) * (y_1 + y_5) = y_1.$$

Для совокупности выражений, содержащих признак y_2 , аналогичным образом получаем:

$$y_2 * (y_2 + y_3) * (y_2 + y_5) * (y_2 + y_3 + y_5) = y_2.$$

В результате минимизации получаем итоговое логическое выражение:

$$Y = y_1 * y_2 * y_3 * y_5.$$

Данное выражение представляет собой логическое произведение минимального набора признаков, по которому можно оценить техническое состояние РЭС и выявить неисправный блок. Для этого надо преобразовать таблицу 9 к виду, в котором присутствуют только оставшиеся логические выражения.

Таблица 11 – Таблицы состояний и признаков (логических выражений), позволяющая идентифицировать неисправность блоков.

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
y ₁	0	1	1	1	1
y ₂	0	0	1	1	0
y ₃	0	0	0	1	0
y ₅	1	1	1	1	0

Итак, вывод – состояния оцениваемого РЭС различаются минимальным набором признаков, принадлежащих блокам 1, 2, 3, 5. Идентификацию неисправного блока может быть произведена по 5-ми разным наборам значений признаков согласно таблице 11.

Задание 3. Построить программу поиска неисправности комбинированным методом для заданного устройства при условии, что вероятности отказов элементов равны $q_1 = 0.05$, $q_2 = 0.10$, $q_3 = 0.15$, $q_4 = q_5 = 0.25$, $q_6 = 0.20$.

Исходные данные по вариантам представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Общие исходные данные для задания 3 и 4

Вариант	Блок-схема
1	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
2	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
3	<pre> graph TD 1 --> 2 1 --> 5 2 --> 6 5 --> 6 5 --> 4 4 --> 3 </pre>
4	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
5	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 3 5 --> 6 </pre>
6	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
7	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 2 --> 5 3 --> 6 </pre>
8	<pre> graph LR 1 --> 2 2 --> 3 1 --> 4 4 --> 5 5 --> 6 6 --> 3 </pre>

Вариант	Блок-схема
9	<pre> graph TD 1[1] --> 4[4] 2[2] --> 3[3] 3 --> 6[6] 4 --> 5[5] 5 --> 6 </pre>
10	<pre> graph TD 1[1] --> 2[2] 2 --> 3[3] 3 --> 6[6] 6 --> 5[5] 5 --> 4[4] 4 --> 1 </pre>

Пример решения:

Рассмотрим схему РЭС, состоящую из 6 блоков и изображенную на рисунке 4.

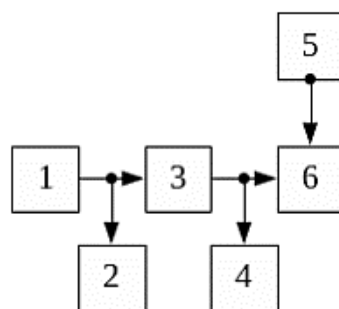


Рис. 4 – Структурная схема оцениваемого РЭС

Первый шаг. Построение таблицы признаков и состояний, дополненной строкой вероятностей отказов и столбцом значений функции предпочтения (см. табл. 13).

Расчёт функций предпочтения для каждого признака по формуле (1):

1) Для признака **y1**:

$$W_1 = |(q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - (q_1)| = |(0.1 + 0.15 + 0.25 + 0.25 + 0.2) - (0.05)| = |(0.95) - (0.05)| = 0.9.$$

2) Для признака **y2**:

$$W_2 = |(q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - (q_1 + q_2)| = |(0.85) - (0.15)| = 0.7.$$

3) Для признака **y3**:

$$W_3 = |(q_2 + q_4 + q_5 + q_6) - (q_1 + q_3)| = |(0.8) - (0.2)| = 0.6.$$

4) Для признака **y4**:

$$W_4 = |(q_2 + q_5 + q_6) - (q_1 + q_3 + q_4)| = |(0.55) - (0.45)| = 0.1.$$

5) Для признака **y5**:

$$W_5 = |(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_6) - (q_5)| = |(0.75) - (0.25)| = 0.5.$$

6) Для признака **y6**:

$$W_6 = |(q_2 + q_4) - (q_1 + q_3 + q_5 + q_6)| = |(0.35) - (0.65)| = 0.3.$$

Таблица 13 – Таблица признаков и состояний оцениваемого РЭС

q0	0.05	0.1	0.15	0.25	0.25	0.2	
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	W _i
y ₁	0	1	1	1	1	1	0,9
y ₂	0	0	1	1	1	1	0,7

у3	0	1	0	1	1	1	0,6
у4	0	1	0	0	1	1	0,1
у5	1	1	1	1	0	1	0,5
у6	0	1	0	1	0	0	0,3

Выделяем признак **у4**, обладающий наименьшей функцией предпочтения. По правилу поиска неисправности комбинированным методом первым проверяется состояние блока 4, признак которого имеет наименьшее предпочтение. При этом неисправность РЭС может быть обнаружена либо не обнаружена.

Второй шаг. Разделение исходной таблицы признаков и состояний на две части, расчет новых функций предпочтения.

В левую преобразованную таблицу (см. табл. 14) включаются блоки 1, 3 и 4, неисправное состояние которых может быть обнаружена при оценке признака **у4**. В правую таблицу (см. табл. 14) включаются блоки 2, 5 и 6, неисправное состояние которых не может быть обнаружена при оценке признака **у4**. При этом строка таблицы, содержащая признак **у4**, в преобразованных таблицах удаляется.

Далее производится расчет новых значений функций предпочтения (для каждой таблицы в отдельности) и занесение их в преобразованные таблицы 14.

В левой новой таблице выделяется признак **у3**, обладающий наименьшей функцией предпочтения. Следовательно, на втором шаге проверки (при условии, что неисправность РЭС ранее обнаружена) оценивается признак **у3**. При этом, если неисправность не обнаружена, то это означает, что **неисправен блок 4**.

Таблица 14 – Новые таблицы признаков и состояний оцениваемого РЭС после первого разделения (первого шага проверки)

q0	0.05	0.15	0.25	
	C1	C3	C4	Wi
у1	0	1	1	0,35
у2	0	1	1	0,35
у3	0	0	1	0,05
у5	1	1	1	0,45
у6	0	0	1	0,05

	0.1	0.25	0.2	
	C2	C5	C6	Wi
	1	1	1	0,55
	0	1	1	0,35
	1	1	1	0,55
	1	0	1	0,05
	1	0	0	0,35

В правой новой таблице выделяется признак **у5**, обладающий наименьшей функцией предпочтения. Это означает, что на втором шаге проверки (при условии, что неисправность РЭС ранее не обнаружена) оценивается признак **у5**. При этом, если неисправность обнаружена, то это означает, что **неисправен блок 5**.

Третий шаг. Сокращение новых преобразованных таблиц признаков и состояний, расчет сокращенных таблиц новых функций предпочтения.

В первую сокращенную таблицу (см. табл. 15) включаются блоки 1 и 3, неисправное состояние которых может быть обнаружена при оценке признака **у1**. При этом строка, содержащая признак **у3**, из этой таблицы удаляется.

Во вторую сокращенную таблицу (см. табл. 15) включаются блоки 2 и 6, неисправное состояние которых не может быть обнаружена при оценке признака **у2**. При этом строка таблицы, содержащая признак **у5**, из неё удаляется.

Далее производится расчет новых значений функций предпочтения (для каждой таблицы в отдельности) и занесение их в сокращенные таблицы 15.

Таблица 15 – Сокращенные таблицы признаков и состояний оцениваемого РЭС после второго преобразования (второго шага проверки)

q0	0.05	0.15	
----	------	------	--

	0.1	0.2	
--	-----	-----	--

	C_1	C_3	W_i
y_1	0	1	0,1
y_2	0	1	0,1
y_5	1	1	0,2
y_6	0	0	0,2

	C_2	C_6	W_i
	1	1	0,3
	0	1	0,1
	1	1	0,3
	1	0	0,1

В левой сокращенной таблице выделяется признак y_1 , обладающий наименьшей функцией предпочтения. Это означает, что на третьем шаге проверки (при условии, что неисправность РЭС ранее обнаружена) оценивается признак y_1 . При этом, если неисправность обнаружена, то это означает, что **неисправен блок 1**, а, если не обнаружена, то **неисправен блок 3**.

В правой сокращенной таблице выделяется признак y_2 , обладающий наименьшей функцией предпочтения. Это означает, что на третьем шаге проверки (при условии, что неисправность РЭС ранее не обнаружена) оценивается признак y_2 . При этом, если неисправность обнаружена, то это означает, что **неисправен блок 2**, а, если не обнаружена, то **неисправен блок 6**.

В итоге получается такая программа поиска неисправности РЭС комбинированным методом в виде диаграммы, представленной на рис. 5.

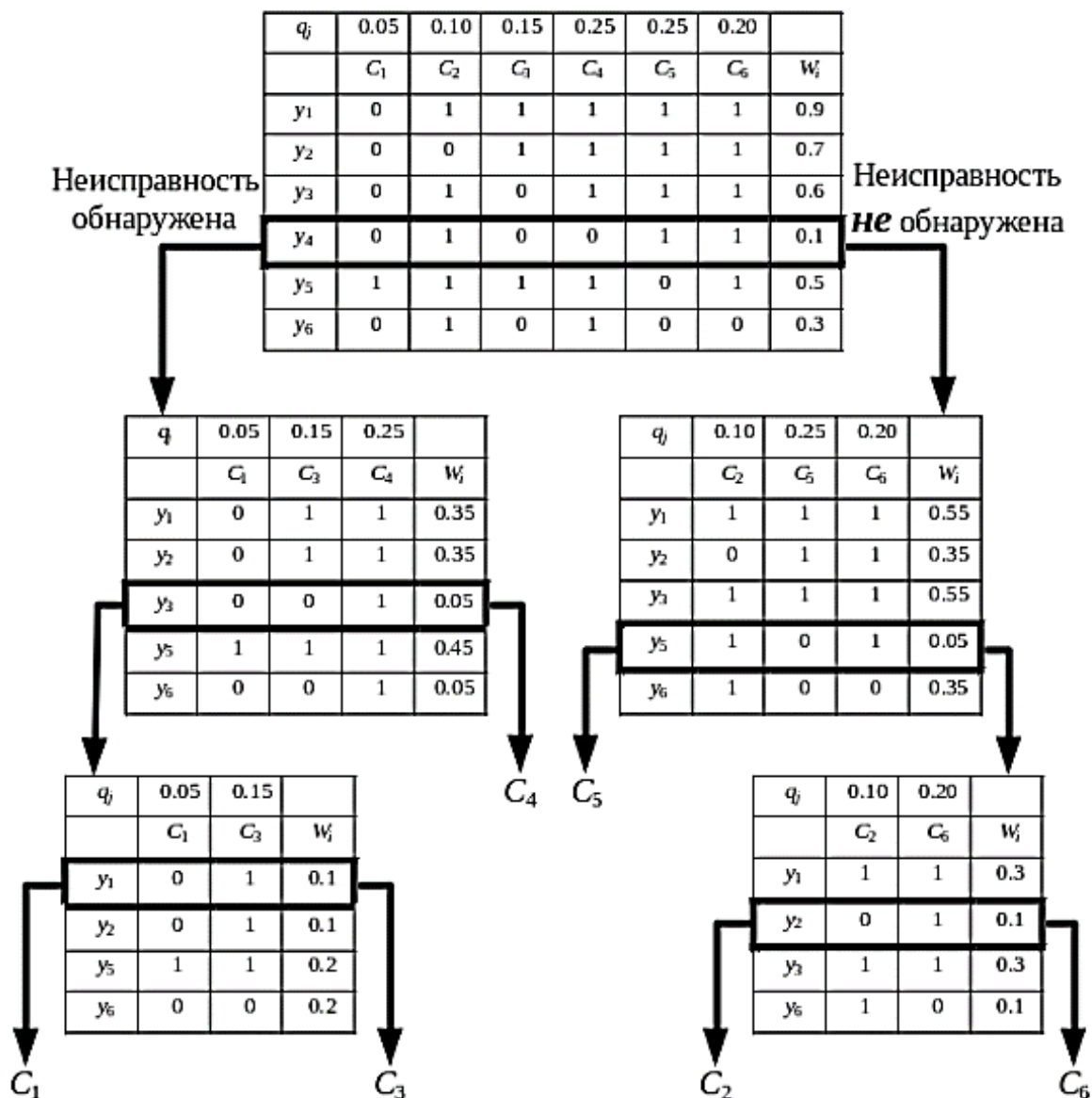


Рис. 5 – Программа поиска неисправности РЭС комбинированным методом

Таким образом, все левые ветви диаграммы соответствуют обнаружению неисправности, а все правые – ее отсутствию при контроле выбранного элемента. Это общее правило построения таких диаграмм. Полученная программа, по сути, представляет собой оптимальный алгоритм поиска неисправного элемента с учетом как связей между элементами, так и индивидуальных характеристик элементов. Именно последним обстоятельством данный метод отличается от метода половинных разбиений.

Задание 4. Построить древовидный алгоритм поиска неисправности комбинированным методом для заданного устройства (повышенный уровень).

Исходные данные по вариантам представлены в таблице 12, т.е. как в предыдущем задании.

Алгоритм поиска неисправности РЭС можно изобразить в виде «дерева». При этом приняты следующие обозначения. Кружок обозначает событие проверки выбранного блока РЭС, а квадратик – состояние блока РЭС. Рядом с квадратом состояния записывается его признак.

Переход по левым ветвям осуществляется при обнаружении неисправности в ходе проверки выбранного элемента, а по правым – при отсутствии данных о неисправности.

Пример решения для РЭС, схема которого приведена на рис. 4, представлен на рис. 6.

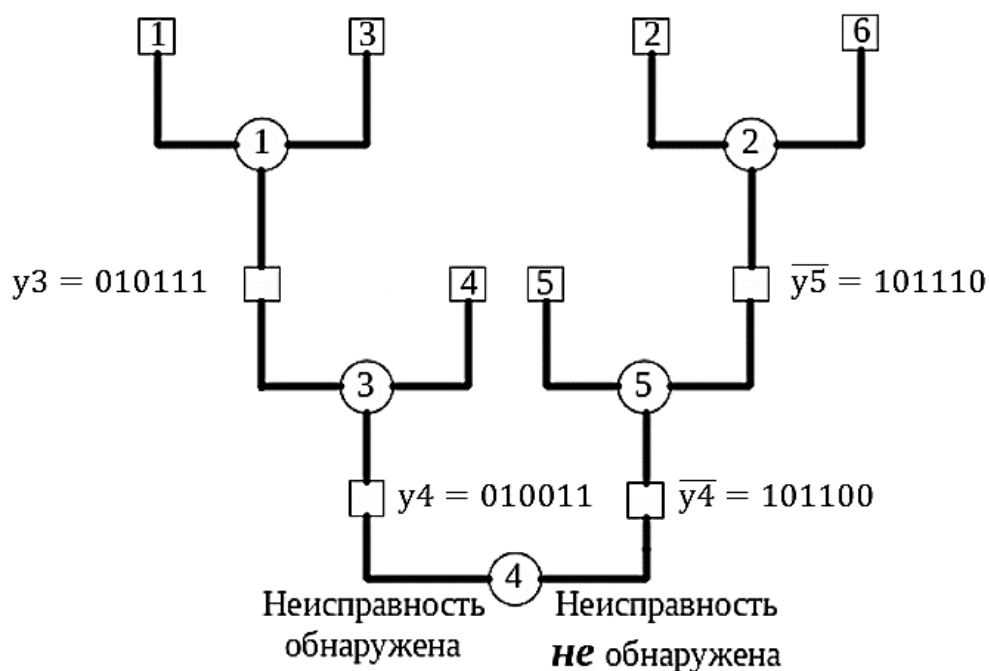


Рис. 6 – Древоподобный алгоритм поиска неисправности РЭС комбинированным методом

Итак, для поиска неисправности в заданной РЭС с помощью данного алгоритма необходимо произвести оценку состояния признаков y_4 , y_3 и y_1 (при необходимости) по левой ветви, либо признаков y_4 , y_5 и y_2 (при необходимости) по правой ветви.

Задание 5. Методом D-алгоритма определить тестовые воздействия и выявить неисправность типа неуправляемый логический «0» в заданной точке схемы (*повышенный уровень*).

Исходные данные для выполнения индивидуальных заданий по заданным вариантам представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Исходные данные для решения задания 5

Вариант	Схема	Проверяемый элемент
1	Logic circuit diagram for Variant 1. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (&), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&). Output: D. A red circle is on the output of G7.	G3
2	Logic circuit diagram for Variant 2. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (&), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&). Output: D. A red circle is on the output of G8.	G2
3	Logic circuit diagram for Variant 3. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (&), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&). Output: D. A red circle is on the output of G8.	G5

Вариант	Схема	Проверяемый элемент
4		G4
5		G1

Вариант	Схема	Проверяемый элемент
6	Logic circuit diagram for Variant 6. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Gates: G1 (AND), G2 (XOR), G3 (AND), G4 (XOR), G5 (XOR), G6 (AND), G7 (OR), G8 (AND). Output: D(a).	G3
7	Logic circuit diagram for Variant 7. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Gates: G1 (AND), G2 (XOR), G3 (AND), G4 (XOR), G5 (XOR), G6 (AND), G7 (OR), G8 (AND). Output: D.	G2

Вариант	Схема	Проверяемый элемент
8	Logic circuit diagram for Variant 8. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Intermediate outputs: D(a), D. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (=1), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&).	G2
9	Logic circuit diagram for Variant 9. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Intermediate outputs: D(a), D. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (&), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&).	G1
10	Logic circuit diagram for Variant 10. Inputs: X1, X2, X3, X4, X5, X6. Intermediate outputs: D(a), D. Gates: G1 (&), G2 (=1), G3 (&), G4 (&), G5 (=1), G6 (=1), G7 (1), G8 (&).	G3

Постановка задачи.

Методом *D*-алгоритма определить тестовые воздействия для выявления неисправности типа «неуправляемый логический «0» в точке *D(a)* схемы (см. рис. 7). Для этого записать в генератор слова такую кодовую последовательность, которая при условии исправности элемента *G1* обеспечит появление во внешней контрольной точке схемы *D* логической 1, и, наоборот, будет сигнализировать о неисправности (отказе) в данном элементе появлением логического 0.

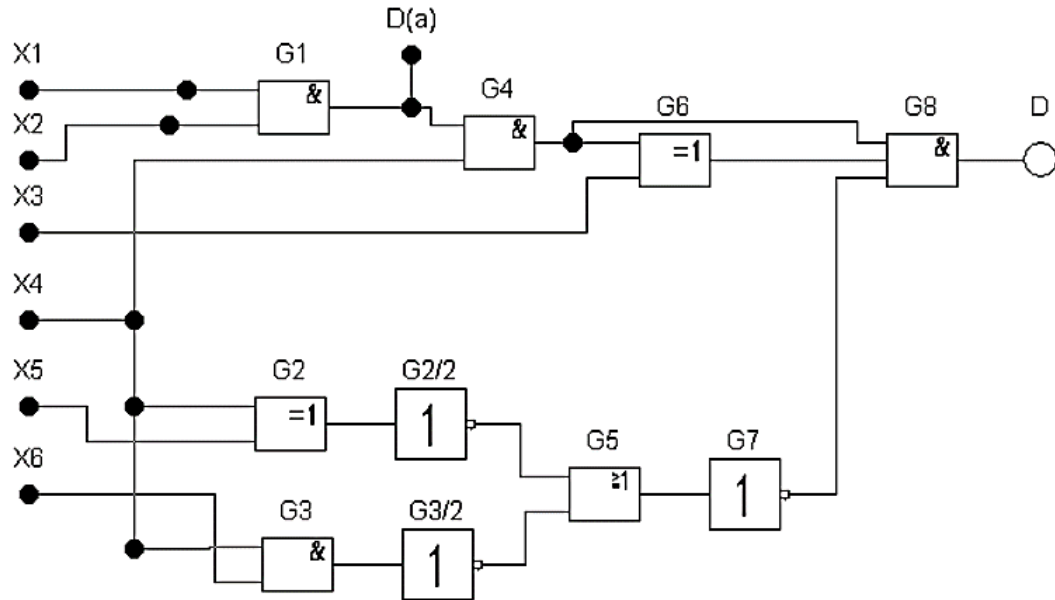


Рисунок 7 – Схема заданного цифрового устройства

Пример решения.

1) Загрузить в программе EWB заданную по варианту схему, например, представленную на рисунке 7.

2) Сформировать тестовый сигнал (кодovou последовательность) в генераторе слова для определения неисправности (отказа) в заданном элементе *G1* (внутренняя контрольная точка *D(a)*), так чтобы оценку состояния можно было осуществлять по внешней контрольной точке *D*, т.е. по светодиоду, подключенному к выходу элемента *G8*, поскольку внутренние контрольные точки, в том числе *D(a)*, недоступны для подключения внешних средств измерения. Для этого выполнить следующие операции (действия):

— подключить входы и выход схемы к логическому конвертору, как показано на рис.

8;

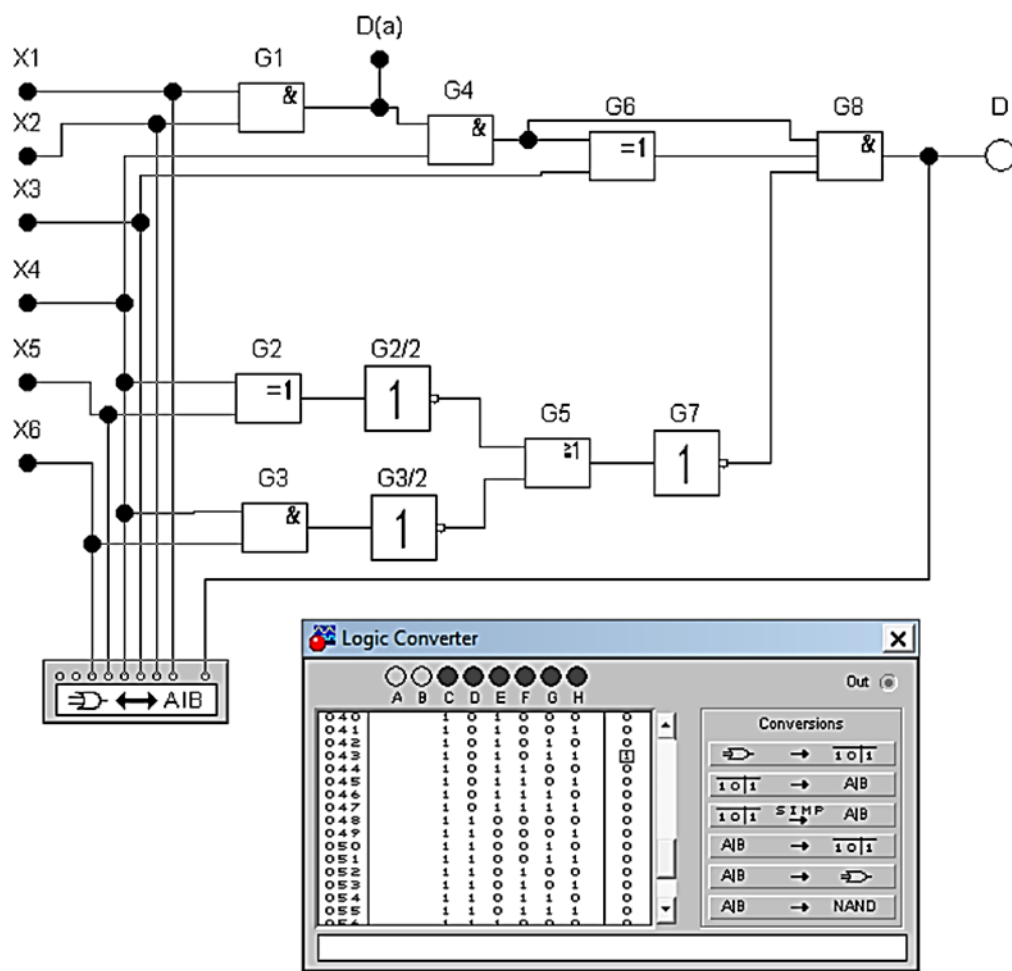


Рис. 8 – Схемы заданного цифрового устройства с подключенным логическим конвертором

— получить с помощью логического конвертора таблицу истинности заданного устройства, нажав кнопку преобразования  $\rightarrow$ 1011;

— найти в полученной таблице истинности входную комбинацию, при подачи которой на выходе будет присутствовать логическая 1, для рассматриваемого примера это будет комбинация 043 (см. рис. 8), имеющая вид 10 1011.

Итак, тестовое воздействие, с помощью которого методом *D*-алгоритма будет выявляться неисправность в элементе G1 заданной схемы по сигналу во внешней контрольной точке схемы D, имеет вид 2В (в шестнадцатеричном коде).

3) Внести изменение в схему путем отключения логического конвертора и подключения к входам схемы генератора слова, как показано на рис. 9.

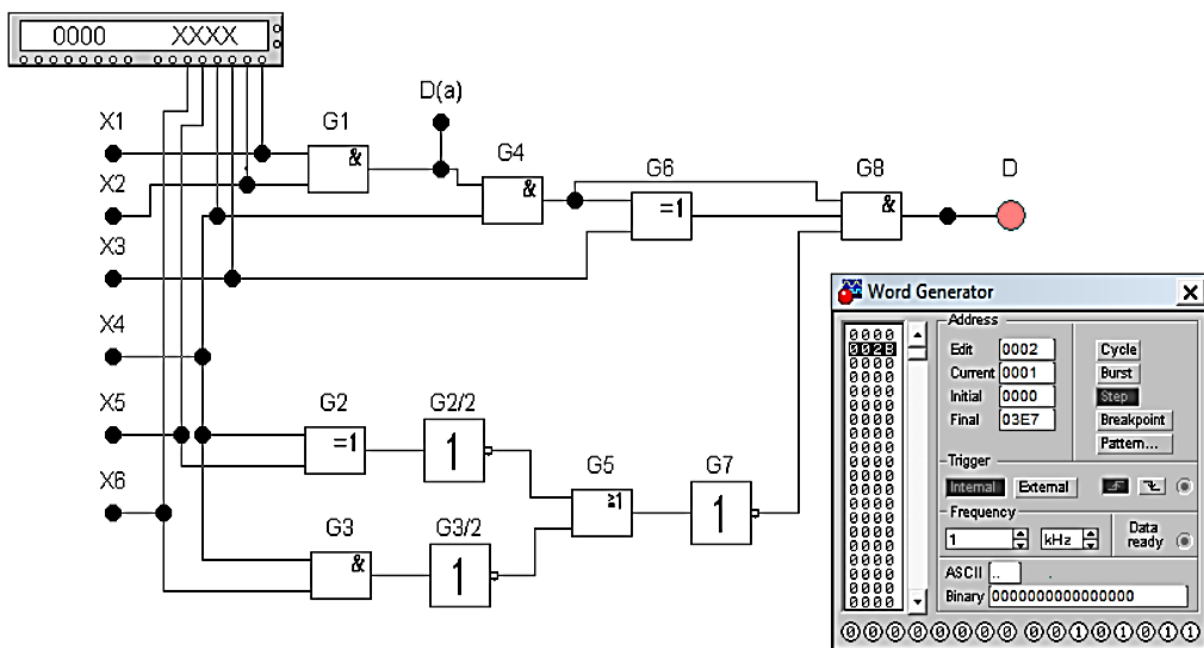


Рис. 9 – Схемы заданного цифрового устройства с подключенным генератором слова

4) Записать во второй ячейке генератора слова полученный код 002B (тестовое воздействие), запустить симулятор EWB в шаговом режиме, нажимая кнопку Step, и подав на вход проверяемой схемы тестовое воздействие, убедиться в исправности схемы и конкретно элемента G1, поскольку светодиод в точке D показывает наличие логической 1.

5) Внести отказ в элемент G1 и выявить неисправность с помощью исследуемого D-алгоритма. Для этого выполнить следующие операции:

— нажать левой кнопкой мыши на элемент G1, в открывшемся меню выбрать component properties (свойства компонента), открыть закладку Fault, и установить опцию Open (см. рис. 10);

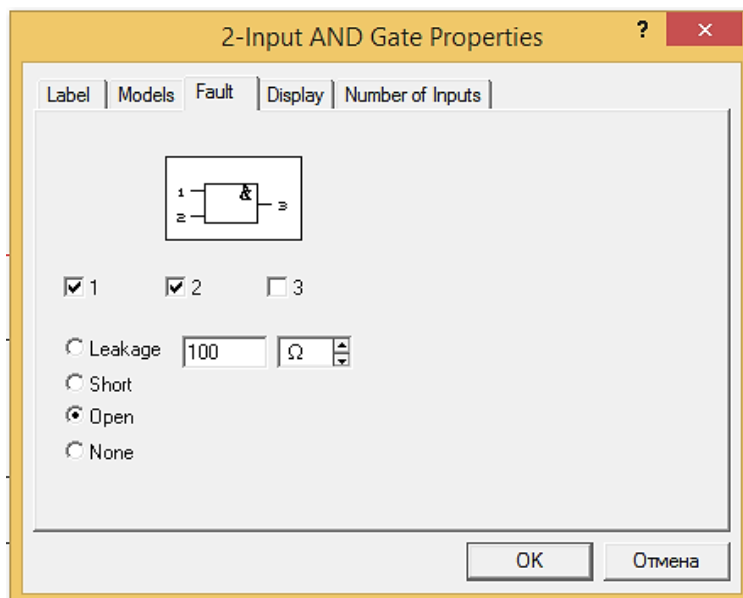


Рис. 10 – Внесение неисправности типа неуправляемый логический «0» в заданный логический элемент

— осуществить проверку схемы, для чего запустить симулятор EWB в шаговом режиме, нажимая кнопку Step, и подав на вход проверяемой схемы тестовое воздействие, убедиться в неисправности схемы и конкретно элемента G1, поскольку светодиод в точке D показывает наличие логический 0.

Таким образом, с помощью исследуемого метода D -алгоритма была сформировано необходимое для его применения тестовое воздействие и выявлена неисправность типа «неуправляемый логический «0» в заданном элементе тестируемой схемы.

В результате была верно подобрана последовательность, так как на месте неисправности 0, то и на выходе G8 тоже 0.

Ответ: Была верно, подобрана кодовая последовательность, так как на выходе элемента G8 в исправном состоянии будет $D = 1$, а в неисправном $D = 0$.

Задание 6. (для самостоятельной работы) Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

- тему и цели работы, задания для исследований;
- блок-схемы, функционально-диагностические схемы, принципиальные схемы исследуемых РЭС и устройств;
- таблицы признаков и состояний заданных РЭС, результаты их преобразований с помощью исследуемых алгоритмов;
- полученные логические выражения и результаты их преобразований;
- расчет функций предпочтений;
- программу и алгоритм поиска неисправностей;
- схему электрическую принципиальную стабилизатора напряжения, смоделированную в редакторе схематического моделирования EWB;
- полученное тестовое воздействие для D -алгоритма, порядок выявления неисправности;
- выводы по результатам выполнения заданий и в целом по проделанной работе, в том числе сравнительный анализ исследуемых методов оценки технического состояния РЭС и поиска неисправностей.

2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

**Лабораторное занятие разработано
доцентом кафедры инфокоммуникаций,
кандидатом технических наук, доцентом, профессором РАЕ
К.М. Сагдеевым**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Тема № 7: ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА БАЗЕ РАДИОПРИЕМНИКА

Время– 2 учебных часа.

Целевая установка лабораторной работы:

В ходе занятия студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

- оценивать техническое состояние радиоэлектронных средств и оборудования (ПК-5);
- проводить тестовые проверки эксплуатируемых радиоэлектронных средств и осуществлять поиск неисправных блоков (ПК-6);
- выполнять профилактические работы технического обслуживания на действующем оборудовании систем связи (ПК-6);
- подготовки испытательного оборудования, измерительной аппаратуры, приспособлений для поиска неисправностей и ремонта радиоэлектронных средств (ПК-7).

Учебно-материальное обеспечение:

1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:

- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
- программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12, для симуляции неисправного радиоприемника.

2) Методическая разработка к лабораторным работам по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Выбор того или иного метода использования информации о техническом состоянии диагностируемой аппаратуры обусловлен структурой объекта диагностики и требуемой глубиной поиска неисправностей. Он накладывает определенные требования на принципы построения и структуру системы контроля и диагностики.

Вид алгоритма (программы) поиска неисправностей существенно влияет на эффективность процесса контроля и диагностики. При разработке алгоритма поиска обычно решают две задачи:

- а) определяют наилучший набор контролируемых параметров;
- б) получают наилучшую последовательность измерения контролируемых параметров.

Рассмотрим наиболее распространенные методы построения алгоритмов поиска неисправностей в РЭА.

1) Метод последовательных поэлементных проверок (МППП)

Сущность метода заключается в том, что *все элементы проверяются по одному и в заранее определенной оптимальной последовательности*. В результате каждой проверки устанавливается неисправность или исправность проверяемого элемента. *Если проверенный элемент оказался исправным, приступают к проверке следующего элемента. При выявлении неисправного элемента* поиск прекращают и устраняют выявленную неисправность. *Устранив неисправность, проводят комплексную проверку всей системы.*

Если комплексная проверка показала, что есть еще неисправность, то поиск продолжается с той позиции, на которой был обнаружен неисправный элемент. После устранения второй неисправности опять производится комплексная проверка и так до тех пор, пока очередная комплексная проверка не покажет, что вся система исправна.

Пусть имеем систему, состоящую из N элементов (см. рис. 1). Причем соединение элементов может быть любым: последовательным, параллельным или смешанным. Нужно найти оптимальную последовательность поиска неисправного элемента.



Рис. 1 – Схема системы, содержащей N элементов

Содержание метода последовательных поэлементных проверок

1) По справочным данным определяется интенсивность потока отказов

$$\lambda_i (1/\text{час}); i = \overline{1, N}.$$

2) На основе опытных данных определяется среднее время проверки каждого элемента

$$t_i (\text{час}); i = \overline{1, N}.$$

3) Определяется показатель эффективности проверки каждого элемента

$$\theta_i = \frac{\lambda_i}{t_i}; i = \overline{1, N}.$$

4) Полученные показатели выстраиваются в убывающий ряд. Например,

$$\theta_8 > \theta_2 > \theta_4 > \theta_1 \dots$$

5) Проверку элементов производят поочередно в соответствии с полученным рядом (для приведенного выше примера элементы проверятся в следующем порядке: 8, 2, 4, 1 и т.д.).

Показатели метода

1) **Среднее время отыскания неисправного элемента**, не учитывая оптимального маршрута поиска отказа:

$$\overline{T}_{om} = Q_1 t_1 + Q_2(t_1 + t_2) + Q_3(t_1 + t_2 + t_3) + \dots + Q_N(t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N) = \sum_{s=1}^N Q_s \sum_{i=1}^s t_i, (1)$$

где $Q_i = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_j}; i = \overline{1, N}$ - условная вероятность отказа i-го элемента (условие – отказа системы).

Случай с исключением последней проверки не рассматриваем, ибо он не целесообразен.

Для конкретного приведенного выше примера (оптимальная последовательность):

$$\overline{T}_{om}^{opt} = Q_8 t_8 + Q_2(t_8 + t_2) + Q_4(t_8 + t_2 + t_4) + Q_1(t_8 + t_2 + t_4 + t_1) + \dots$$

На практике, вычисляя показатели метода, вы легко убедитесь, что $\overline{T}_{om}^{opt}$ будет меньше, чем любые другие $\overline{T}_{om}$ (для любой другой последовательности проверок элементов).

2) **Среднее число проверок при отыскании одного неисправного элемента**, не учитывая оптимального маршрута поиска отказа:

$$\overline{n} = \sum_{i=1}^N Q_i \cdot i. (2)$$

Для приведенного примера

$$\overline{n}^{opt} = Q_8 \cdot 1 + Q_2 \cdot 2 + Q_4 \cdot 3 + Q_1 \cdot 4 + \dots$$

Среднее число проверок в этом случае будет, безусловно, меньше.

Если вероятности отказов и средние времена проверок всех элементов одинаковы и равны Q, то так можно показать,

$$\overline{n} = \frac{N+1}{2}. (3)$$

Действительно,

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^N Q_s S = Q1 + Q2 + Q3 + \dots + QN = Q(1 + 2 + 3 + 4 + \dots + N) = \frac{1}{N} \cdot \frac{N(1+N)}{2} = \frac{N+1}{2}.$$

В заключении заметим, что *если элементы в системе функционально соединены параллельно (например, каналы в группах, трактах), то МППП является единственно возможным алгоритмическим методом поиска отказов (МПО).*

Достоинства МППП:

- функциональные связи между элементами не накладывают существенных ограничений. Метод может быть применен всегда.
- при параллельном соединении элементов является единственно возможным;
- не изменяется последовательность проверок при любом количестве неисправных элементов.

Недостатки:

- наибольшее среднее время и количество проверок;
- необходимость наличия большого числа разнотипной КИА.

Применение: целесообразно при отыскании неисправных элементов (деталей) в узле, каскаде, блоке.

2) Метод последовательных групповых проверок (МППГ)

Сущность данного метода поиска отказов заключается в том, что *вся система разбивается на m групп*. Определяется (путем контроля параметров в соответствующих КТ) группа, в которой находится неисправный элемент.

Основная задача, которая решается при разработке программы поиска отказов, сводится к определению, *с какой группы (КП) следует начинать проверку и какие шаги должны быть сделаны* в последующем после анализа результатов контроля, *чтобы получить минимальное время поиска или количество проверок. На практике могут быть использованы следующие принципы разбиения системы на группы:*

- по равному числу элементов в группе;
- по равному времени проверок;
- по равной вероятности отказа в группе (наиболее эффективен).

В практике эксплуатации при решении задачи разбиения системы на группы $m = 2$ имеем **следующие методы реализации МППГ:**

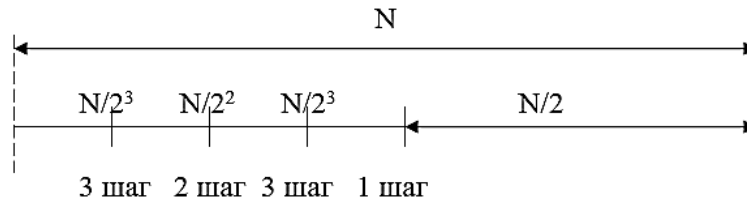
- «средней точки» по числу элементов;
- «средней точки» по половинной вероятности;
- «средней точки» по половинному времени.

Метод «средней точки» по числу элементов состоит в том, что система делится на 2 равные части (по числу элементов) и 1-ое измерение производится в средней точке. Определив группу с неисправным элементом, снова ее разбивают на 2 равные части по числу элементов и т.д. до определения отказавшегося элемента. *Этот метод дает оптимальное решение в случае*, если элементы равнонадежны или ничего неизвестно об их надежности, а время проверок группы элементов примерно одинаково. **В остальных случаях минимизируется только число проверок.**

Метод «половинной вероятности» заключается в том, что каждый раз система последовательно делится на две части так, чтобы вероятность отказов каждой из групп были примерно одинаковы.

Метод «половинного времени» состоит в том, что система последовательно делится на две части так, чтобы среднее время проверок в каждой группе было примерно одинаково.

Рассмотрим применение метода с использованием метода «средней точки» по числу элементов. Пусть имеем схему, содержащую 10 элементов (см. рис. 2), такая схема может быть характерна для радиоприемных устройств.



1 шаг – $\frac{N}{2}$ элемент в группе;

2 шаг – $\frac{N}{2^2}$ эл. в подгруппе;

3-шаг – $\frac{N}{2^3}$ эл. в подгруппе;

.....

K шаг – $\frac{N}{2^K}$ эл. в подгруппе.

При коэффициенте разбиения m на K -м шаге в каждой подгруппе таким образом будет

$\frac{N}{m^K}$ элементов.

Но в последней подгруппе должен быть 1 элемент. Следовательно, $\frac{N}{m^K} = 1$ или $m^K = N$.

Отсюда число разбиений при постоянном коэффициенте разбиения m будет

$$K = \frac{\log N}{\log m}.$$

Физически K показывает, за сколько разбиений в среднем мы можем найти неисправный элемент. Удобно основание логарифмов брать равным m , тогда $K = \log_m N$.

2) Среднее число проверок $\bar{n}$.

В МППП было доказано, что при одинаковых λ_i и t_i среднее число проверок элементов:

$$\bar{n} = \frac{N+1}{2}.$$

Это аналогично и для случая, когда разделена система на 2 группы, т.е. в системе 2 элемента, а не N .

Следовательно, среднее число проверок на каждом шаге: $\bar{n}' = \frac{m+1}{2}.$

А т.к. шагов – K , то $\bar{n} = \frac{m+1}{2} \frac{\log N}{\log m}$ (без исключения последней проверки)

$$\bar{n} = \left(\frac{m+1}{2} - \frac{1}{m} \right) \frac{\log N}{\log m} \text{ (с исключением последней проверки)}$$

где m – коэффициент разбиения. При $m = 2$ $\bar{n} = 1,5 \frac{\log N}{\log 2}.$

3) Среднее время отыскания неисправного элемента

$$\bar{T}_{om} = \bar{t} \bar{n}, \text{ где } \bar{t} \text{ – среднее время одной проверки.}$$

В заключение рассмотрим следующий **интересный вопрос**. При каком коэффициенте разбиения m среднее время отыскания неисправного элемента $T_{от}$ и среднее число проверок $\bar{n}$ минимальны?

Для этого необходимо решить уравнение

$$\frac{dT_{om}}{dm} = 0 \text{ или } \frac{d\bar{n}}{dm} = 0.$$

Продифференцировав уравнения $\bar{n}$ ($T_{от}$) по m , приравняв 0 и решив относительно m , получим $m=3,6$ (Для проверок с исключением $m = 1,87$). Поэтому обычно на практике $m = 2...3$.

Достоинства МППП:

- малое среднее число проверок;
- меньшая зависимость разброса среднего количества проверок от числа элементов;
- не имеет существенной разницы в программе поиска при любом количестве неисправностей;
- оптимален, если элементы равнонадежны;
- оптимален, если не известно о надежности и времени проверок (или время проверок – одинаково).

Недостатки МППП:

- применим только в системах с последовательной линейной структурой без обратной связи;
- необходимо, чтобы функциональная схема могла быть разделена на последовательно сужающиеся участки, имеющие неисправный элемент.

Применение: целесообразно применения на уровне канала связи, блока, тракта.

Перечень вопросов для проверки подготовленности к лабораторной работе:

- 1) Сущность метода последовательных поэлементных проверок.
- 2) Содержание метода последовательных поэлементных проверок.
- 3) Среднее время отыскания неисправного элемента с помощью метода последовательных поэлементных проверок.
- 4) Среднее число проверок при отыскании одного неисправного элемента с помощью метода последовательных поэлементных проверок.
- 5) Достоинства и недостатки метода последовательных поэлементных проверок.
- 6) Сущность метода последовательных групповых проверок.
- 7) Особенности реализации метода последовательных групповых проверок при выборе «средней точки» по числу элементов, по половинной вероятности и по половинному времени.
- 8) Порядок применения метода последовательных групповых проверок при выборе «средней точки» по числу элементов.
- 9) Алгоритм (граф) поиска отказа в устройстве методом последовательных групповых проверок.
- 10) Среднее число разбиений (количество шагов K) при использовании метода последовательных групповых проверок.
- 11) Среднее число проверок при использовании метода последовательных групповых проверок.
- 12) Среднее время отыскания неисправного элемента при использовании метода последовательных групповых проверок.
- 13) Достоинства и недостатки метода последовательных групповых проверок.

Содержание практической работы в ходе занятия

Описание рабочего оборудования:

- Электронные лаборатории на IBM PC, оснащенные программами:
- Microsoft Word для оформления отчета по лабораторной работе;
 - программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12, для симуляции неисправного радиоприемника.

Требования безопасности при выполнении работы:

- К проведению практического занятия допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- Включение компьютеров осуществляется только с разрешения преподавателя.

— При проведении практического занятия не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

— Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов рабочего оборудования (компьютеров).

— При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование (компьютер) от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

— При возгорании оборудования (компьютера) его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

— По окончании работы с оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задания для работы:

Базового уровня:

1) Произвести тестовые проверки блоков гетеродинного радиоприемника.
2) Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом последовательных поэлементных проверок.

3) Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом последовательных групповых проверок путем половинного деления.

Повышенного уровня:

4) Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом случайных проверок.

Порядок выполнения работы

Предусмотренные в работе исследования осуществляются на базе схемотехнической модели гетеродинного радиоприемника, разработанной в программном редакторе «Electronics Workbench» (EWB).

Задание 1. Произвести тестовые проверки блоков гетеродинного радиоприемника.

Порядок исследований в задании 1:

1) Открыть программный редактор схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» (EWB) и загрузить выданный преподавателем файл Схема ПРМ.ewb, содержащий схемотехническую модель гетеродинного радиоприемника.

Гетеродинный радиоприемник (см. рис. 1) состоит из следующих блоков: InCirc – входное устройство, RFA – усилитель высокой частоты (УВЧ), Het – гетеродин, Fconv – преобразователь частоты, PF40kH – полосовой фильтр промежуточной частоты 40 кГц, Detec – амплитудный детектор, нагруженный на сопротивление R3. С выхода каждого блока выведена соответствующая контрольная точка (КТ), предназначенная для оценки работоспособности блока.

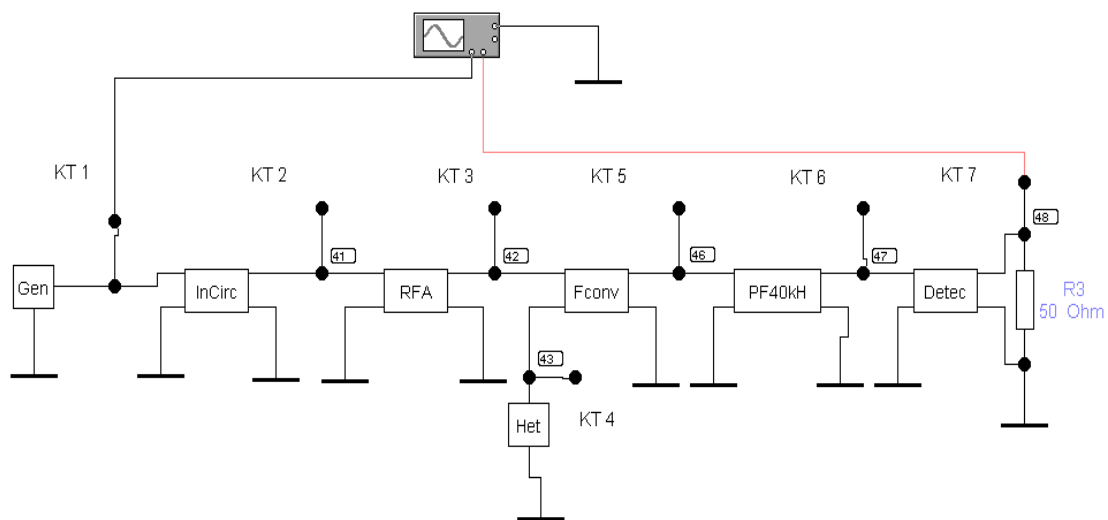


Рис. 1 – Блок-схема гетеродинного радиоприемника

Для осуществления тестовых проверок (испытаний на работоспособность) схема ПРМ содержит средства измерения:

- измерительный генератор (Gen), формирующий тестовый амплитудно-модулированный (АМ) сигнал;
- двухлучевой осциллограф для анализа формы сигналов в контрольных точках (КТ);
- программный Фурье-анализатор (спектральный анализатор), встроенный в программный редактор EWB.

2) Включить симулятор EWB, проверить работоспособность радиоприемника. Для этого первый канал осциллографа подключить к КТ1 (выход измерительного генератора), а второй канал – к КТ7 (выходу детектора).

Снять и проанализировать осциллограммы в указанных КТ. Осциллограммы на входе и выходе исправного приемника приведены на рис. 2 (входной АМ-сигнал и низкочастотный информационный сигнал).

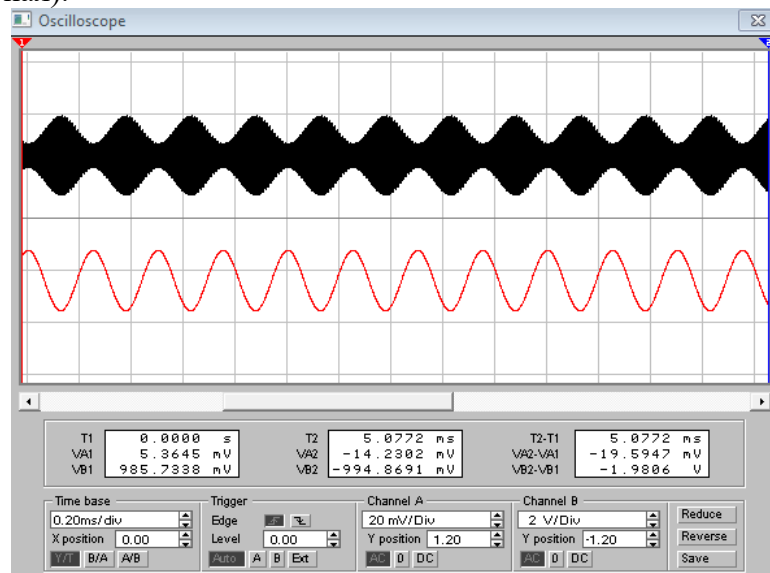


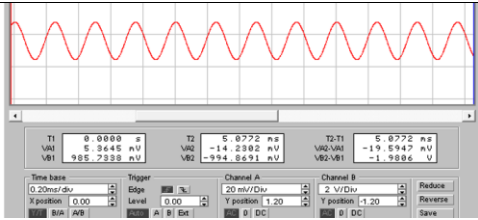
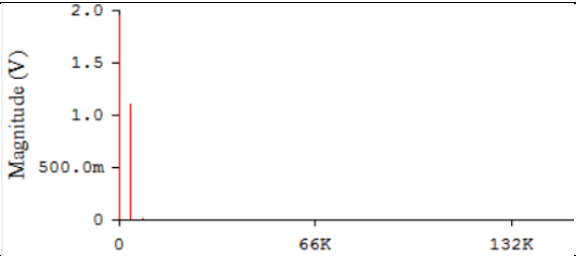
Рис. 2 – Осциллограммы исправного приемника (входной и выходной сигналы)

3) Произвести тестовые проверки исправных блоков гетеродинного радиоприемника. Для этого выполнить следующие операции:

- Последовательно подключая входы осциллографов к выходам блоков радиоприемника (КТ2 – КТ7), снять осциллограммы их выходных сигналов, занести их в таблицу 1 в качестве образцовых выходных сигналов исправных блоков.

— Последовательно для каждой контрольной точки (КТ2 – КТ7) получить спектрограмму выходных сигналов всех исправных блоков, запустив с помощью меню «Анализ» встроенный Фурье-анализатор, установив в нем основную частоту – 1 кГц, число гармоник – 200, а также номер узла, соответствующий исследуемой КТ (41 – 48). Занести полученные спектрограммы в таблицу 1 в качестве образцовых спектров на выходе исправных блоков.

Таблица 1 – Образцы осциллограмм и спектров на выходе исправных блоков

№ КТ	Осциллограмма	Спектрограмма
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

4) Сделать выводы по результатам тестовых испытаний.

Задание 2. Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом последовательных поэлементных проверок.

Постановка задачи: Исходные данные для исследования по вариантам, указанным преподавателем, представлены в таблице 2, в которой указаны неисправная схема и блок, имеющий наибольшую условную вероятность отказа, равную 0,25. При этом, все остальные блоки имеют одинаковую условную вероятность отказа, равную 0,15.

Таблица 2 – Исходные данные для выполнения задания 2

Вариант	Схема	Блок
1	Схема ПРМ_н2	Детектор
2	Схема ПРМ_н6	УВЧ
3	Схема ПРМ_н3	Гетеродин
4	Схема ПРМ_н5	Детектор
5	Схема ПРМ_н4	Полосовой фильтр
6	Схема ПРМ_н1	Преобразователь частоты
7	Схема ПРМ_н3	Гетеродин
8	Схема ПРМ_н2	Входное устройство
9	Схема ПРМ_н5	Полосовой фильтр
10	Схема ПРМ_н1	УВЧ
11	Схема ПРМ_н4	Входное устройство
12	Схема ПРМ_н1	Гетеродин
13	Схема ПРМ_н1	Преобразователь частоты
14	Схема ПРМ_н5	УВЧ
15	Схема ПРМ_н2	Детектор
16	Схема ПРМ_н5	Входное устройство
17	Схема ПРМ_н3	Полосовой фильтр
18	Схема ПРМ_н4	УВЧ
19	Схема ПРМ_н1	Детектор
20	Схема ПРМ_н6	Гетеродин

Порядок исследований в задании 2:

1) Открыть программный редактор схемотехнического моделирования «Electronics Workbench» (EWB) и загрузить выданный преподавателем файл Схема ПРМ_нХ.ewb, содержащий схемотехническую модель неисправного гетеродинного радиоприемника.

2) Убедиться в наличии неисправности, получив осциллограммы и спектрограммы на выходе приемника (КТ7) и сравнив их с образцовыми.

3) Порядок поиска отказа (неисправного блока) МППП:

а) первый шаг проверки:

— подключить осциллограф к КТ, соответствующей выходу указанного в табл. 2 блока, имеющего наибольшую условную вероятность отказа,

— запустив симулятор, снять в этой КТ осциллограмму сигнала, отключить симулятор и получить с помощью Фурье-анализатора его спектрограмму;

— занести полученные осциллограммы и спектрограммы в отчет по лабораторной работе;

— сравнить полученные осциллограммы и спектрограммы с образцовыми для этого блока (см. табл. 1), принять решение о наличии и отсутствии отказа (неисправности);

— зафиксировать время (длительность) одной проверки;

— если отказ не найден, то перейти к следующему шагу проверки.

б) второй шаг проверки:

— подключиться осциллографом к КТ соответствующей следующему или предыдущему блоку (*самостоятельно выбрать направление последовательности проверки*);

— повторить все действия, как на первом шаге;

— если неисправность не найдена, то произвести следующий третий шаг проверки и так до тех пор, пока отказ (неисправный блок) будет найден, при этом, если останется всего один непроверенный блок, то поиск закончен, поскольку в этом случае неисправность находится в нем.

4) По результатам проверок определить следующие показатели метода последовательных поэлементных проверок:

— количество практических шагов проверок, выполненных для обнаружения неисправности;

— среднее число проверок при отыскании одного неисправного блока при условии, что вероятности отказов и средние времена проверок всех элементов одинаковы и равны (воспользоваться формулой (3));

— сравнить практическое и теоретическое число проверок;

— среднее время отыскания неисправного элемента при заданных условных вероятностях отказов и при условии, среднее время одной проверки равно номеру варианта в минутах.

5) Сделать выводы по результатам исследования метода последовательных поэлементных проверок.

Задание 3. Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом последовательных групповых проверок путем половинного деления.

Постановка задачи: Исходные данные для исследования по вариантам, указанным преподавателем, представлены в таблице 3, в которой указаны заданы неисправные схемы. При этом для усложнения задачи будем считать, что измерительный генератор тоже является блоком радиоприемника, и в нем тоже может возникнуть отказ (неисправность). Условные вероятности отказов всех блоков имеют одинаковые значения. Время контроля каждого блока также примерно одинаково.

Таблица 3 – Исходные данные для выполнения задания 3.

Вариант	№ неисправной схемы	Вариант	№ неисправной схемы
1	3	11	1
2	5	12	4
3	2	13	3
4	6	14	2
5	1	15	6
6	2	16	4
7	3	17	1
8	1	18	3
9	2	19	2
10	5	20	5

Порядок исследований в задании 3:

1) Открыть программный редактор схмотехнического моделирования «Electronics Workbench» (EWB) и загрузить выданный преподавателем файл Схема ПРМ_нХ.ewb, содержащий схмотехническую модель неисправного гетеродинного радиоприемника.

2) Убедиться в наличии неисправности, получив осциллограммы и спектрограммы на выходе приемника (КТ7) и сравнив их с образцовыми.

3) Методом половинного деления разбить схему радиоприемника на две группы. Затем, продолжить разбиение каждой группы на подгруппы, до тех пор, пока в последних подгруппах останется по одному блоку.

Отразить в отчете по лабораторной работе процедуру разбиения схемы радиоприемника на блоки, указав состав блоков, входящих в каждую группу и подгруппы. Например, в виде алгоритма (графа) поиска отказа в заданном радиоприемнике.

4) Порядок поиск отказа (неисправного блока) МППП:

а) первый шаг проверки:

- подключить осциллограф к КТ, соответствующей выходу первой группы блоков,
- запустив симулятор, снять в этой КТ осциллограмму сигнала, отключить симулятор и получить с помощью Фурье-анализатора его спектрограмму;

- занести полученные осциллограммы и спектрограммы в отчет по лабораторной работе;

- сравнить полученные осциллограммы и спектрограммы с образцовыми для выходного блока первой группы (см. табл. 1), принять решение о наличии и отсутствии отказа (неисправности) в первой группе блоков;

- определить место следующей проверки, если в первой группе обнаружен отказ, то следующая проверка проводится в подгруппе этой группы, если в первой группе блоков отказ не обнаружен, то следует проводить проверку в подгруппе второй группы;

- перейти к следующему шагу проверки.

б) второй шаг проверки:

- подключиться осциллографом к выбранной КТ;
- повторить все действия, как на первом шаге;
- если неисправность не найдена, то произвести следующий третий шаг проверки и так до тех пор, пока отказ (неисправный блок) будет найден, при этом, если останется всего один непроверенный блок, то поиск закончен, поскольку в этом случае неисправность находится в нем.

5) По результатам проверок определить следующие показатели метода последовательных групповых проверок:

- количество практических шагов проверок, выполненных для обнаружения неисправности;

- среднее число разбиений (количество теоретических шагов проверок);

- среднее число проверок при отыскании одного неисправного блока при условии, что вероятности отказов и средние времена проверок всех блоков одинаковы и равны;

- сравнить практическое и теоретическое число проверок;

— среднее время отыскания неисправного элемента при условии, что среднее время одной проверки равно номеру варианта в минутах.

б) Сделать выводы по результатам исследования метода последовательных групповых проверок, сравнив его с МППП.

Задание 4. Произвести поиск отказа (неисправного блока) в гетеродинном радиоприемнике методом случайных проверок (повышенный уровень).

Постановка задачи: Исходные данные для исследования по вариантам, указанным преподавателем, представлены в таблице 4, в которой указаны заданы неисправные схемы. При этом для усложнения задачи будем считать, что измерительный генератор тоже является блоком радиоприемника, и в нем тоже может возникнуть отказ (неисправность). Условные вероятности отказов всех блоков имеют одинаковые значения. Время контроля каждого блока также примерно одинаково.

Случайная последовательность проверок определяется студеном самостоятельно, например, с помощью генератора случайных чисел или с помощью интуиции (угадывания).

Таблица 3 – Исходные данные для выполнения задания 3.

Вариант	№ неисправной схемы	Вариант	№ неисправной схемы
1	4	11	3
2	3	12	2
3	5	13	4
4	2	14	1
5	6	15	3
6	1	16	5
7	4	17	2
8	2	18	4
9	5	19	5
10	6	20	6

Порядок исследований в задании 4:

1) Открыть программный редактор схмотехнического моделирования «Electronics Workbench» (EWB) и загрузить выданный преподавателем файл Схема ПРМ_nX.ewb, содержащий схмотехническую модель неисправного гетеродинного радиоприемника.

2) Убедиться в наличии неисправности, получив осциллограммы и спектрограммы на выходе приемника (КТ7) и сравнив их с образцовыми.

3) Выбрать случайную КТ и провести проверку. Если исследуемый блок исправен, перейти к следующему, до тех пор, когда отказ будет найден.

4) Входе всех выполненных проверок снять осциллограмму и спектры сигнала в выбранных контрольных точках. Занести результаты исследований (осциллограммы и спектрограммы) в отчет по лабораторной работе

5) По результатам проверок определить следующие показатели метода случайных проверок:

— количество практических шагов проверок, выполненных для обнаружения неисправности;

— среднее время отыскания неисправного элемента при условии, что среднее время одной проверки равно номеру варианта в минутах.

б) Сделать выводы по результатам исследования метода случайных проверок, сравнив его с МППП и МППП. Определить наиболее оптимальный метод поиска неисправности.

Задание 5. (для самостоятельной работы) Оформить результаты исследований в виде отчета по лабораторной работе и защитить его.

1) В отчете отобразить:

— тему и цели работы, задания для исследований и краткий порядок их выполнения;

- структурную электрическую схему супергетеродинного радиоприемника, смоделированную в редакторе схематического моделирования EWB;
 - образцовые осциллограммы и спектрограммы сигналов на выходе блоков радиоприемника;
 - осциллограммы и спектрограммы сигналов, полученные в ходе проверок при поиске отказов (неисправных блоков);
 - рассчитанные и полученные показатели исследуемых методов (алгоритмов) поиска отказов (неисправностей);
 - выводы по результатам выполнения заданий и в целом по проделанной работе.
- 2) Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований.

Лабораторная работа разработана
доцентом кафедры инфокоммуникаций, кандидатом технических наук, доцентом,
профессором РАЕ

К.М. Сагдеевым

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК РЕГУЛИРОВОК В РЭС

Тема:

Время– 2 учебных часа.

Целевая установка практического занятия:

В ходе практического занятия студенты должны овладеть следующими умениями и навыками:

Учебно-материальное обеспечение:

- 1) Электронные лаборатории на IBM PC, из расчета 1 компьютер на 1 – 2 человека, оснащенные программами:
 - Microsoft Word для оформления отчетов по практическому занятию;
 - Mathcad Professional 15.0 для автоматизации математических расчетов.
- 2) Методическая разработка к практическому занятию по дисциплине Техническое обеспечение систем связи: [Электронный ресурс].

СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Методика исследования КСВ-метра

Коэффициент стоячей волны (КСВ) -отношение наибольшего значения амплитуды напряжённости электрического или магнитного поля стоячей волны в пучностях линии передачи к амплитуде в узлах.

КСВ является мерой согласования нагрузки (например, антенны) с линией передачи (фидером). КСВ в линии передачи не зависит от внутреннего сопротивления источника электромагнитной волны (генератора) и (в случае линейной нагрузки) от мощности генератора. Значение КСВ в однородной линии передачи без потерь постоянно по всей длине линии передачи и не зависит от её длины. КСВ влияет на:

- КПД системы «линия передачи — нагрузка»;
- Максимальное значение передаваемой по линии мощности;
- Режим работы генератора.
- КСВ определяется по формуле 1.

$$\text{КСВ} = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

При хороших детекторных диодах мостовой КСВ-метр может работать при напряжениях на входе всего 1...2 В. Но при измерениях антенн надо иметь в виду, что принятый ими из эфира сигнал искажает показания прибора. А сигнал на длинных проволочных КВ антеннах может достигать нескольких сотен милливольт. Поэтому желательно иметь сигнал на входе прибора 5... 15 В.

Желательно, чтобы значение КСВ в линии передачи было близко к единице, при этом максимален КПД системы «линия передачи — нагрузка», равный отношению мощности, выделяемой в нагрузку, к мощности падающей волны, отдаваемой генератором в линию передачи. Допустимые значения КСВ на рабочей частоте или в полосе рабочих частот для различных устройств регламентируются в технических условиях и ГОСТах. Обычно приемлемые значения КСВ лежат в пределах от 1,1 до 3,0.

Коэффициент бегущей волны (КБВ) — отношение наименьшего значения амплитуды напряженности электрического или магнитного поля бегущей волны в линии передачи к наибольшему. КБВ является величиной, обратной коэффициенту стоячей волны.

КБВ определяется по формуле 2.

$$\text{КБВ} = \frac{1}{\text{КСВ}}. \quad (2)$$

Методика исследования мощности

Краткие теоретические или справочно-информационные материалы

Мгновенная мощность двухполюсника является произведением мгновенных значений тока и напряжения. В Electronics Workbench имеется специальный компонент – умножитель, позволяющий получить на выходе сигнал, равный произведению двух входных потенциалов. Подав на входы этого компонента потенциалы, пропорциональные току и напряжению (рис. 3), и присоединив его выход к осциллографу, можно получить осциллограмму мгновенной мощности (см. рис. 1).

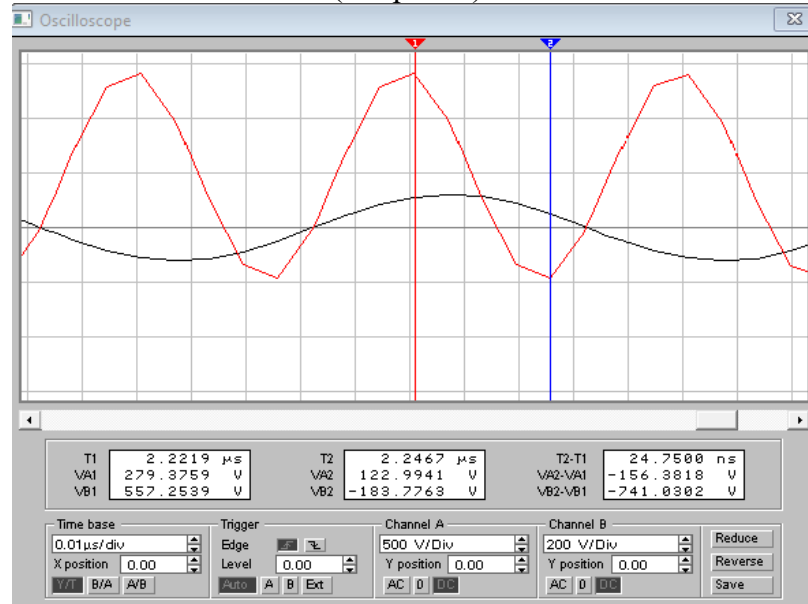


Рисунок 3. Осциллограмма мгновенной мощности

На постоянную составляющую, равную активной мощности двухполюсника P , наложена гармоническая составляющая с амплитудой, равной полной мощности S , поэтому минимальное и максимальное значения мгновенной мощности (отмеченные на осциллограмме курсорами 1 и 2 соответственно) связаны с P и S выражениями

$$P_{min} = P - S, \quad (3)$$

Измерив максимальное и минимальное значение мощности, можно вычислить активную и полную мощности из (4) и (5),

$$P = (P_{max} + P_{min})/2, \quad (4)$$

$$P = (P_{max} - P_{min})/2, \quad (5)$$

Зная P и S , можно определить и реактивную мощность Q

$$Q = (S^2 - P^2)^{0.5}. \quad (6)$$

В схемотехнике можно упростить сколь угодно сложную схему с помощью пассивных элементов замещения. Простейшими пассивными элементами схемы замещения являются резистор, катушка индуктивности и конденсатор. В данной лабораторной работе ваттметр был собран из таких элементов. В приведенной методике величины P , Q и S измеряются косвенно. Однако величина активной мощности может быть измерена и непосредственно. Она измеряется вольтметром постоянного напряжения, подключенным на выход умножителя. Некоторое несоответствие заключается в том, что на показывающем приборе высвечены несоответствующие единицы измерения (вольты, а не ватты). Для того, чтобы получить развязанные входы ваттметра, ток и напряжение на умножитель подаются через зависимые источники: источник напряжения, управляемый током, и источник напряжения, управляемый напряжением, соответственно.

Содержание практической работы, выполняемой студентами в ходе занятия

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ на каждого обучающегося;
- программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12;
- RFSim99 — программа для моделирования и анализа радиотехнических цепей.

2. Требования безопасности при выполнении работы:

- 1) К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- 2) Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.
- 3) При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.
- 4) Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).
- 5) При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.
- 6) При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.
- 7) По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание для работы по первому учебному вопросу:

Базового уровня:

Задание 1.1 Построить схему исследования КСВ-метра, исследовать осциллограмму при режиме согласования.

Задание 1.2 Исследование разрешенного отклонения коэффициента стоящей волны.

Содержание практической работы, выполняемой студентами в ходе занятия

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ на каждого обучающегося;
- программный редактор схематического моделирования «Electronics Workbench» (EWB), версия не ниже 5.12;
- RFSim99 — программа для моделирования и анализа радиотехнических цепей.

2. Требования безопасности при выполнении работы:

- 1) К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.
- 2) Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.
- 3) При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.
- 4) Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).
- 5) При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.
- 6) При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.
- 7) По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание для работы по второму учебному вопросу:

Базового уровня:

Задание 2.1 Создание и исследование схмотехнической модели ваттметра в среде Electronics Workbench.

Порядок проведения работы:

Задание 1. Исследование КСВ-метра.

Задание 1.1 Построить схему исследования КСВ-метра, исследовать осциллограмму при режиме согласования.

1. Построить схему, показанную на рисунке 1.
2. Перевести вольтметры (M1, M2, M3) в режим измерения переменного тока.

Для этого двойным нажатием левой кнопки «мыши» открыть контекстно-зависимое меню «Свойство прибора», в котором в окне Mode установить опцию AC.

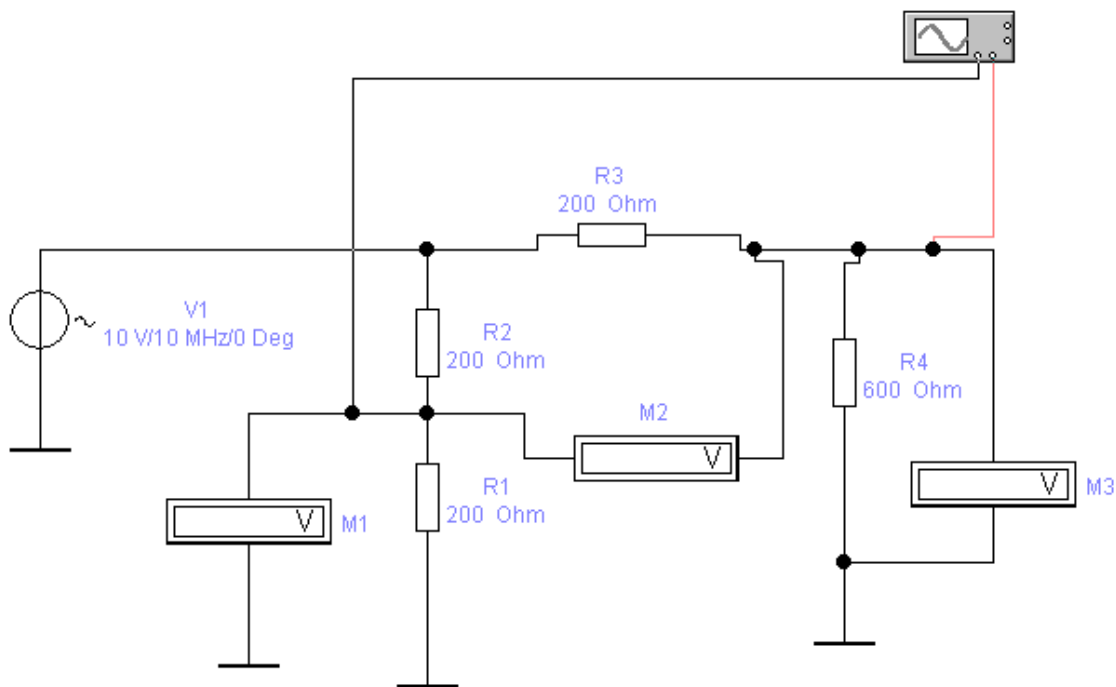


Рисунок 1. Схема исследования КСВ-метра

3. Настроить схему на режим согласования. Для этого установить значение всех 4 резисторов (R1, R2, R3, R4) 200 Ом.
4. Запустить симулятор, нажав кнопку  - «0-1» в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (через несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-Выключено».
5. Занести в отчёт полученную осциллограмму.

Задание 1.2 Исследование разрешенного отклонения коэффициента стоящей волны.

Таблица 1. Варианты исходных данных

Вариант	КСВ	Вариант	КСВ
1	3	11	2,2
2	2,5	12	2,9
3	2,6	13	2,7
4	2,2	14	2,6
5	2,7	15	2,3
6	2,8	16	2,1
7	2,9	17	2,5

8	2,1	18	2,3
9	2,4	19	3
10	2,3	20	2,2

1. Согласно данным вариантам, приведённым в таблице 1, установите при каком значении сопротивления антенны R4 (сопротивление резистора изменять с шагом 25 Ом) КСВ будет иметь допустимое значение.
2. Пример при допустимом значении КСВ=2:
 - а. Установить значение резистора R4 равное 400 Ом.

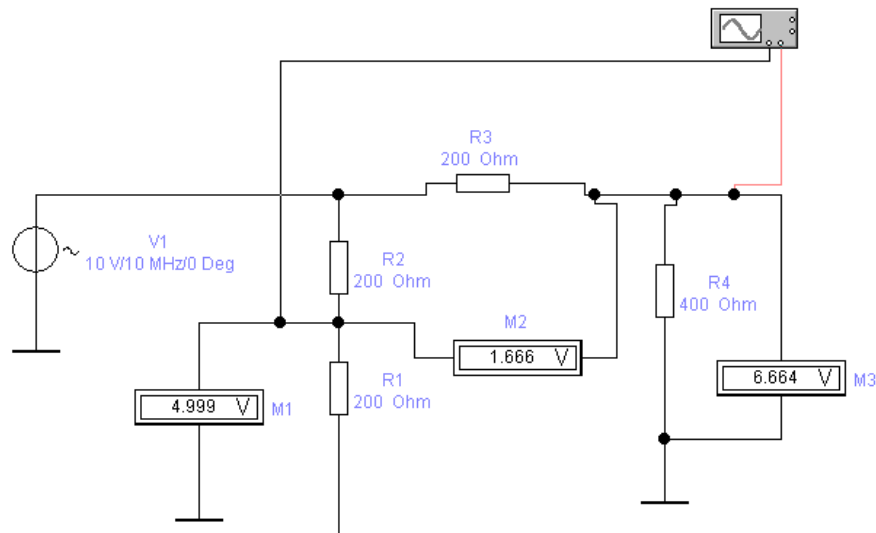


Рисунок 2. Пример

- б. Рассчитать полученное значение коэффициента стоящей волны (КСВ).
- с. Вычислить напряжение падения. Для этого вычитаем из значения вольтметра M1 значение вольтметра M2:

$$4,999 - 1,666 = 3,3.$$

- д. Рассчитать КСВ. Для этого требуется использовать формулу (1)

$$\frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}} = \frac{6,6}{3,3} = 2.$$

- е. По полученному ответу видно, что значение КСВ в допустимом значении.
3. Согласно варианту, вычислить коэффициент бегущей волны (КБВ)
4. Полученные значения и осциллограмму занести в отчёт. Сделать вывод по исследованию.

Порядок проведения работы:

2.1 Создание и исследование схмотехнической модели ваттметра в среде Electronics Workbench:

- 1) Собрать схему, приведенную на рисунке 4.

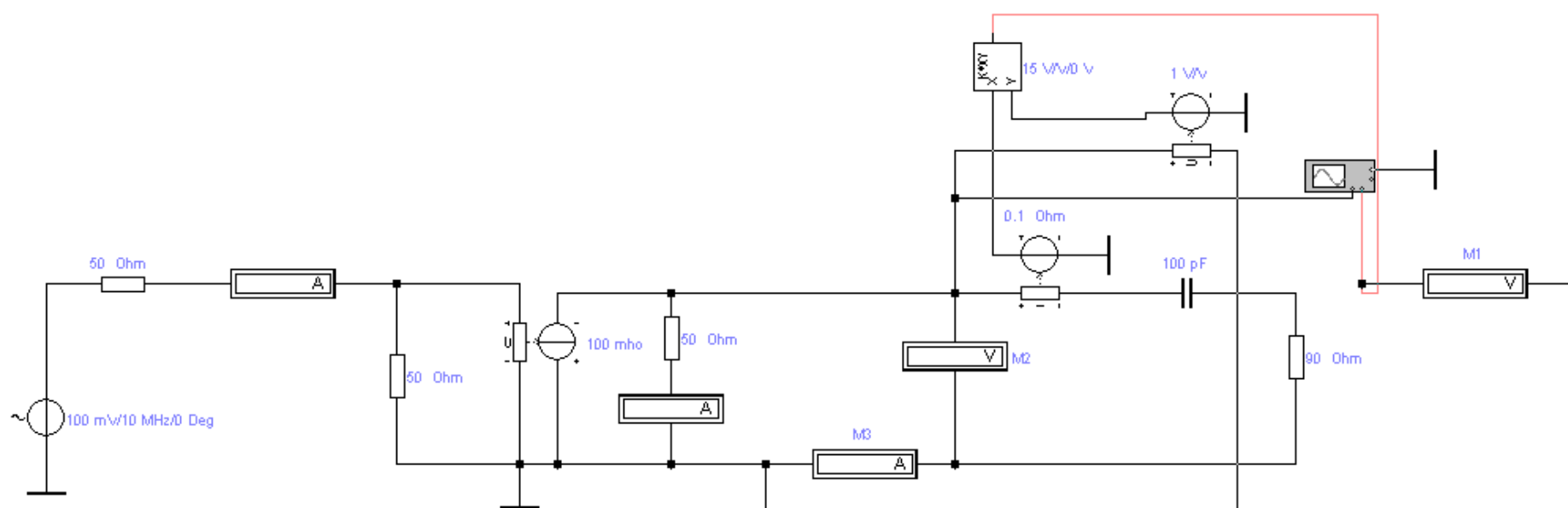


Рисунок 4. Схема исследования ваттметра

2) Установить параметры элементов RC- цепи, как показано на схеме №1, а также значение ЭДС $E = 100\text{В}$ и частоты $f = 10\text{МГц}$ источника синусоидального напряжения. В резисторах R1, R2 и R3 установить сопротивление в 50 Ом. В умножителе A1 установить напряжение в 15В. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра.

3) Перевести вольтметр M1 в режим измерения постоянного тока, а вольтметр M2 и амперметр M3 в режим измерения переменного тока. Для этого двойным нажатием левой кнопки «мыши» открыть контекстно-зависимое меню «Свойство прибора», в котором в окне Mode установить опцию DC или AC.

Таблица 2. Исходные данные

Вариант №	C, pФ	R, Ом	Вариант №	C, pФ	R, Ом
1	90	90	11	120	67
2	95	85	12	122	60
3	100	85	13	125	58
4	103	82	14	127	55
5	105	82	15	130	52
6	108	80	16	132	52
7	110	78	17	135	50
8	112	78	18	137	48
9	115	70	19	140	45
10	118	70	20	143	40

4) Согласно варианту, указанному в таблице 2 установить величины резистора, R4 и емкости C1. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра.

5) Запустить симулятор, нажав кнопку  - «0-1» в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов и результатов измерений кнопку  перевести в положение 0-Выключено».

6) Настроить осциллограф и занести в отчет осциллограммы напряжения, приложенного к цепи, и активной мощности цепи. Определить частоту изменения мгновенной мощности в цепи по формуле:

$$f = \frac{1}{T},$$

где T- это период.

7) Используя ползунки 1 и 2 измерить по осциллограмме мгновенной мощности минимальное и максимальное значения мгновенной мощности в цепи.

8) Рассчитать по измеренным значениям полную и активную мощности цепи используя формулы 5,6.

9) Используя формулу 7 найти реактивную мощность.

10) Сравнить полученные двумя различными способами измерения и расчета мощности. Найти относительную и абсолютную погрешность (достоверным считать значения ваттметра).

11) Сделать выводы по результатам проделанной работы.

Вопросы для самоподготовки:

1. Методика и регулировка границ диапазона принимаемых АМ сигналов.

2. Измерение коэффициента гармоник.
3. Измерение уровня собственных шумов.
4. Проверка действий системы АРУ.
5. Проверка и регулировка порога срабатывания схемы слежения за настройкой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9
Тема: РАЗРАБОТКА, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ
СЕТЕВОГО ГРАФИКА РЕГЛАМЕНТНЫХ РАБОТ.

Время – 2 учебных часа.

ЦЕЛЕВАЯ УСТАНОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ:

В рамках изучения сетевого анализа студенты обычно учатся: строить график сети по табличному или словесному описанию проекта (и наоборот), находить ранние и поздние сроки начала и окончания работ, резервы, критический путь и минимальное время завершения проекта.

УЧЕБНО-МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

- любой графический редактор для построения сетевых графиков; электронная методическая разработка по лабораторной работе.

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Вводная часть

Техническое обслуживание — это комплекс работ, проводимых с целью поддержания техники связи, АСУ и РТО в исправном или работоспособном состоянии при хранении, транспортировании, подготовке к использованию и использовании по назначению.

К основным задачам технического обслуживания относятся:

- предупреждение преждевременного износа механических и электромеханических элементов;
- предупреждение ухода электрических параметров и характеристик аппаратуры за пределы установленных норм;
- предупреждение неисправностей, вызываемых процессами старения и износа элементов, деталей и узлов аппаратуры;
- доведение параметров и характеристик до норм, установленных эксплуатационной документацией;
- выявление и устранение неисправностей и причин их возникновения;
- продление межремонтных ресурсов (сроков) и сроков службы.

Сетевое планирование и управление – система планирования и управления различных процессов, основанная на использовании сетевых моделей, в частности сетевых графиков, позволяющая определять оптимальную последовательность планируемых работ и их взаимосвязь.

В основе метода сетевого планирования и управления лежит:

- представление различных процессов в виде сетевого графика, с помощью которого можно отобразить
 - объем предстоящих работ
 - последовательность их выполнения
 - их логическую взаимосвязь.

Цель метода сетевого планирования и управления - спланировать, организовать и произвести комплекс работ в полном объеме с высоким качеством в заданное время.

Задачи метода сетевого планирования и управления:

- оптимальным образом выполнить весь комплекс работ;
- скоординировать работу личного состава;
- обеспечить высокую наглядность хода выполнения работ;
- иметь возможность, в случае необходимости, перераспределять ресурсы между работами;

Сетевой график - схема, отображающая технологические связи и последовательность разных работ в процессе достижения цели. Его пример указан на рисунке 1.

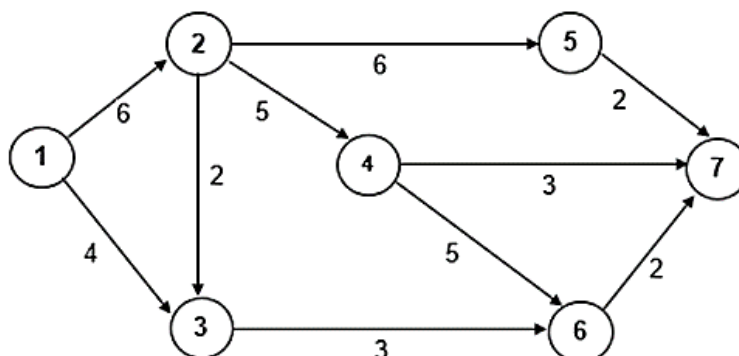


Рисунок 1 – Пример сетевого графика

Основные элементы сетевого графика:

- работы;
- события;
- пути.

Виды работ:

«**Действительная работа**»- процесс, требующий затрат сил, средств и времени;

«**Работа-ожидание**» - процесс, требующий только затрат времени.

«**Фиктивная работа**» - процесс, не требующий затрат ни сил, ни средств, ни времени, но указывающий на невозможность начала некоторых операций до окончания одной или нескольких работ;

Событие – результат выполнения одной или нескольких работ (не имеет продолжительности).

Обозначение событий на сетевом графике указано на рисунке 2.

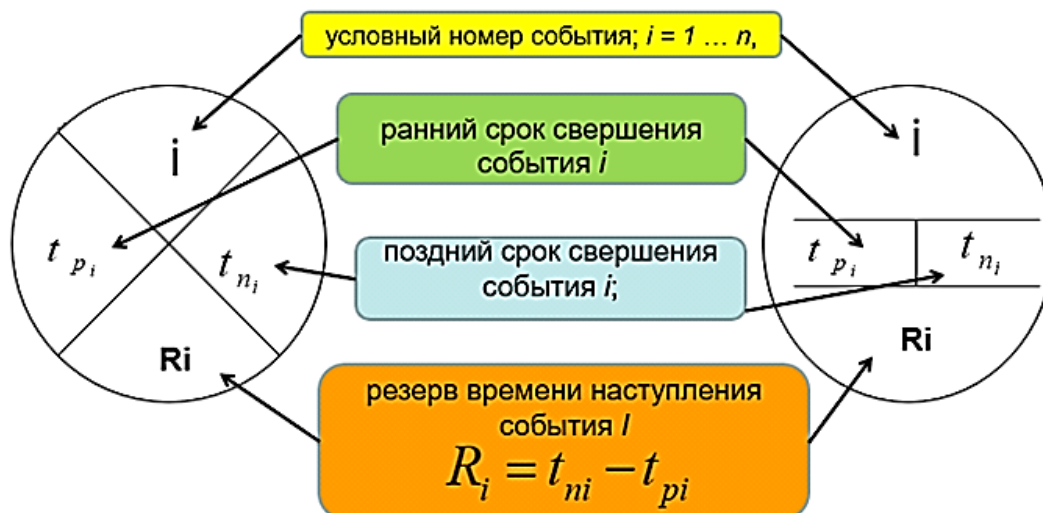


Рисунок 2 – подробное обозначение событий

Виды событий:

- **исходное** - событие, не имеющее предшествующих работ;
- **промежуточное** - событие, имеющее и предшествующие и последующие работы;
- **завершающее** - событие, не имеющее последующих работ.

Путь сетевого графика- любая последовательность работ сетевого графика.

Разновидности путей сетевого графика:

Полный путь – путь, начало которого совпадает с исходным событием, а конец - с завершающим событием.

Критический путь – полный путь, имеющий максимальную продолжительность.

Подкритический путь – полный путь, длина которого несколько меньше критического пути.

Порядок построения сетевого графика:

- подготовка исходных данных.
- построение исходной сети событий и работ.
- расчет временных параметров событий.
- построение сетевого графика и оценка его характеристик.
- анализ и оптимизация сетевого графика.

В свою очередь оптимизация сетевого графика делится на несколько типов.

Для оптимизации сетевого графика по способу “число исполнителей”, используют еще два графика , **график загруженности**(рис.3) и **привязки**(рис.4).

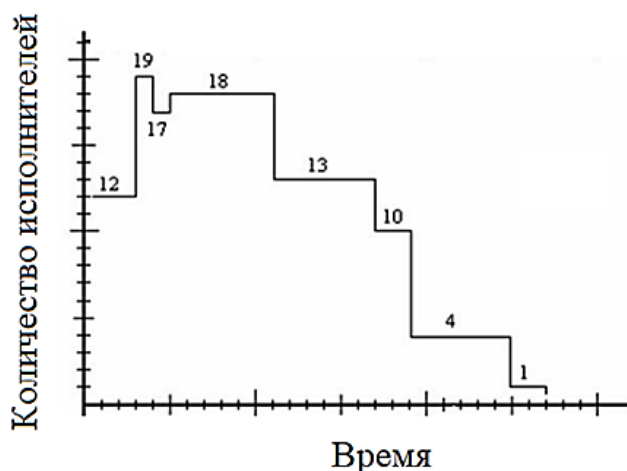


Рисунок 3.График загруженности.

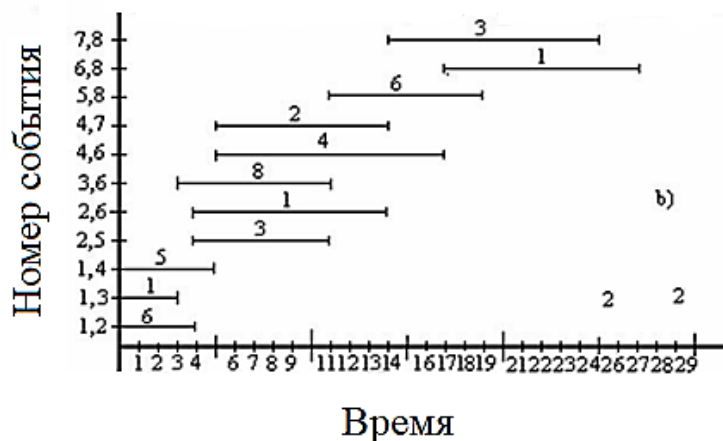


Рисунок 4.График привязки.

Эти два графика зависимы друг от друга – график загруженности ставится над графиком привязки , нужно это для того , чтобы исследовать нагрузку , в данном примере одновременно работающие исполнители, в определенный отрезок времени. Например, на рис. 5, мы видим что в течении срока 0-3 ч. задействованно 3 события – 1,2 1,3 и 1,4. Для определения загруженности , необходимо сложить всех исполнителей задействованных событий. Отсюда мы понимаем , что на этом отрезке времени, работает одновременно 12 человек.

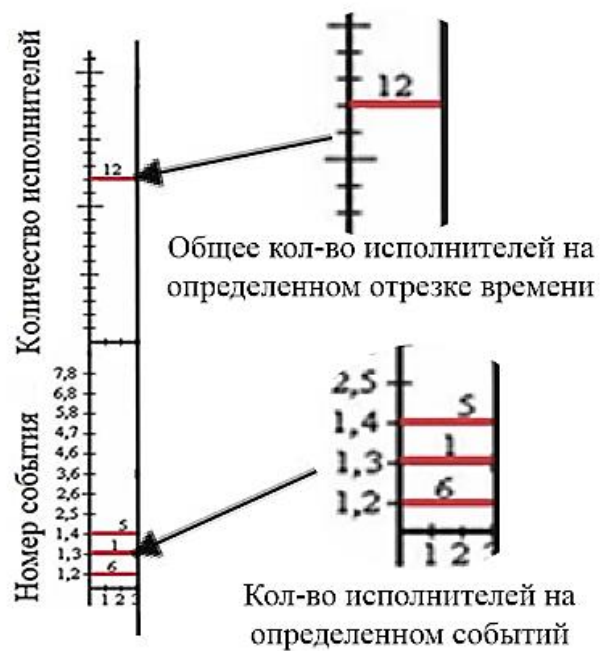


Рисунок 5. Задействованные события на отрезке 0-3 (отмечены красной линией).

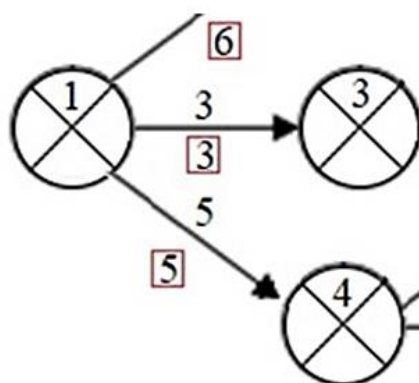


Рисунок 6. Количество исполнителей на работе 1-4, в сетевом графике обведены красным квадратом.

Фиктивные события указываются знаком ` , пример указан на рисунке 7

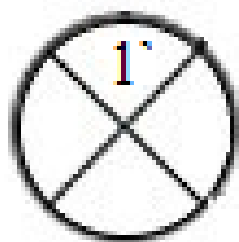


Рисунок 7. Фиктивное событие.

Минимальное количество исполнителей – 2.

Содержание практической работы, выполняемой студентами в ходе занятия

1. Описание лабораторного оборудования:

- ПЭВМ на каждого обучающегося;
- Любой графический редактор.;

2. Требования безопасности при выполнении работы:

1) К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2) Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3) При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4) Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5) При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6) При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7) По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

3. Порядок выполнения работы

Задание 3.1. Рассчитать сетевой график.

Постановка задачи: рассчитать сетевой график. Определить ранние и поздние сроки начала и окончания работ. Исходные данные для вариантов 1-10: таблица 1 и рисунок 8. Для вариантов 11-20: таблица 2 и рисунок 9.

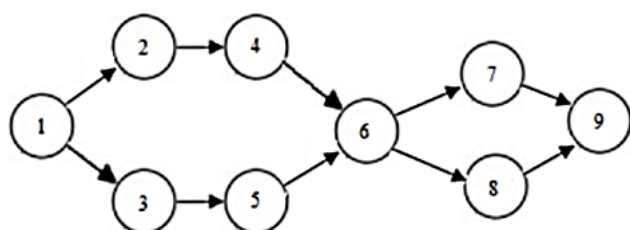
Исходные данные для выполнения расчетов приведены в таблицах 2 и 3.

Код работ Вариант	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-6	6-7	6-8	7-9	8-9
1	4	3	4	2	2	2	4	3	2	2
2	5	2	3	4	2	3	3	4	4	3
3	4	2	3	4	3	4	3	3	3	3
4	3	3	2	5	2	4	4	4	3	3
5	4	4	3	5	3	3	3	5	4	2
6	5	3	3	4	2	2	3	4	3	2
7	3	3	4	4	3	3	5	5	3	3
8	5	3	4	3	5	4	3	4	5	4
9	5	4	3	5	3	2	3	5	3	3
10	4	3	5	2	3	5	4	2	3	2

Таблица 1 – Исходные данные для графика 1(рис.7).

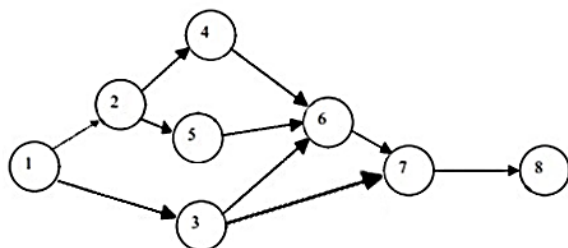
Код работ Вариант	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6	3-7	4-6	5-6	6-7	7-8
11	5	4	3	4	2	2	4	3	2	4
12	5	2	3	4	2	3	3	4	4	5
13	4	3	3	5	3	4	3	3	3	4
14	3	2	3	4	2	4	4	4	3	3
15	4	3	5	5	5	3	3	5	4	4
16	5	3	3	5	2	2	3	4	3	5
17	3	4	3	5	5	3	5	5	3	3
18	5	3	2	3	4	4	3	4	5	5
19	5	4	3	5	3	2	3	5	3	5
20	4	3	5	2	3	5	4	2	3	4

Таблица 2 – Исходные данные для графика 2(рис.8).



- 1-2 Проверка корректности работы сайта
- 1-3 Проверка кодировок файлов и папок
- 2-4 Проверка настройки установленного серверного ПО
- 3-5 Проверка кодировки таблиц базы данных.
- 4-6 Установка обновлений ядра
- 5-6 Оптимизация баз данных для ускорения работы сайта
- 6-7 Высвобождение свободного пространства
- 6-8 Настройка и контроль работы модуля защиты
- 7-9 Анализ скорости загрузки сайта
- 8-9 Мониторинг хостинговой площадки на предмет загрузки и наличия свободного места.

Рис.8 График для вариантов 11-20 (Регламентные работы сайта).



- 1-2 Резервное копирование баз данных
- 1-3 Проверка состояния связи между элементами системы
- 2-4 Проверка целостности соединительных кабелей, надежность подключения разъемов
- 2-5 Проверка и в случае необходимости смазка или замена вентиляторов охлаждения, замена термопасты на радиаторе процессора
- 3-6 Просмотр логов событий
- 3-7 Очистка временных файлов
- 4-6 Установка и обновление программного обеспечения
- 5-6 Проверка работоспособности антивирусной защиты компании
- 6-7 диагностика всех устройства на предмет наличия ошибок и отказ в функционировании.
- 7-8 мониторинг и производительности и информирование заказчика о состоянии

Рис.9 График для вариантов 1-10 (Тех.обслуживание сервера).

Пример выполнения задания:

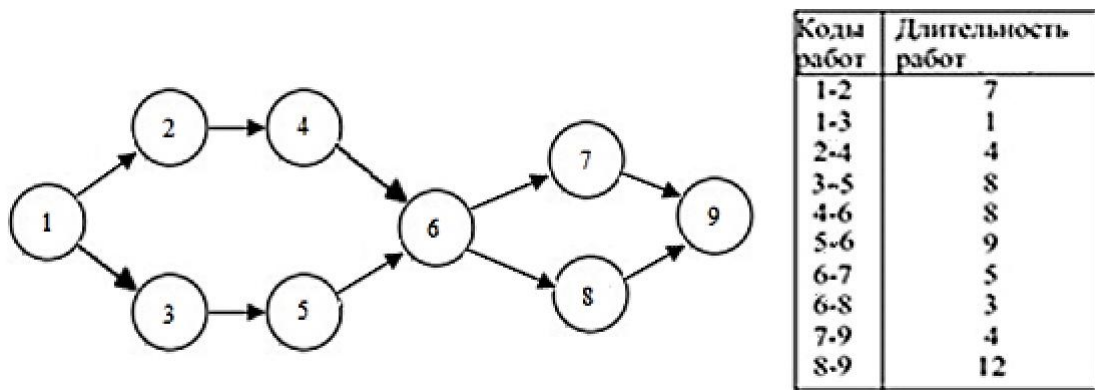


Рис.10 Исходные данные для примера задания 1.

Даны график, коды работ и их длительность, определим ранние и поздние сроки.

Рассмотрим прямой ход. Пусть T_j означает минимальное время окончания всех работ, конец которых изображается вершиной с номером j .

Очевидно, $T_1 = 0$, далее последовательно находим $T_j = \max (T_i + t_{ij})$, $j = 2, N$, где i – номер вершин сетевого графика, из которых выходят векторы, входящие в вершину с номером j ; t_{ij} – длительность работ с началом в вершине i и концом в вершине j , N – количество вершин сетевого графика.

При $j=N$ получаем минимальное время графика $T_{кр}=T_N$. T_j являются ранними сроками начала (окончания) работ, конец (начало) которых изображается вершиной j . Итак,

$$\begin{aligned}
 T_1^P &= 0, \\
 T_2^P &= \max(T_1^P + t_{12}) = 7, \\
 T_3^P &= \max(T_1^P + t_{13}) = 1, \\
 T_4^P &= \max(T_2^P + t_{24}) = 11 \\
 T_5^P &= \max(T_1^P + t_{13}) = 9 \\
 T_6^P &= \max(T_5^P + t_{56}, T_4^P + t_{46}) = \max(18, 19) = 19, \\
 T_7^P &= \max(T_6^P + t_{67}) = 24, \\
 T_8^P &= \max(T_6^P + t_{68}) = 22 \\
 T_9^P &= \max(T_8^P + t_{89}, T_7^P + t_{79}) = \max(34, 28) = 34
 \end{aligned}$$

Тогда $T_{кр} = 34$ - минимальное время графика.

Рассмотрим обратных ход. Пусть T_i^n означает наибольшее время окончания всех работ, входящих в вершину i , $T_{кр}=T_N^n$.

$$T_i = \min (T_j^n - t_{ij}), i = \overline{N, 2},$$

Где j – номер вершины, которой направлены векторы, выходящие из вершины с номером i .

$$\begin{aligned}
T_9^n &= 34, \\
T_8^n &= \min(T_9^n - t_{89}) = 22, \\
T_7^n &= \min(T_9^n - t_{79}) = 30, \\
T_6^n &= \min(T_8^n - t_{68}, T_7^n - t_{67}) = \min(19, 25) = 19, \\
T_5^n &= \min(T_6^n - t_{56}) = 10, \\
T_4^n &= \min(T_6^n - t_{46}) = 11, \\
T_3^n &= \min(T_5^n - t_{35}) = 2, \\
T_2^n &= \min(T_4^n - t_{24}) = 7, \\
T_1^n &= \min(T_2^n - t_{12}, T_3^n - t_{13}) = \min(0, 1) = 0.
\end{aligned}$$

T_i^n - поздние сроки начала (окончания) работ, начало которых изображается вершиной i .

Для определения критического пути составим таблицу.

Работа	Длительность (ч.)	Ранние сроки		Поздние сроки		Полный резерв	Свободн. Резерв
(i,j)	t_{ij}	T_i^p	T_j^p	T_i^n	T_j^n	R_{ij}	r_{ij}
1-2	7	0	7	0	7	0	0
1-3	1	0	1	0	2	1	0
2-4	4	7	11	7	11	0	0
3-5	8	1	9	2	10	1	0
4-6	8	11	19	11	19	0	0
5-6	9	9	19	10	19	1	1
6-7	5	19	24	19	30	6	0
6-8	3	19	22	19	22	0	0
7-9	4	24	34	30	34	6	6
8-9	12	22	34	22	34	0	0

Таблица 3. Полученные данные(критический путь закрашен желтым цветом).

Здесь $R_{ij} = T_j^n - T_i^p - t_{ij}$, $r_{ij} = T_j^p - T_i^p - t_{ij}$, - полный и свободный резерв. Критический путь сетевого графика составляют работы, для которых $R_{ij}=r_{ij}$ Получаем путь (1,2)-(2,4)-(4,6)-(6,8)-(8,9), время – 34 дня.

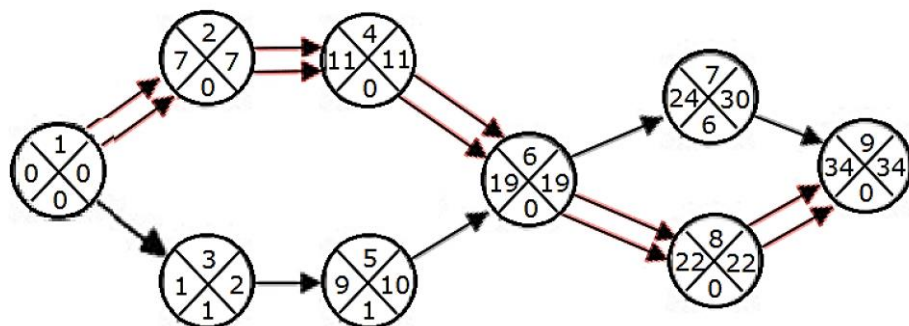


Рис.11 Заполненный график (красным обозначен критический путь).

Таким образом, мы определили критический путь , поздние и ранние сроки.

- занести в отчет по лабораторной работе полученный сетевой график и таблицу с результатами измерений и расчетов;
- тему и цель работы, задания для исследований
- сделать выводы по выполненному заданию;

Задание 3.2. Оптимизация сетевого графика по способу “кол-во исполнителей-загруженность”.

Постановка задачи: исходные данные для вариантов 1-10 указаны в таблице 4. Исходные данные для вариантов 11-20 указаны в таблице 5. Сетевой график и его данные остаются такими же, как и в задании 3.1

Суть метода состоит в ограничении максимального кол-ва одновременно работающих. Рассмотрим метод оптимизации сетевого графика по способу “кол-во исполнителей-загруженность” по подробней.

Исходные данные для задания 3.2.

Код работ Вариант	Количество исполнителей										Макс кол-во исполнителей (N)
	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-6	6-7	6-8	7-9	8-9	
1	2	3	2	4	2	3	4	3	2	2	16
2	4	3	2	3	4	7	2	2	2	5	17
3	4	3	6	2	4	5	4	4	5	3	18
4	7	6	4	2	3	3	5	3	4	4	16
5	6	7	5	3	5	2	2	5	2	5	15
6	2	8	7	2	2	2	3	3	5	4	16
7	7	2	4	3	3	3	2	4	4	2	17
8	2	4	2	2	4	4	4	5	3	3	18
9	3	2	5	3	2	6	3	3	4	5	14
10	9	2	5	4	4	5	6	4	2	4	15

Таблица 4 – Исходные данные для графика 1(рис.2).

Код работ Вариант	Количество исполнителей										Макс кол-во исполнителей (N)
	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6	3-7	4-6	5-6	6-7	7-8	
11	9	3	4	5	4	4	5	4	5	5	16
12	5	3	5	4	6	7	4	3	4	7	17
13	4	4	4	6	5	6	3	2	5	6	18
14	5	5	5	3	7	4	4	4	3	4	16
15	9	5	3	4	3	6	2	2	2	3	15
16	7	2	3	2	5	4	3	2	5	6	16
17	5	4	6	5	6	5	4	3	2	4	17
18	3	5	5	4	4	4	5	2	4	5	18
19	4	6	4	6	5	5	3	3	3	6	14
20	2	4	5	5	5	4	3	2	3	5	15

Таблица 5 – Исходные данные для графика 2(рис.2).

В данном задании необходимо оптимизировать сетевой график по способу “кол-во исполнителей-загруженность”, резерв и сроки заполнять необязательно. Исходные данные в

таблице 4. Сам график на рис.3, (в красном квадрате указано кол-во исполнителей для работы). **Минимальное количество исполнителей - 2.**

Пример выполнения задания:

Работа	Длительность (ч.)	Кол-во исполнителей (Обслуживающий персонал)	Макс кол-во исполнителей (N)
1-2	4	6	15
1-3	3	1	
1-4	5	5	
2-5	7	3	
2-6	10	1	
3-6	8	8	
4-6	12	4	
4-7	9	2	
5-8	8	6	
6-8	10	1	
7-8	11	3	

Таблица 6. Исходные данные для примера задания 2.

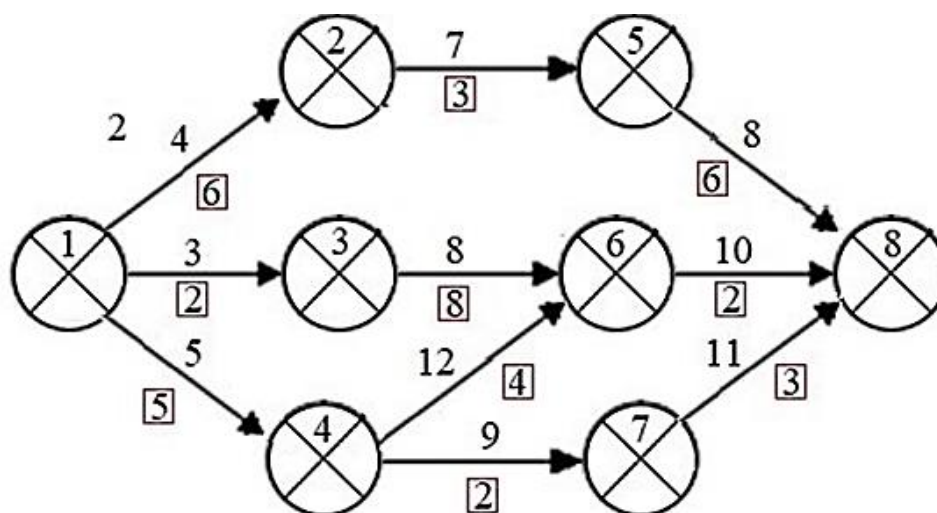


Рис.12 Построенный график для примера

Для начала, необходимо узнать сколько в целом работает человек в определенное время, для этого нужно построить график загрузки (Рис. 3). По горизонтали – время, по вертикали – работы.

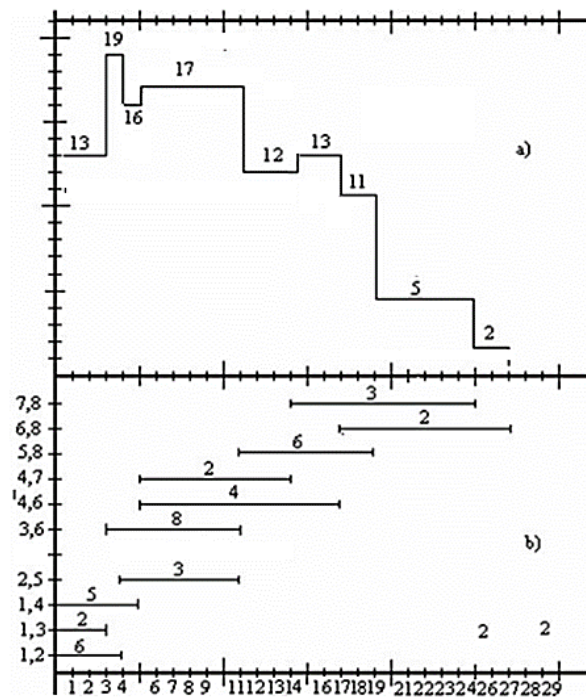


Рис.13.График загрузки(а) и привязки (b) до оптимизации.

В данном примере, всего может быть задействовано одновременно 15 человек, однако, как мы видим в промежутке от 3 до 11 ч. требуется больше человек чем максимально доступно, поэтому необходима оптимизация, для этого необходимо внести изменения в график(Рис 4), передвинем работы, в данном случае это 2-5,3-6 и 5-8(отмечены пунктирной линией).

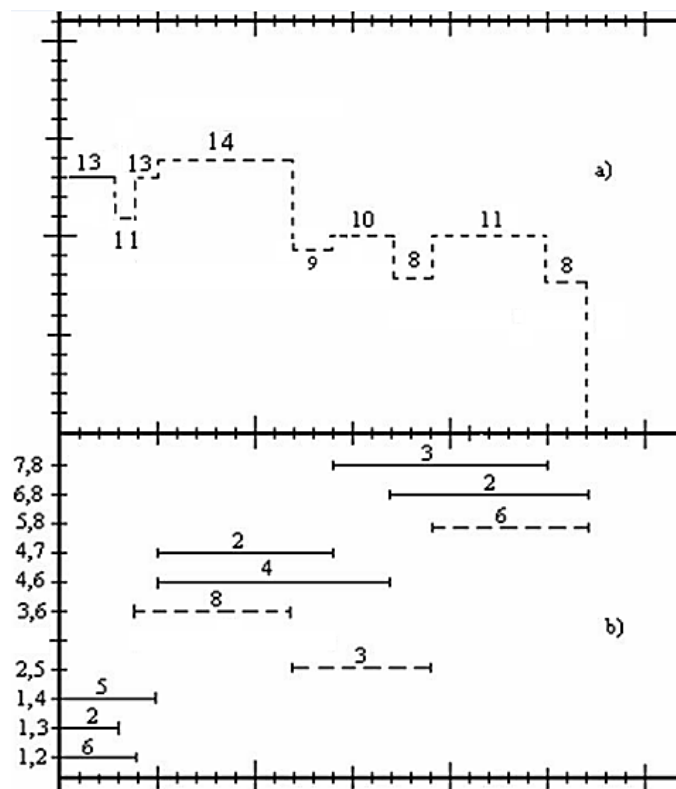


Рис.14 График загрузки (а) и привязки (b) после оптимизации.

Однако это только на графике, для того чтобы реализовать это уже на самом сетевом графике или таблице, необходимо внести **фиктивные работы**, т.е. обычное ожидание , выглядит это так :

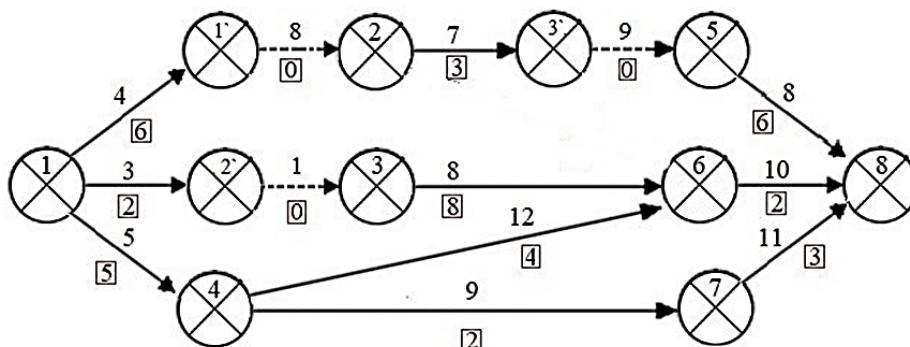


Рис 15. Оптимизированный сетевой график.

Работа	Длительность	Кол-во исполнителей (Обслуживающий персонал)	Макс кол-во исполнителей (N)
1-2	4	6	15
1-3	3	1	
1-4	5	5	
2-5	7	3	
2-6	10	1	
3-6	8	8	
4-6	12	4	
4-7	9	2	
5-8	8	6	
6-8	10	1	
7-8	11	3	
1'-2	4	Фикт-ая работа	
2'-3	3	Фикт-ая работа	
3'-5	9	Фикт-ая работа	

Таблица 7. Данные оптимизированного сетевого графика.

- занести в отчет по лабораторной работе график загрузки и привязки
- выводы по результатам проделанной работы и выполнения заданий
- Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований
- график загрузки и привязки ;

Задание 3.2. Оптимизация сетевого графика по способу “время-стоимость”.

Постановка задачи: Исходные данные для вариантов 1-10 даны в таблицах 8 и 10. Исходные данные для вариантов 11-20 указаны в таблицах 9 и 11. **Сетевой график остается таким же как и в прошлых заданиях**

Рассмотрим метод оптимизации сетевого по способу “время-стоимость”. Для этого предстоит выбрать длительность работы: быстро с увеличенной стоимостью или дешевле, но дольше.

Исходные данные для задания 3.2.

Вариант Огр-е по сумме(руб)	Код работ	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-6	6-7	6-8	7-9	8-9
1 3750 руб.	Норм. длительность	4	3	4	2	2	2	4	3	2	2
	Сокр. длительность	2	2	3	1	-	1	-	2	1	1
2 4000 руб.	Норм. длительность	5	2	3	4	2	3	3	4	4	3
	Сокр. длительность	2	1	2	3	-	1	-	3	2	1
3 4000 руб.	Норм. длительность	4	2	3	4	3	4	3	3	3	3
	Сокр. длительность	3	1	2	3	-	3	-	2	2	2
4 4500 руб.	Норм. длительность	3	3	2	5	2	4	4	4	3	3
	Сокр. длительность	2	2	1	4	-	2	-	3	2	2
5 5000 руб.	Норм. длительность	4	4	3	5	3	3	3	5	4	2
	Сокр. длительность	2	3	2	3	-	2	-	3	2	1
6 4500 руб.	Норм. длительность	5	3	3	4	2	2	3	4	3	2
	Сокр. длительность	2	2	2	3	-	1	-	3	2	1
7 5000 руб.	Норм. длительность	3	3	4	4	3	3	5	5	3	3
	Сокр. длительность	2	2	2	3	-	2	-	3	2	2
8 5500 руб.	Норм. длительность	5	3	4	3	5	4	3	4	5	4
	Сокр. длительность	2	2	2	2	-	3	-	3	2	3
9 4500 руб.	Норм. длительность	5	3	3	5	3	2	3	5	3	3
	Сокр. длительность	2	2	2	4	-	1	-	3	2	2
10 4750 руб.	Норм. длительность	4	3	5	2	3	5	4	2	3	2
	Сокр. длительность	2	2	2	1	-	2	-	1	2	1

Таблица 8 – Исходные данные для графика 1(рис.2).

Вариант Огр-е по сумме (руб)	Код работ	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6	3-7	4-6	5-6	6-7	7-8
11 3750 руб.	Норм. длительность	3	4	2	2	2	2	4	3	2	2
	Сокр. длительность	-	2	1	1	1	-	-	2	1	1
12 4000 руб.	Норм. длительность	3	2	3	4	2	3	3	4	4	3
	Сокр. длительность	-	1	2	3	1	-	-	3	2	1
13 4000 руб.	Норм. длительность	4	3	3	4	3	4	3	3	3	3
	Сокр. длительность	-	1	3	3	2	-	-	2	2	2
14 4500 руб.	Норм. длительность	3	4	2	4	2	4	4	4	3	3
	Сокр. длительность	-	2	1	2	1	-	-	3	2	2
15 5000 руб.	Норм. длительность	2	4	3	5	3	3	3	5	4	2
	Сокр. длительность	-	3	2	3	2	-	-	3	2	1
16 4500 руб.	Норм. длительность	4	3	3	4	2	2	3	4	3	2
	Сокр. длительность	-	2	2	3	1	-	-	3	2	1
17 5000 руб.	Норм. длительность	3	4	4	4	3	3	5	5	3	3
	Сокр. длительность	-	2	3	3	2	-	-	3	2	2
18 5500	Норм. длительность	4	3	3	3	5	4	3	4	5	4
	Сокр. длительность	-	2	2	2	3	-	-	3	2	3
19 4500 руб.	Норм. длительность	5	3	3	5	3	2	3	5	3	3
	Сокр. длительность	-	2	2	4	2	-	-	3	2	2
20 4750 руб.	Норм. длительность	3	5	3	2	3	5	4	2	3	2
	Сокр. длительность	-	2	2	1	2	-	-	1	2	1

Таблица 9 – Исходные данные для графика 2(рис.2).

Таблица 10 -Стоимость работ для вариантов 1-10.

Код работ	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6	3-7	4-6	5-6	6-7	7-8
Норм. стоимость	160	80	130	230	140	90	70	100	150	120
Повыш. стоимость	-	260	270	480	340	-	-	210	360	400

Таблица 11 -Стоимость работ для вариантов 11-20.

Код работ	1-2	1-3	2-4	3-5	4-6	5-6	6-7	6-8	7-9	8-9
Норм. стоимость	90	160	40	110	140	90	130	80	150	120
Повыш. стоимость	230	270	130	250	-	300	-	200	360	400

При использовании этого метода предполагают, что при уменьшении продолжительности работы возрастает ее стоимость. Этот способ нужен для сокращения критического пути или наоборот, его увеличения взамен на удешевление работы. В данном задании мы рассмотрим только уменьшение пути.

Какие-то работы, например, 1-2, ускорить невозможно. Как написано на рисунке 8 – это резервное копирование баз данных, т.е работа, зависящая полностью от производительности оборудования, а не от исполнителя. Поэтому, в исходных данных, для таких работ, даны только нормальная стоимость и продолжительность.

В исходных данных (таблицы 8 и 9) дается продолжительность работы при нормальной и повышенной стоимости. В таблицах 10 и 11 указана их стоимость. Стоимость – это то сколько потребуется в деньгах отдать исполнителю за часы его работы. То есть, если работа длится 3 часа, а ее стоимость – 150 рублей, то мы умножаем ее часы на стоимость – 450 рублей. Однако денежный ресурс, ограничен. Задача состоит в том, чтобы сократить критический путь(и) на сколько это возможно, и при этом уложится в заданную сумму.

Пример выполнения задания:

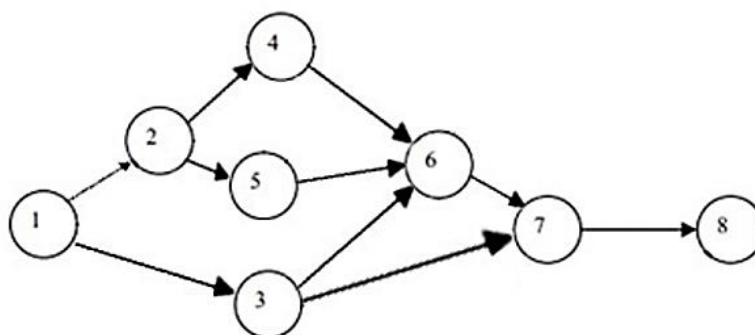


Рисунок 16. График для примера.

Код работы	Норм. длительность	Норм. стоимость	Сокр. длительность	Повыш. стоимость
1-2	3	160	-	-
1-3	4	80	3	260
2-4	2	130	1	330
2-5	3	230	2	480
3-6	5	140	3	340
3-7	4	90	-	-
4-6	3	70	-	-
5-6	4	100	3	210
6-7	3	150	2	360
7-8	5	120	2	400
Ограничение по сумме -5000 руб.				

Таблица 10. Исходные данные для примера.

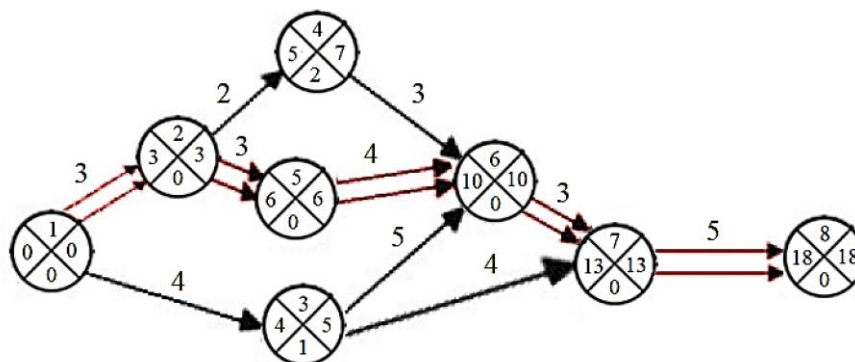


Рисунок 17. Заполненный график до оптимизации.

В сети имеется 4 пути из 1 события в последний. Посчитаем их длительность выполнения при норм. стоимости по отдельности для определения критического пути.

$L1=\{1-2\ 2-4\ 4-6\ 6-7\ 7-8\} - 3+2+3+3+5=16$ часов

$L2=\{1-2\ 2-5\ 5-6\ 6-7\ 7-8\} - 3+3+4+3+5=18$ часов

$L3=\{1-3\ 3-6\ 6-7\ 7-8\} - 4+5+3+5=17$ часов

$L4=\{1-3\ 3-7\ 7-8\} - 4+4+5=13$ часов

Отсюда можно понять, что путь L2 – критический. Логично, что в первую очередь нужно оптимизировать именно этот путь. Далее, посчитать сколько всего уходит денег на выполнение всей работы при нормальной скорости. Для этого смотрим сколько часов уходит на каждую работу, умножаем на ее стоимость и складываем.

К примеру, длительность и стоимость работы 1-2 – 3 ч. и 160 руб. соответственно. Значит, требуется 480 руб. на выполнение этой задачи. Теперь делаем то же самое со всеми остальными работами и складываем.

Складываем стоимости всех работ , а именно:

$$1-2 + 1-3 + 2-4 + 2-5 + 3-6 + 3-7 + 4-6 + 5-6 + 6-7 + 7-8$$

$480+320+160+690+700+360+210+400+450+600=4370$ **рублей**, именно столько уходит на выполнение всех работ. Из исходных данных понимаем, что у нас стоит ограничение на 5000 руб., а значит есть избыток, который можно потратить на ускорение работ.

Теперь, считаем тоже самое, но с ускоренной работой.

$$L1=\{1-2 \ 2-4 \ 4-6 \ 6-7 \ 7-8\} - 3+1+3+2+2=11 \text{ часов}$$

$$L2=\{1-2 \ 2-5 \ 5-6 \ 6-7 \ 7-8\} - 3+2+3+3+2=13 \text{ часов}$$

$$L3=\{1-3 \ 3-6 \ 6-7 \ 7-8\} - 3+2+2+2=9 \text{ часов}$$

$$L4=\{1-3 \ 3-7 \ 7-8\} - 2+4+2=8 \text{ часов}$$

Результат ускорения работ хороший, однако:

$480+780+270+960+680+360+210+420+720+400=5280$ **рублей** уходит на выполнение этих работ, что означает, то что ускорение всех работ является не рациональным и выходит за ограничение суммы. Значит, надо ускорить именно те работы, которые будут ускорять критический путь, но при этом не выходить за рамки бюджета.

На графике(рис.15), видно что все пути заканчиваются работой 7-8, а значит ускорив его, ускоряются все пути, в том числе и критический.

Так мы получим:

$$L1=13 \text{ часов}$$

$$L2=14 \text{ часов}$$

$$L3=13 \text{ часов}$$

$$L4=10 \text{ часов} \quad \text{Сумма на выполнения работы} - 4670 \text{ руб.}$$

Все еще есть резерв в 330 руб. Из результатов видно, что L2 критический, а L1 и L3 - подкритические, а значит именно их нужно оптимизировать. Все эти пути объединяет то , что они имеют работу 6-7, именно ее следует ускорить.

В итоге имеем результат:

L1=12 часов

L2=14 часов

L3=13 часов

L4=10 часов Сумма на выполнения работы – **4940 руб.**

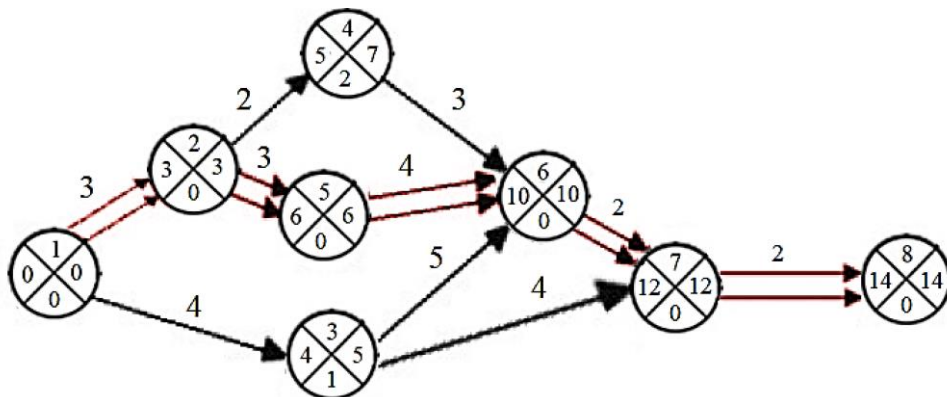


Рисунок 18. Оптимизированный и заполненный сетевой график.

Таким образом, работа оптимизирована с 18 ч. до 14 ч и сумма, ограниченная заказчиком, превышена не была.

- занести в отчет по лабораторной работе расчет оптимизации сетевого графика.
- Занести в отчет заполненный и оптимизированный сетевой график
- выводы по результатам проделанной работы и выполнения заданий
- Защитить отчет по проделанной лабораторной работе, выполнив индивидуальное задание, указанное преподавателем, в рамках проведенных исследований