

11/6/2

**Одобрено кафедрой
«Энергоснабжение
электрических железных дорог»**

**Утверждено
деканом факультета
«Транспортные средства»**

Основы теории надежности

**Рабочая программа и задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов IV курса
специальности**

**190401 (101800) ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
(ЭНС)**

Рабочая программа составлена на основании примерной учебной программы данной дисциплины в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровня подготовки инженеров по специальности 190401 (101800) (ЭНС).

Задание на контрольную работу содержит две типовые задачи и информационно-методические указания по их решению.

Постановка задачи 2 заимствована из контрольной работы, составленной ранее проф. Р. В. Шиловской.

С о с т а в и т е л ь — канд. техн. наук, доц. А.Ф. Харченко

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, проф. Р.В. Шиловская

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

*Рабочая программа
и задание на контрольную работу*

Редактор *Г.В. Тимченко*

Компьютерная верстка *Ю.А. Варламова*

Тип. зак.	Изд. зак. 173	Тираж 700 экз.
Подписано в печать 15.03.06	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,75		Формат 60x90 _{1/16}

Издательский центр РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати РГОТУПС, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2

© **Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, 2006**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Надежность в эксплуатации электрооборудования систем электроснабжения электрической тяги и нетяговых потребителей является одним из важнейших факторов устойчивой работы электрифицированных железных дорог.

Надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и монтаже и расходуется при эксплуатации. Она тесно связана с экономическими показателями, поскольку повышение надежности технических устройств требует дополнительных затрат.

Выбор оптимальной надежности базируется на теории надежности, предметом которой является разработка общих методов повышения надежности, пригодных для различных по назначению технических устройств, в том числе устройств электроснабжения.

Надежность устройств зависит от многих факторов, имеющих, как правило, случайный характер. Поэтому дисциплина «Основы теории надежности» базируется на математическом аппарате теории вероятностей и математической статистики.

Для обеспечения оптимальной надежности необходимо уметь правильно оценивать поэлементную и общую надежность устройств электроснабжения при проектировании и в процессе эксплуатации, определять остаточный ресурс оборудования и необходимую потребность в запасных частях для своевременного ремонта и технического обслуживания.

Целью изучения дисциплины считается освоение студентами математического аппарата теории надежности, а также формирование у студентов знаний и умений использовать современные методы подходов к обеспечению условий надежного функционирования устройств электроснабжения на этапах конструирования (проектирования), изготовления (сооружения), испытания, технического обслуживания и ремонта.

2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучив дисциплину, студент должен:

2.1. *Иметь представление:*

- о возникновении и путях развития теории надежности;
- об основных состояниях и видах повреждений электрооборудования электрифицированных железных дорог;
- о влиянии технического обслуживания электрооборудования на надежность электроснабжения;
- о системе стандартизации в области надежности в технике.

2.2. *Знать и уметь использовать:*

- основные проблемы обеспечения надежной работы систем электроснабжения электрической тяги и нетяговых потребителей железнодорожного транспорта;
- понятия и определения, используемые в теории надежности;
- принципы определения количественных показателей надежности технических устройств по данным наблюдений и с использованием статистических моделей;
- методы повышения надежности объектов с помощью структурного резервирования;
- методы расчета надежности технических устройств;
- государственные стандарты и нормативно-техническую документацию по надежности в технике.

2.3. *Иметь опыт:*

- определения видов отказов, возникающих в объектах, и составления структурные схемы соединения элементов в устройствах системы для анализа надежности;
- определения количественных показателей надежности устройств по статистическим данным об отказах, проведения анализов результатов;
- выявления в системе наименее надежных элементов и разработки рекомендации по повышению надежности объекта, учитывания режима работы устройств и его влияния на аппаратную, и структурную надежность;
- выполнения расчетов, связанных с определением оптимальной потребности запасных частей на планируемый период для отдельных элементов систем электроснабжения;

использования государственных стандартов и нормативно-технической документаций по надежности в технике.

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Вид учебной работы	Всего часов	Курс — 4
Общая трудоемкость дисциплины	120	
Аудиторные занятия:	16	
лекции	8	
практические занятия	8	
Самостоятельная работа	89	
Контрольная работа	15	Одна
Вид итогового контроля		Экзамен

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции, ч	Практические занятия, ч
1	1, 2, 3	4	
2	4, 5, 6	4	
3	3		4
4	4, 6		4

4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Введение

Цель преподавания дисциплины. Народно-хозяйственное значение проблем надежности электроснабжения. Факторы, влияющие на надежность электроснабжения электрифицированных железных дорог. Общие пути повышения надежности обеспечения энергией электрического подвижного состава и нетяговых потребителей.

Необходимость количественной оценки надежности. Возникновение и развитие теории надежности. Связь между ко-

личественными оценками надежности и количественными оценками эффективности электроснабжения.

[3; 4; 6—10; 15].

Раздел 2. Основные понятия теории надежности

Термины и определения в соответствии с ГОСТ 27.002-89.

Общие понятия теории надежности: надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Понятия: система, элемент и объект.

Понятия: работоспособное состояние объекта, восстанавливаемые объекты, невосстанавливаемые объекты, ремонтируемые объекты, неремонтируемые объекты.

Примеры невосстанавливаемых и ремонтируемых устройств систем электроснабжения.

Определение понятия отказ и виды отказов: ресурсный отказ, независимый отказ, зависимый отказ, внезапный отказ, постепенный отказ.

Причины возникновения отказов устройств тяговых подстанций, контактной сети и линий электропередач.

Понятие наработка: наработка объекта до отказа и наработка объекта на отказ.

[2; 3; 4; 6].

Раздел 3

3.1. Количественные показатели надежности невосстанавливаемых объектов

Общие количественные показатели. Определение и математическая запись основных показателей надежности: функция надежности, функция ненадежности, плотность распределения наработки до отказа, средняя наработка до отказа.

Общие свойства функции надежности.

Статистическое определение основных показателей надежности. Построение гистограмм отказов и надежности объектов.

Зависимость частоты и интенсивности отказов устройств электроснабжения от времени и режима работы. Использование этих зависимостей для прогнозирования работы систем электроснабжения.

Связь между интенсивностью отказов и вероятностью безотказной работы.

Условия применения экспоненциального, нормального и Вейбулла законов распределения случайной величины при расчетах показателей надежности и соотношения показателей надежности при использовании этих законов распределения.

Преимущества применения экспоненциального закона при оценке надежности технических устройств.

Определение показателей надежности объектов, состоящих из нескольких элементов, отказы в которых описываются одинаковыми или различными законами распределения.

Расчет показателей надежности невосстанавливаемых объектов по данным статистики об отказах.

Приближенные формулы вычисления количественных характеристик надежности невосстанавливаемых объектов.

[1; 3; 4; 5—7; 12—15].

3.2. Количественные показатели надежности восстанавливаемых объектов

Модель работы восстанавливаемых объектов. Простейший поток отказов и его свойства.

Параметр потока отказов и его свойства. Нарботка на отказ. Ремонтпригодность и среднее время восстановления. Особенности процессов восстановления работоспособного состояния устройств систем электроснабжения: контактной сети, тяговых подстанций, высоковольтных линий.

Показатели надежности для простейшего потока отказов с нулевым временем восстановления.

Комплексные показатели надежности. Определение численных комплексных показателей надежности: коэффициента готовности, коэффициента простоя, коэффициента оперативной готовности, коэффициента технического использования. Расчет комплексных показателей надежности по данным статистики об отказах.

Влияние системы обслуживания устройств на величину коэффициента готовности.

Показатели, характеризующие долговечность устройств электроснабжения: средний полный ресурс, средний полный

срок службы. Средние сроки службы: устройств контактной сети, тяговых трансформаторов, выключателей и выпрямителей тяговых подстанций.

[1; 3; 4; 5—7; 9; 12—15].

Раздел 4. Резервирование как способ повышения надежности устройств системы электроснабжения

Понятие структурной надежности технических устройств. Виды резервирования: активное, пассивное. Способы резервирования: общее, раздельное, скользящее (замещением).

Влияние кратности резерва на надежность технических устройств. Резервирование с целой и дробной кратностью. Резервирование с замещением при «холодном», «теплом» и «горячем» состоянии резерва.

Расчет надежности систем электроснабжения при различных видах и способах резервирования. Сравнение надежности однотипных устройств при общем и раздельном способах резервирования.

Резервирование объектов, имеющих два характера отказа: обрыв и замыкание.

[3; 4; 6; 7; 14—15].

Раздел 5. Способы получения данных об отказах

Статистика отказов как исходная информация для определения показателей надежности. Пути получения статистики отказов — испытания на надежность и сбор информации об отказах в условиях эксплуатации.

Виды испытаний, применяемые для устройств системы электроснабжения.

Планы испытаний согласно ГОСТ 27.410-87. Значения относительной ошибки и доверительной вероятности для контроля показателей надежности для составных частей изделия, влияющих на безопасность и риска потребителя.

Методы случайного отбора изделий для контроля качества. Принципы проведения ускоренных испытаний на надежность.

Определение законов распределения и оценка параметров распределения наработки до отказа по экспериментальным

данным. Точечные и интервальные оценки. Способы нахождения границ доверительных интервалов. Графический способ подбора закона распределения для оценки надежности объекта. Критерии согласия Пирсона и Колмогорова.

Применение закона распределения Пуассона для расчета надежности при малом числе данных по отказам.

Причины возникновения постепенных и внезапных отказов в элементах устройств контактной сети, тяговых трансформаторов, выключателях и выпрямителях тяговых подстанций.

[1; 3; 4; 9; 11—13; 16].

Раздел 6. Обеспечение запасными частями

Виды комплектов запасных частей. Влияние наличия запасных частей на надежность систем электрооборудования. Расчет оптимальной потребности запасных элементов на планируемый период эксплуатации систем электроснабжения.

[3; 4; 5; 6].

4.3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Не предусмотрено.

4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий
1	3	Определение показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов по данным статистики об отказах. Расчет показателей надежности сложных устройств системы электроснабжения
2	4,6	Расчет показателей надежности при различных видах резервирования и с учетом различных видов отказов элементов (обрыв и короткое замыкание). Определение оптимальной потребности запасных частей для отдельных элементов систем электроснабжения на плановый период.

5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Контрольная работа состоит из двух задач. Задача № 1 предусматривает расчет показателей надежности электротехнической установки; задача № 2 — предусматривает расчет характеристик надежности участка электрической сети.

Объем графической части — два рисунка и один график.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ:

6.1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1999.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Издательство стандартов, 1990.
3. Ефимов А. В., Галкин А. Т. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. Учебник для вузов ж/д транспорта. — М.: УМК МПС России, 2000.
4. Харченко А. Ф. Основы теории надежности устройств электроснабжения. Уч. пос. — М.: РГОТУПС, 2006.

Дополнительная

5. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. — М.: Советское радио, 1968.
6. Половко А. М. Основы теории надежности. — М.: Наука, 1964.
7. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1985.
10. Фокин Ю. А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. — М.: Высшая школа, 1989.

11. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. — М.: Стандарты, 1987.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1970.

13. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. — М.: Издательство стандартов, 1986.

14. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах: Уч. пос. /Под ред. Г. В. Дружинина. — М.: Энергия, 1976.

15. Китущин В. Г. Надежность энергетических систем: Уч. пос. — М.: Высшая школа, 1984.

16. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — М.: Стандарты, 1989.

7. КРАТКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Перед выполнением контрольной работы необходимо изучить теоретический материал по рекомендованной в рабочей программе литературе.

Затем рассмотреть задание на контрольную работу и изучить методические указания к выполнению задач.

Номер варианта и соответствующие исходные данные для расчета выбираются по двум последним цифрам учебного шифра студента и приводятся в условиях на каждую задачу.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие правила:

- графический материал следует выполнять на миллиметровой бумаге в формате А4 (210×297). В прямоугольной системе координат независимую переменную (аргумент) следует откладывать по горизонтальной оси, а функцию этого аргумента — по вертикальной оси. Для повышения наглядности график вероятности безотказной работы следует строить от значения 0,75 до 1,0. Графики должны иметь наименование;

- при выполнении расчетов необходимо вначале привести расчетную формулу, сделать подстановку численных значений величин, входящих в формулу и затем записать результат с указанием размерности.

Результаты расчета достаточно приводить с тремя-четырьмя значащими цифрами, но вероятность безотказной работы до единицы не округлять.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Задача 1. Расчет показателей надежности электротехнической установки

Условие задачи и исходные данные. Имеется установка «А», состоящая из четырех последовательно соединенных узлов. Схема расчета надежности установки изображена на рис. 1.

Все элементы установки равнонадежны и для них справедлив экспоненциальный закон распределения наработки до отказа. Интенсивность отказов элементов приведена в табл. 1. В узле «г» число элементов, необходимых для нормальной работы равно 2.

Требуется:

1. Вычислить и построить график изменения функции надежности узлов установки «А» в течение 10000 ч с интервалом 2000 ч.

2. По результатам расчета вероятности безотказной работы узлов «а», «б» и «в» сделать вывод об эффективности различных способов резервирования.

3. Вычислить и построить график изменения функции надежности установки «А» в течение 10000 ч с интервалом 2000 ч.

4. Определить вероятность безотказной работы для системы из двух параллельно включенных установок «А» и «Б» по истечению года эксплуатации, если вероятность безотказной работы установки «Б» за год эксплуатации указана в табл. 2.

5. Определить годовую потребность запасных элементов для общего количества установок «С» согласно табл. 1 при заданной вероятности обеспечения запасными частями $P_z = 0,95$ и согласно табл. 2.

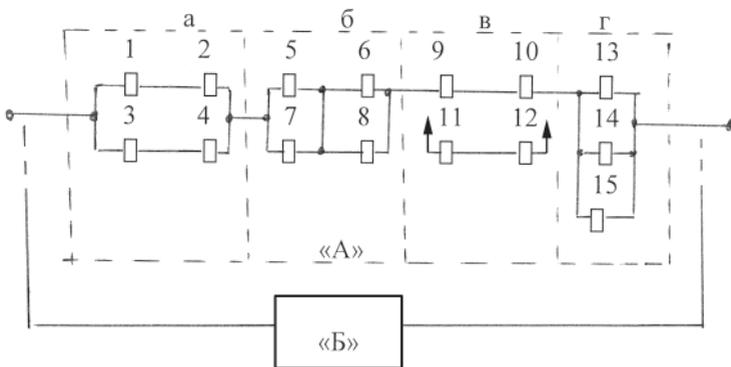


Рис. 1. Схема расчета надежности

Таблица 1

Исходные данные

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Интенсивность отказов λ_0 , $(1/\text{ч}) \cdot 10^{-6}$	15	14	18	13	17	12	10	11	14	16
Общее количество установок С, шт.	8	12	6	15	7	10	21	3	9	5

Примечание. Например, при цифре 1 интенсивность отказов элемента $= 15 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$

Таблица 2

Показатели	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Вероятность безотказной работы установки «Б»	0,91	0,90	0,92	0,93	0,91	0,92	0,90	0,91	0,94	0,93
Заданная вероятность обеспечения запасными элементами P_z	0,99	0,98	0,90	0,92	0,96	0,94	0,996	0,93	0,97	0,999

Задача 2. Расчет характеристик надежности участка электрической сети

Условие задачи и исходные данные. Функциональная схема участка электрической сети для каждого варианта представлена на рис. 2. Исходные данные принимаются по табл. 3, 4, 5. При расчетах учесть, что все выключатели имеют два вида отказов: «короткое замыкание» и «обрыв», интенсивность которых равна $\lambda_{кз} = \lambda_{об} = 0,5\lambda_B$. Отказ выключателя типа «короткое замыкание» приводит к короткому замыканию на сборных шинах, т.е. к нарушению электроснабжения.

Требуется:

1. Рассчитать вероятность безотказного электроснабжения потребителя «П» в течение календарного года и среднюю наработку до отказа сети для нормального режима работы сети и при выводе в ремонт резервированной части сети. Результаты средней наработки указать в часах.

2. Для ремонтного режима сети рассчитать вероятное время аварийного простоя в течение календарного года эксплуатации сети и указать его в часах.

3. Определить коэффициент готовности участка сети в режиме ремонта.

Таблица 3

Исходные данные

Варианты (последняя цифра учебного шифра)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номер варианта схемы	0	9	8	7	6	5	4	3	2	1

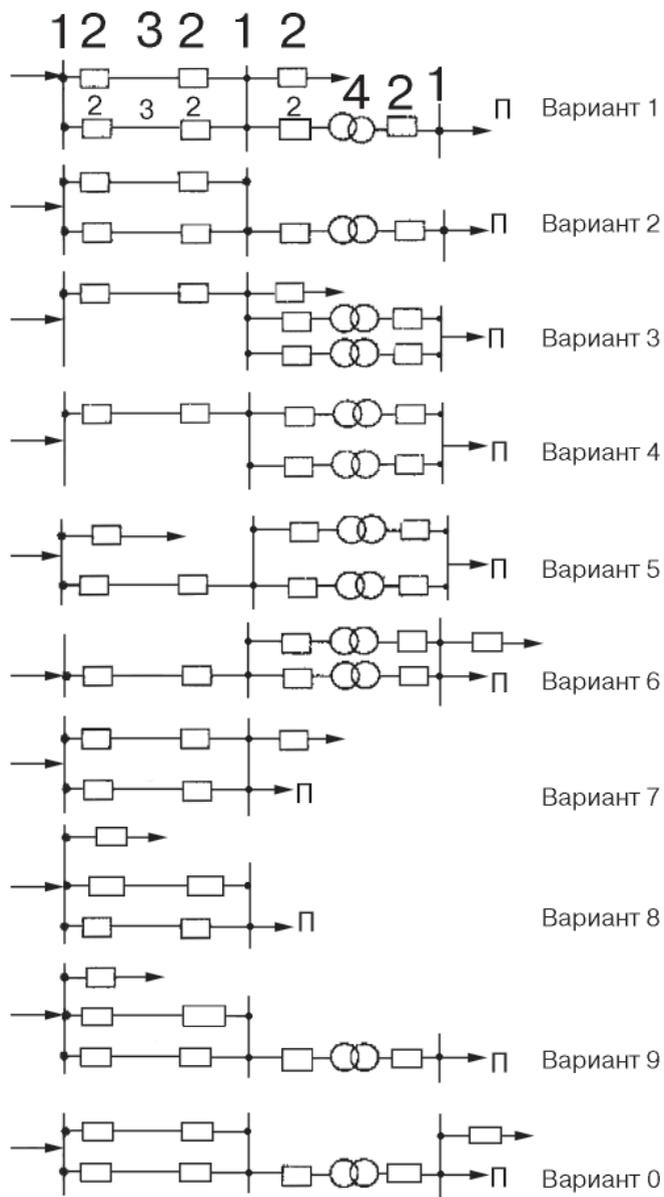


Рис. 2. Функциональная схема участка электрической сети: 1 — сборные шины; 2 — выключатель; 3 — высоковольтная линия; 4 — трансформатор.

Таблица 4

Интенсивность отказа элемента сети λ	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Линии $\lambda_{л}$, 1/год	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Трансформатора $\lambda_{т}$, 1/год	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Выключателя $\lambda_{в}$, 1/год	0,15	0,10	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20
Сборных шин $\lambda_{ш}$, 1/год	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02

Таблица 5

Среднее время аварийного простоя сети t_k в долях года	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Линии $t_{кл}$, (год)· 10^{-3}	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0
Трансформатора $t_{кт}$, (год)· 10^{-3}	50	45	45	40	40	35	35	30	30	25
Выключателя $t_{кв}$, (год)· 10^{-3}	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Сборных шин $t_{кш}$, (год)· 10^{-3}	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20

Примечание. Например, при цифре шифра 1 для линии $t_{кл} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ (года).

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧИ 1

Краткие теоретические сведения

Надежностью называется свойство объекта (установки, узла, элемента) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, хранения и транспортирования.

Для выполнения своих функций объект должен находиться в работоспособном состоянии. *Работоспособное состояние* —

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

В теории надежности объекты подразделяются на невосстанавливаемые объекты, для которых в НТД не предусмотрено проведения восстановления работоспособного состояния после первого отказа и восстанавливаемые объекты, для которых в НТД предусмотрено проведение восстановления работоспособного состояния (допускается ремонт, регулировка и т. д.).

При расчете надежности функционирования невосстанавливаемых объектов интересуются продолжительностью работы до первого отказа — *наработкой до отказа*. *Отказ* — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния. В теории надежности возникновение отказов рассматривается как случайная величина.

Интенсивность процессов возникновения отказов во времени принято обозначать $\lambda(t)$. Вероятность безотказной работы или функция надежности $P(t)$ выражает вероятность того, то невосстанавливаемый объект не откажет к моменту времени наработки t .

Интенсивность отказов объекта однозначно определяет вероятность безотказной работы в соответствии с основной формулой надежности

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (1.1)$$

Если интенсивность отказов в рассматриваемый период времени величина постоянная, $\lambda(t) = \text{const}$, то вероятность безотказной работы в течение времени t определяется по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (1.2)$$

Таким образом, при $\lambda(t) = \text{const}$ функция распределения времени безотказной работы объекта становится экспоненциальной функцией, а среднее время безотказной работы объекта

или средняя наработка до отказа (математическое ожидание наработки до отказа) равно

$$m = t_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} [\exp(-\lambda t)] dt = 1/\lambda. \quad (1.3)$$

Для сложного объекта состоящего по признаку надежности из n , последовательно соединенных отдельных объектов (элементов), отказы которых независимы, с показателями безотказности $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, ... $P_n(t)$, вероятность безотказной работы подчиняется закону умножения надежностей

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (1.4)$$

При экспоненциальном законе распределения и $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$,

$$P_c(t) = \exp(-n\lambda t). \quad (1.5)$$

Как следует из выражений (1.4) и (1.5) вероятность безотказной работы сложного объекта с последовательным соединением отдельных объектов (элементов) уменьшается с увеличением числа элементов.

Чтобы повысить надежность сложного объекта применяется резервирование. *Резервирование* — это способ обеспечения надежности за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Основным параметром резервирования является его кратность. Под кратностью резервирования понимается отношение числа резервных элементов к числу резервируемых (основных) ими элементов, выраженное несокращенной дробью.

Основные элементы — это элементы объекта, необходимые для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Резервированием с целой кратностью называется такое резервирование, при котором для нормальной работы резервированного соединения достаточно, чтобы исправным был хотя бы один элемент расчета.

При резервировании с дробной кратностью нормальная работа резервированного соединения возможна при условии, если число исправных элементов не меньше необходимого для нормальной работы.

Структурное резервирование осуществляется путем применения различных резервных схем:

— *общее резервирование* — резервирование, при котором резервируется объект в целом;

— *раздельное резервирование* — резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы;

— *резервирование замещением* — резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

При экспоненциальном распределении наработки до отказа вероятность безотказной работы резервируемого объекта вычисляется по следующим формулам:

• при общем резервировании с постоянным включением резерва и с целой кратностью

$$P_c(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda_i t)]^{m+1}, \quad (1.6)$$

где $\lambda_i = \sum_{i=1}^n \lambda_0$ — интенсивность отказов всех элементов основной или резервной цепи;

λ_0 — интенсивность отказов одного элемента.

m — число резервных цепей (кратность резервирования);

n — число элементов основной или резервной цепи;

• при раздельном резервировании с постоянным включением резерва и с целой кратностью

$$P_c(t) = \{1 - [1 - \exp(-\lambda_0 t)]^{m+1}\}^n, \quad (1.7)$$

где n — число последовательно соединенных групп элементов;

• при общем резервировании замещением с целой кратностью и ненагруженном состоянии резерва

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_i t) \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_i t)^i}{i!}, \quad (1.8)$$

- при резервировании с дробной кратностью и постоянно включенным резервом

$$P_c(t) = \sum_{i=0}^{n-k} C_n^i \exp[-\lambda t(n-i)] [1 - \exp(-\lambda t)]^i. \quad (1.9)$$

где n — число элементов;

λ — интенсивность отказа одной цепи, т. е. λ_0 ;

k — число элементов, необходимых для нормальной работы объекта;

$C_n^i = n! / i! (n-i)!$ — сочетание из n элементов по i .

В процессе эксплуатации любой элемент сложного объекта может выйти из строя. Для его замены необходимо иметь определенное количество запасных элементов.

Потребность в запасных частях определяется средним расходом элементов за определенный промежуток времени и заданной вероятностью P_z обеспечения запасными элементами, т. е. с какой вероятностью не будет простоев вследствие отсутствия запасных элементов для замены вышедших из строя.

При экспоненциальном распределении наработки до отказа среднее число отказавших элементов z_{cp} за период t определяется по формуле

$$z_{cp} = N\lambda_0 t, \quad (1.10)$$

где N — число элементов, находящихся в эксплуатации;

λ_0 — интенсивность отказов одного элемента, $1/ч$;

t — период работы, ч.

Чем выше заданное значение вероятности P_z , тем большим должен быть запас элементов. В инженерных расчетах норм запасных частей применяются упрощенные методы.

При $P_z = 0,95$ число запасных элементов z можно вычислить по приближенным формулам

$$z = 5 + 1,12 z_{cp} \text{ при } 20 < z_{cp} \leq 60.. 70; \quad (1.11)$$

$$z = 10 + 1,06 z_{cp} \text{ при } z_{cp} > 60.. 70. \quad (1.12)$$

При вычислении числа запасных элементов для других значений P_z можно пользоваться данными зависимости, приведенной в табл. 6

$$z = p z_{cp}, \quad (1.13)$$

где p — коэффициент, определяемый в зависимости от заданного значения вероятности P_z и среднего значения числа отказавших элементов z_{cp} за период t .

Таблица 6

Значения $p = z/z_{cp}$

P_z	z_{cp}							
	25	50	75	100	150	200	300	400
0,900	1,24	1,18	1,15	1,12	1,10	1,09	1,07	1,06
0,920	1,27	1,20	1,16	1,14	1,11	1,10	1,08	1,07
0,940	1,30	1,22	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,08
0,960	1,35	1,25	1,20	1,17	1,14	1,12	1,10	1,09
0,980	1,41	1,30	1,24	1,21	1,17	1,15	1,12	1,10
0,990	1,47	1,34	1,27	1,23	1,19	1,17	1,13	1,12
0,996	1,55	1,38	1,31	1,27	1,22	1,19	1,15	1,13
0,999	1,66	1,46	1,37	1,32	1,26	1,22	1,18	1,15

Порядок выполнения и оформления задачи

1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему расчета надежности установки.

2. Провести расчет вероятности безотказной работы узлов установки.

В каждом узле применено резервирование.

В узле «а» применено общее резервирование с постоянным включением резерва и с целой кратностью. Вероятность безотказной работы в этом случае вычисляется по формуле (1.6).

В узле «б» применено раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и с целой кратностью. Вероятность безотказной работы в этом случае вычисляется по формуле (1.7).

В узле «в» применено общее резервирование замещением с целой кратностью и ненагруженным состоянием резерва. Вероятность безотказной работы в этом случае вычисляется по формуле (1.8).

В узле «г» применено общее резервирование с дробной кратностью и постоянно включенным резервом. Число элементов, необходимых для нормальной работы в этом узле равно $k=2$. Вероятность безотказной работы в этом случае вычисляется по формуле (1.9).

3. По результатам расчета вероятности безотказной работы узлов «а», «б» и «в» построить график изменения функции надежности узлов установки «А» в течение 10000 ч с интервалом 2000 ч и сделать вывод об эффективности различных видов резервирования.

4. Вычислить и построить график изменения функции надежности установки «А» в течение 10000 ч с интервалом 2000 ч.

Вероятность безотказной работы установки «А» равна произведению вероятностей безотказной работы всех узлов, т.е. она вычисляется по формуле (1.4) или $P_A(t) = P_a(t) P_b(t) P_r(t)$.

5. Вычислить вероятность безотказной работы для системы из двух параллельно включенных установок «А» и «Б» по истечению года эксплуатации. Вероятность безотказной работы для системы из двух параллельно включенных установок «А» и «Б» вычисляется по основной формуле для общего резервирования с постоянно включенным резервом и с целой кратностью для неравнонадежных установок

$$P_{AB}(t) = 1 - \prod_{i=0}^m [1 - P_i(t)] = 1 - [1 - P_A(t)][1 - P_B(t)]. \quad (1.14)$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы одной из установок;
 m — кратность резервирования.

6. Вычислить годовую потребность запасных элементов.

В соответствии с условиями задачи количество элементов всех установок, находящихся в эксплуатации в течение года, равно

$$N = c \cdot C, \quad (1.15)$$

где c — количество элементов одной установки;

C — общее количество установок, находящихся в эксплуатации.

При вычислении числа запасных элементов для $P_z=0,95$ можно пользоваться формулами (1.11), (1.12) или (1.13).

При вычислении числа запасных элементов для других значений P_z можно пользоваться формулой (1.13) и данными, приведенными в табл. 6.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИ ЗАДАЧИ 2

Для расчета представлена функциональная схема участка электрической сети. В учебных целях в схеме не отражены многие элементы, входящие в реальную схему электрической сети, такие как разъединители, замыкатели, трансформаторы тока и напряжения, разрядники и т. д.

Электроснабжение потребителя осуществляется по цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов. Часть цепи имеет параллельное включение элементов (резервирование).

Расчетная схема надежности также будет иметь последовательное и параллельное соединение элементов, но, учитывая условия задачи об особенностях отказов выключателей, она не будет совпадать с функциональной схемой.

Для выполнения задания сначала необходимо составить общую расчетную схему надежности электроснабжения потребителя. Затем упростить ее, для чего объединить в один элемент все последовательно соединенные элементы и вычислить вероятность безотказной работы объединенных элементов (узлов). В результате получим схему, состоящую из трех узлов, два из которых соединены параллельно. Снова упростить схему расчета, объединив параллельные узлы и приведя схему расчета до двух последовательно соединенных узлов. Вычислить вероятность безотказной работы двух последовательно соединенных узлов, т. е. вычислить надежность электроснабжения потребителя.

Для примера на рис. 3 показана функциональная схема электрической цепи в нормальном режиме (рис. 3, а), расчетная схема надежности этой схемы (рис. 3, б) и поэтапное упрощение расчетной схемы (рис. 3, в). В расчетной схеме отказ выключа-

теля, приводящего к короткому замыканию на сборных шинах, обозначен одной звездочкой *, а отказ выключателя, приводящего к обрыву цепи, обозначен двумя звездочками **.

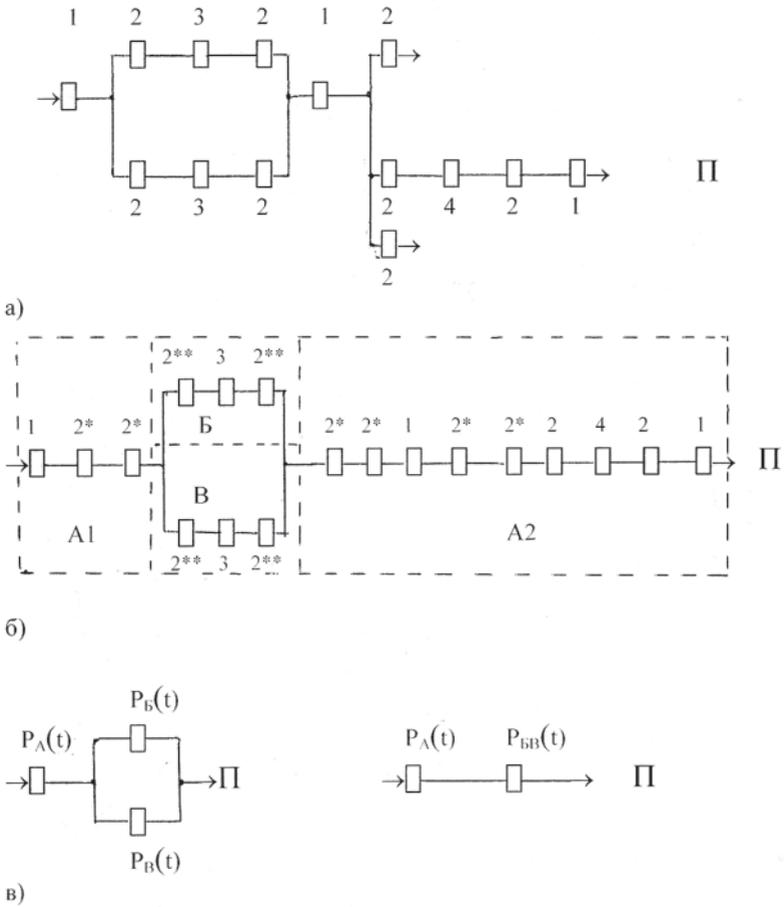


Рис. 3. Функциональная и расчетные схемы надежности сети

Сеть работоспособна, если все ее последовательно соединенные элементы расчетной схемы работоспособны. Согласно теореме об умножении вероятностей, вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов, равна произведению вероятностей работы ее элементов.

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (2.1)$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента, а всего n элементов.

В задаче указано, что для элементов справедлив экспоненциальный закон распределения, поэтому вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов $A=A_1+A_2, B, B$ вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} P_A(t) &= \exp(-\lambda_A t); \\ P_B(t) &= \exp(-\lambda_B t); \\ P_B(t) &= \exp(-\lambda_B t); \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_B$ — суммы интенсивностей отказов последовательно включенных элементов, входящих, соответственно, в узлы A, B, B .

Еще раз обратим внимание на несовпадении функциональной схемы сети и расчетной схемы надежности сети. В расчетной схеме все последовательно соединенные элементы, находящиеся с обеих сторон от резервированной части схемы, объединяются в один узел A , что, конечно, недопустимо в функциональной схеме.

Соединение узлов B и B (см. рис. 3, б, в) представляет собой общее резервирование с постоянным включение резерва и с целой кратность, поэтому общую их вероятность безотказной работы можно вычислить по формуле (1.6). Но если известны $P_B(t), P_B(t)$, то проще произвести вычисления используя вероятности отказов узлов B и B .

Вероятность отказа узла B равна: $Q_B(t) = 1 - P_B(t)$;

Вероятность отказа узла B равна: $Q_B(t) = 1 - P_B(t)$.

Для параллельного соединения узлов B и B вероятность отказа равна произведению вероятностей их отказов

$$Q_{BB}(t) = [1 - P_B(t)][1 - P_B(t)], \quad (2.3)$$

а вероятность безотказной работы параллельно соединенных узлов Б и В равна:

$$P_{\text{БВ}}(t) = 1 - Q_{\text{БВ}}(t) = 1 - [1 - P_{\text{Б}}(t)][1 - P_{\text{В}}(t)]. \quad (2.4)$$

Вероятность безотказной работы сети после проведенных упрощений равна произведению вероятностей безотказной работы последовательно соединенных узлов А и БВ

$$P(t) = P_{\text{А}}(t)P_{\text{БВ}}(t) = P_{\text{А}}(t) \{1 - [1 - P_{\text{Б}}(t)][1 - P_{\text{В}}(t)]\}. \quad (2.5)$$

В общем виде вероятность безотказной работы сети равна:

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp(-\lambda_{\text{А}}t) \{1 - [1 - \exp(-\lambda_{\text{Б}}t)][1 - \exp(-\lambda_{\text{В}}t)]\} = \\ &= \exp[-(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}})t] + \exp[-(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{В}})t] - \exp[-(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}} + \lambda_{\text{В}})t]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \{ \exp[-(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}})t] + \exp[-(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{В}})t] - \exp[- \\ &- (\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}} + \lambda_{\text{В}})t] \} dt = 1/(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}}) + 1/(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{В}}) - 1/(\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}} + \lambda_{\text{В}}). \end{aligned} \quad (2.7)$$

В случае ремонта резервированного участка сети расчетная схема упрощается, так как в ней будут присутствовать только последовательно соединенные элементы, т. е. фактически один узел. Заметим, что в этом случае любой отказ выключателя «короткое замыкание» или «обрыв» приводит к прекращению электроснабжения потребителя.

Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов при выводе в ремонт резервированной части сети

$$P_{\text{р}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{р}}t), \quad (2.8)$$

где $\lambda_{\text{р}}$ — суммы интенсивностей отказов последовательно включенных элементов, оставшихся в работе при выводе в ремонт резервированной части сети.

Средняя наработка до отказа в этом случае вычисляется по формуле

$$T_{\text{р}} = 1/\lambda_{\text{р}}. \quad (2.9)$$

В задании предусмотрено определение вероятного времени аварийного простоя сети.

Для каждого элемента сети вероятное время нахождения его в аварийном простояе в течение времени t определяется формулой

$$V_{\text{авар. к}} = t_k [1 - \exp(-\lambda_k t)]. \quad (2.10)$$

Например, для одной линии

$$V_{\text{авар. кл}} = t_{\text{кл}} [1 - \exp(-\lambda_{\text{д}} t)].$$

Время простоя каждого элемента задано как относительное, т. е. отнесенное к году, что упрощает вычисления.

Вероятное время аварийного простоя последовательной цепи из n элементов вычисляется по формуле

$$V_{\text{авар}} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - V_{\text{авар. к}}). \quad (2.11)$$

Если принять, что время аварийного простоя сети соответствует среднему времени восстановления, т. е. $V_{\text{авар}} = T_{\text{в}}$, а среднее время наработки на отказ равно, вычисленному нами средней наработке до отказа T , то коэффициент готовности $K_{\text{р}}$, т. е. вероятность того, что участок сети окажется работоспособным в любой момент времени, вычисляется по формуле

$$K_{\text{р}} = T / (T + T_{\text{в}}). \quad (2.12)$$

Порядок выполнения и оформления задачи

1. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи и исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему выбранного варианта электрической сети в нормальном режиме работы.

2. Составить и нарисовать расчетную схему надежности электроснабжения потребителя по примеру рис. 3, б.

3. Вычислить вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов А, Б, В по формуле (2.2).

4. Вычислить вероятность безотказного электроснабжения по формулам (2.3—2.5) или (2.6).

5. Вычислить среднюю наработку до отказа сети в нормальном режиме по формуле (2.7).

6. Составить и нарисовать схему расчета надежности сети в ремонтном режиме.
7. Вычислить вероятность безотказного электроснабжения в ремонтном режиме по формуле (2.8).
8. Вычислить среднюю наработку до отказа сети в ремонтном режиме по формуле (2.9).
9. Рассчитать вероятное время аварийного простоя сети в ремонтном режиме по формулам (2.10) и (2.11).
10. Рассчитать коэффициент готовности электрической сети в режиме ремонта по формуле (2.12).

Вопросы для самоподготовки к защите контрольной работы

1. Дайте определение термина «надежность» в технике.
2. Дайте определение термина «работоспособное состояние».
3. Дайте определение термину «отказ».
4. Чем отличаются восстанавливаемые объекты от невосстанавливаемых?
5. Как связаны между собой показатели надежности «интенсивность отказов» и «вероятность безотказной работы» объекта?
6. Какую размерность имеют показатели надежности «интенсивность отказов» и «средняя наработка до отказа»?
7. Назовите основной параметр резервирования.
8. Назовите основные способы резервирования.
9. В чем особенность отказов электрооборудования?
10. Какие показатели надежности используются при определении потребности в запасных частях?

Рекомендуемая литература

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1999.
2. Ефимов А.В., Галкин А.Т. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. Учеб. для вузов ж/д транспорта. — М. : УМК МПС России, 2000.
3. Харченко А.Ф. Основы теории надежности устройств электроснабжения. Уч. пос. —М.: РГОТУПС, 2006.
4. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. Уч. пос. /Под ред. Г.В.Дружинина. —М.: Энергия, 1976.