

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по дисциплине
«Надежность электроснабжения»
для студентов специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника» Направленность (профиль): "Электроснабжение"

Ставрополь-2026

Данные методические указания составлены с учетом основных квалификационных требований, обязательных знаний и навыков, необходимых для подготовки бакалавра по направлению «Электроэнергетика». Методические указания предназначены для выполнения практических занятий студентами очной формы обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Материал посвящен основным расчетным моделям оценки надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых технических объектов.

Поскольку базой основных понятий и моделей надежности являются модели теории вероятностей, недостаточно или не всегда изучаемые студентами, методические указания содержат необходимые сведения из теории вероятностей.

Содержание:

1. Практическое занятие № 1. Статистическая оценка показателей надежности неремонтируемых объектов (2 часа)	5
2. Практическое занятие № 2. Расчет надежности с использованием метода пространства состояний (2 часа).....	7
3. Практическое занятие № 3. Использование формулы полной вероятности при оценке надежности (1 час).....	10
4. Практическое занятие № 4. Использование формулы Байеса при оценке надежности (1 час).....	11
5. Практическое занятие № 5. Расчет надежности систем с последовательным соединением элементов (1 час)	13
6. Практическое занятие № 6. Расчет надежности систем с параллельным соединением элементов (1 час).....	14
7. Практическое занятие № 7. Расчет надежности систем со смешанным соединением элементов (2 часа).....	15
8. Практическое занятие № 8. Расчет надежности системы по данным об отказах элементов (2 часа)	16
9. Практическое занятие № 9. Расчет надежности системы при общем резервировании (1 час).....	18
10. Практическое занятие № 10. Расчет надежности системы при раздельном резервировании (1 час)	19
11. Практическое занятие № 11. Определение оптимального количества резервных элементов в системах с многократным резервированием (1 час)	20
12. Практическое занятие № 12. Расчет надежности системы при ненагруженном резерве (2 часа).....	22
13. Практическое занятие № 13. Определение закона распределения случайной величины наработки на отказ (2 часа).....	23

14. Практическое занятие № 14. Использование критериев согласия для оценки гипотезы о законе распределения случайной наработки на отказ (2 часа)	25
15. Практическое занятие № 15. Расчет надежности системы с учетом преднамеренных отключений без учета взаимного влияния элементов (1 час)	26
16. Практическое занятие № 16. Расчет надежности системы с учетом преднамеренных отключений с учетом взаимного влияния элементов (1 час)	28
17. Практическое занятие № 17. Оценка вероятности состояний систем массового обслуживания с отказами (1 час).....	29
18. Практическое занятие № 18. Оценка вероятности состояний систем массового обслуживания с ожиданием (1 час)	31
Приложение А.....	33
Приложение Б	34
Приложение В.....	34
Приложение Г	35
Приложение Д.....	35
Приложение Е	36
Приложение Ж.....	37
Приложение З.....	38
Приложение И.....	40
Приложение К.....	40
Приложение Л.....	41
Приложение М.....	41
Приложение Н.....	42
Приложение О.....	42
Приложение П.....	43

1. Практическое занятие № 1. Статистическая оценка показателей надежности неремонтируемых объектов (2 часа)

1.1 Основные теоретические сведения

Показателями безотказности неремонтируемых объектов являются: вероятность безотказной работы $P(t)$, средняя наработка до первого отказа T_1 , интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени объект находился в работоспособном состоянии. Обозначим через t заданное время наработки объекта. Возникновение отказа – случайное событие, а наработка τ от начального момента до возникновения отказа – случайная величина. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале времени от 0 до t включительно определяется как

$$P(t) = P(t > \tau). \quad (1.1)$$

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$P^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (1.2)$$

где N – число объектов, работоспособных в начальный момент времени, $n(t)$ – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Вероятность отказа. На отрезке времени от 0 до t вероятность отказа определяется по формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.3)$$

Средней наработкой до отказа называется математическое ожидание наработки объекта до первого отказа T_1 . Через вероятность безотказной работы наработка до отказа вычисляется следующим образом

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.4)$$

Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяют по формуле:

$$T_1^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j, \quad (1.5)$$

где N – число работоспособных объектов при $t = 0$,

τ_j – наработка до первого отказа каждого из объектов.

Для определения T_1 необходимо знать время безотказной работы всех испытуемых изделий.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, которая определяется как отношение числа отказов изделия в единицу времени к среднему числу изделий исправно работающих в данный отрезок времени

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (1.6)$$

где $N_{cp} = 0,5(N_i + N_{i+1})$ – среднее число изделий, исправно работающих в интервале Δt ,

N_i, N_{i+1} – соответственно число изделий, исправно работающих в начале и в конце интервала Δt .

1.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1. В эксплуатации находилось N однотипных элементов. За время t_1 отказало n элементов. За последующее время Δt отказало еще Δn элементов. Определить $P^*(t_1)$, $P^*(t_1 + \Delta t)$ и $\lambda^*(t_1 + \Delta t)$.

Исходные данные – N , t_1 , n , Δt , Δn взять из таблиц А.1 и А.2 (приложение А).

Задача 1.2. Проведены ускоренные испытания N предохранителей, число отказов Δn_i фиксировалось через каждые $\Delta t = 100$ часов. Данные об отказах представлены в виде таблицы:

Δt_i , ч	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500
Δn_i	Δn_1	Δn_2	Δn_3	Δn_4	Δn_5

Определить $P^*(500)$, $\lambda^*(\Delta t_{var})$ и T_1^* . Исходные данные – N , Δt_{var} , Δn_i взять из таблиц А.3 и А.4 (приложение А).

2. Практическое занятие № 2. Расчет надежности с использованием метода пространства состояний (2 часа)

2.1 Основные теоретические сведения

Вероятностная оценка надежности технических систем оперирует в первую очередь таким показателем как вероятность безотказной работы $P(t)$. Данный показатель определяет вероятность сохранения объектом работоспособного состояния в процессе эксплуатации на периоде времени от 0 до t , при условии, что в начальный момент времени объект работоспособен. Данный показатель не может рассматриваться безотносительно времени, т.е. оценка надежности по данному показателю может производиться только в случае оговоренного временного промежутка, на котором будет производиться оценка.

Рассмотрим случайное событие на фиксированном промежутке времени – элемент работоспособен. Обозначим данное событие как p_i (где i – номер элемента для системы, состоящей из нескольких элементов). Противоположное событие – отказ объекта обозначим как q_i . При этом данные события на рассматриваемом промежутке времени образуют полную группу событий, т.е.:

$$p_i + q_i = 1 \quad (2.1)$$

Метод пространства состояний предполагает оценку вероятности события при работе многоэлементной системы на основе вероятностей событий в отдельных элементах системы. При этом рассматриваются все возможные событийные сочетания, приводящие к оцениваемому событию.

Рассмотрим применение данного метода на следующем примере. Имеется система электроснабжения (рисунок 2.1), включающая в себя три элемента:

- 1) воздушную линию 10 кВ;
- 2) трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ;
- 3) воздушную линию 0,4 кВ.

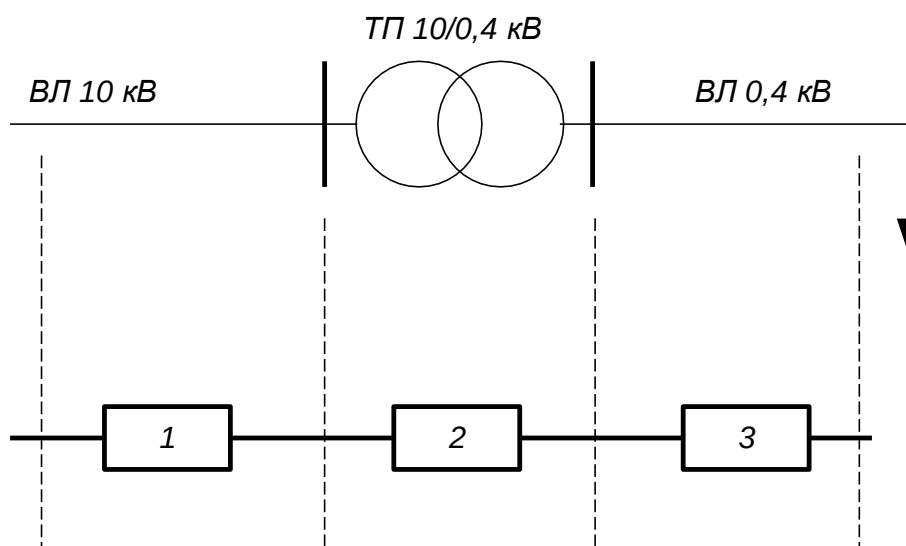


Рисунок 2.1 – Пример системы электроснабжения

Для каждого элемента известна вероятность безотказной работы на заданном промежутке времени p_i . Исследователю будет не трудно определить по приведенному ранее соотношению (2.1) вероятности отказов данных элементов q_i .

Очевидно, что отказ любого из трех элементов приведет к отказу в электроснабжении потребителя. Следовательно, можно составить перечень всех возможных состояний системы, при которых происходит событие – отказ в электроснабжении:

- 1) отказал элемент 1, элементы 2 и 3 работоспособны;
- 2) отказал элемент 2, элементы 1 и 3 работоспособны;
- 3) отказал элемент 3, элементы 1 и 2 работоспособны;
- 4) отказали элементы 1 и 2, элемент 3 работоспособен;
- 5) отказали элементы 1 и 3, элемент 2 работоспособен;
- 6) отказали элементы 2 и 3, элемент 1 работоспособен;
- 7) отказали все элементы.

Таким образом, мы имеем перечень из 7 состояний системы, при любом из которых имеет место отказ в электроснабжении. Данные события несовместны, т.е. имеет место ИЛИ событие 1 ИЛИ событие 2

ИЛИ событие 3... и т.д. Следовательно, вероятность отказа системы (согласно логике «ИЛИ») будет включать в себя 7 слагаемых (по числу возможных состояний). Отсюда, вероятность отказа системы будет равна:

$$Q_C = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7, \quad (2.2)$$

где Q_i – вероятность возникновения i -го состояния.

Рассмотрим вероятности состояний указанные в выражении (2.2) на примере возникновения 1-го состояния. События, относящиеся к элементам при любом состоянии системы независимы и совместны. Таким образом, в данном случае используется логическая связка «И». Т.е. для 1-го события имеем отказ элемента 1 И работоспособный элемент 2 И работоспособный элемент 3. Отсюда вероятность 1-го состояния:

$$Q_1 = q_1 p_2 p_3 = (1 - p_1) p_2 p_3. \quad (2.3)$$

Таким образом, выражение (2.2) примет вид:

$$Q_C = q_1 p_2 p_3 + p_1 q_2 p_3 + p_1 p_2 q_3 + q_1 q_2 p_3 + q_1 p_2 q_3 + p_1 q_2 q_3 + q_1 q_2 q_3. \quad (2.4)$$

Следует отметить, что в некоторых случаях можно значительно снизить вычислительные затраты решая подобные задачи «от обратного». Т.е. гораздо легче очертить пространство состояний соответствующих событию – система работоспособна. Для рассмотренного примера такое состояние одно (все элементы работоспособны). Вероятность безотказной работы системы в этом случае будет равна:

$$P_C = p_1 p_2 p_3. \quad (2.5)$$

Соответственно вероятность отказа системы:

$$Q_C = 1 - P_C = 1 - p_1 p_2 p_3. \quad (2.5)$$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.1. Для схемы, представленной на рисунке 2.2 определить вероятность отказа в электроснабжении потребителей подключенных к 1-й системе шин. Время срабатывания АВР не учитывается.

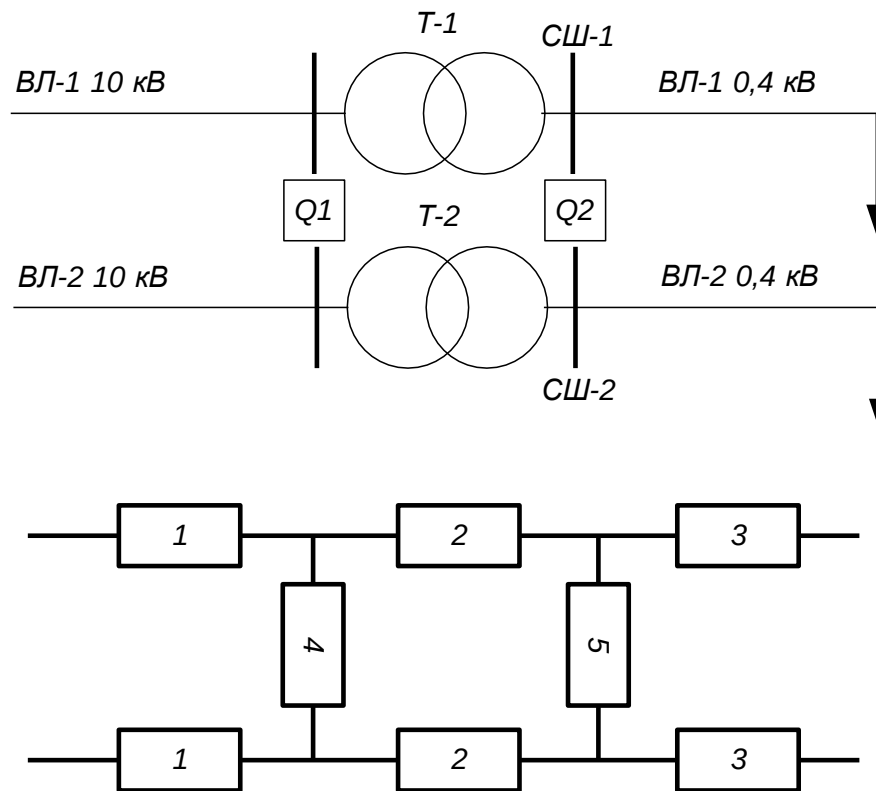


Рисунок 2.2 – Схема к задаче

Исходные данные – p_i взять из таблиц Б.1 и Б.2 (приложение Б).

3. Практическое занятие № 3. Использование формулы полной вероятности при оценке надежности (1 час)

3.1 Основные теоретические сведения

Формула полной вероятности. Формула полной вероятности является следствием обеих основных теорем – теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти вместе с одним из событий:

$H_1, H_2, \dots, H_n$, образующих полную группу несовместных событий.

Будем эти события называть *гипотезами*.

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ образуют полную группу, то событие A может появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез:

$$A = H_1 A + H_2 A + \dots + H_n A. \quad (3.1)$$

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ несовместны, то и комбинации $H_1 A + H_2 A + \dots + H_n A$ также несовместны. Применяя к ним теорему сложения вероятностей, получим:

$$P(A) = P(H_1 A) + P(H_2 A) + \dots + P(H_n A) = \sum_{i=1}^n P(H_i A). \quad (3.2)$$

Применяя к событию $H_i A$ теорему умножения, получим:

$$P(A) = P(H_1)P(A|H_1) + P(H_2)P(A|H_2) + \dots + P(H_n)P(A|H_n). \quad (3.3)$$

Полученная формула и есть *формула полной вероятности*.

3.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.1. Вдоль линии электропередач (ЛЭП) происходит три грозовых разряда. Вероятность попадания в ЛЭП первого грозового разряда равна B_1 ; второго – B_2 ; третьего – B_3 . ЛЭП выходит из строя при одном попадании молнии с вероятностью A_1 ; при двух попаданиях с вероятностью A_2 и при трех попаданиях с вероятностью A_3 . Найти вероятность того, что в результате грозовых разрядов ЛЭП вышла из строя.

Исходные данные A_i и B_i приведены в приложении В.

4. Практическое занятие № 4. Использование формулы Байеса при оценке надежности (1 час)

4.1 Основные теоретические сведения

Следствием теоремы умножения и формулы полной вероятности является так называемая *теорема гипотез* или *формула Бейеса*.

Поставим задачу. Имеется полная группа несовместных гипотез $H_1, H_2, \dots, H_n$. Вероятности этих гипотез до опыта известны и равны

соответственно $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$. Произведен опыт, в результате которого имело место событие A , спрашивается, как следует изменить вероятности гипотез в связи с появлением этого события?

По существу речь идет о том, чтобы найти условную вероятность $P(H_i|A)$ для каждой гипотезы.

Из теоремы умножения имеем:

$$P(AH_i) = P(A)P(H_i | A) = P(H_i)P(A | H_i), \quad (4.1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Из последнего уравнения, отбрасывая левую часть, находим:

$$P(H_i | A) = \frac{P(H_i)P(A | H_i)}{P(A)}. \quad (4.2)$$

Выражая $P(A)$ с помощью формулы полной вероятности, имеем:

$$P(H_i | A) = \frac{P(H_i)P(A | H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A | H_i)}. \quad (4.3)$$

Полученная формула носит название *формулы Бейеса* или *теоремы гипотез*.

4.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.1. Кабель, питающий трансформаторную подстанцию, работает в двух режимах: а) номинальном; б) с перегрузкой.

Первый режим работы составляет A % времени эксплуатации, а второй – B %. Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t в номинальном режиме равна P_1 ; во втором – P_2 .

Требуется найти:

1. Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t .
2. Кабель вышел из строя. Какова вероятность того, что он вышел из строя, работая в первом режиме?

Исходные данные представлены в таблице Г.1 (приложение Г).

5. Практическое занятие № 5. Расчет надежности систем с последовательным соединением элементов (1 час)

5.1 Основные теоретические сведения

Для расчета надежности системы, включающей в себя несколько элементов, необходимо составить структурную схему надежности. Структурная схема надежности – условная схема, которая показывает связи между элементами и учитывает влияние отказов отдельных элементов на работоспособность всей системы.

Различают два основных способа соединения элементов в систему в структурной схеме надежности – последовательное и параллельное.

Соединение элементов называется последовательным (рисунок 5.1), если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы.

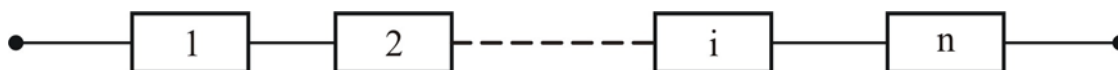


Рисунок 5.1 – Структурная схема надежности при последовательном соединении элементов

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов равна:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t), \quad (5.1)$$

где N – число элементов в системе;

$P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Сущность самого расчета состоит в определении вероятности безотказной работы всей системы $P_c(t)$ по известным значениям вероятностей безотказной работы отдельных элементов $P_i(t)$.

5.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.1. При эксплуатации N_1 распределительных устройств 10 кВ, N_2 силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, N_3 распределительных устройств 0,4 кВ в течение года было зафиксировано соответственно n_1 , n_2 и n_3 отказов каждого вида оборудования. Определить эксплуатационную надежность ТП 10/0,4 кВ, включающую в себя указанные элементы. Исходные данные приведены в таблице Д.1 (приложение Д).

6. Практическое занятие № 6. Расчет надежности систем с параллельным соединением элементов (1 час)

6.1 Основные теоретические сведения

Соединение элементов называется параллельным (рисунок 6.1), если отказ в системе наступает только после отказа всех элементов.

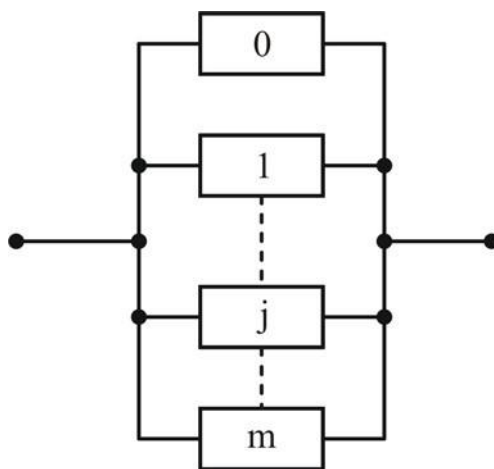


Рисунок 6.1 – Структурная схема надежности при параллельном соединении элементов

Вероятность отказа для системы с параллельным соединением элементов:

$$Q(t) = \prod_{j=0}^M Q_j(t), \quad (6.1)$$

где M – число элементов в системе;

$Q_j(t)$ – вероятность отказа j -го элемента.

Сущность самого расчета состоит в определении вероятности безотказной работы всей системы $P_c(t)$ по известным значениям вероятностей безотказной работы отдельных элементов $P_i(t)$.

6.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 6.1. Вероятность безотказной работы реле в цепи автоматического устройства $P_1(t)$. Замыкающие контакты данного реле параллельно продублированы контактами другого реле с вероятностью безотказной работы $P_2(t)$. Определить вероятности безотказной работы на включение и на отключение данной цепи.

Исходные данные приведены в таблице Е.1 (приложение Е).

7. Практическое занятие № 7. Расчет надежности систем со смешанным соединением элементов (2 часа)

7.1 Основные теоретические сведения

Расчеты структурной надежности схем со смешанным соединением элементов производятся с использованием выражение (5.1) и (6.1). При расчете схема последовательно эквивалентруется аналогично тому, как это делается в расчете сопротивлений при смешанном соединении.

Следует отметить, что в рамках данного занятия схемы типа «мостик» не рассматриваются.

7.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 7.1. Система состоит из 8 элементов. На заданном интервале времени вероятности безотказной работы каждого из элементов равны $P_i(t)$. Определить вероятность безотказной работы системы.

Исходные данные – схему и $P_i(t)$ взять из приложения Ж.

8. Практическое занятие № 8. Расчет надежности системы по данным об отказах элементов (2 часа)

8.1 Основные теоретические сведения

Интенсивность отказов связана однозначной зависимостью с вероятностью безотказной работы (*основной закон надежности*):

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (8.1)$$

Как показывает опыт эксплуатации, интенсивность отказов $\lambda(t)$ электрооборудования является достаточно сложной функцией во времени. В общем виде ее можно представить в виде графика (рисунок 8.1).

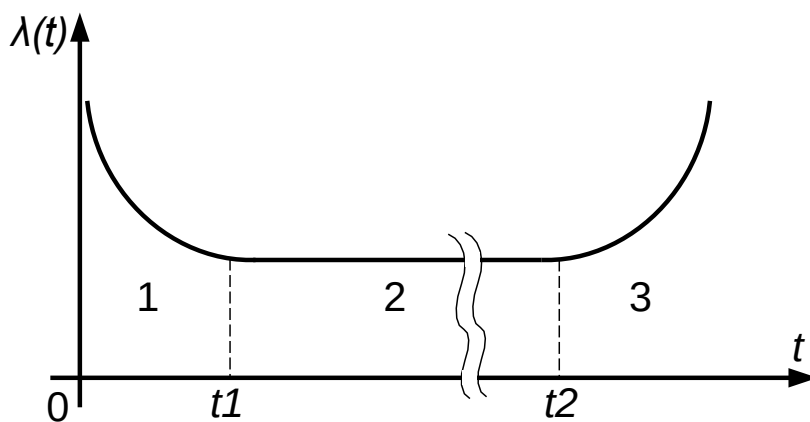


Рисунок 8.1 – Общий вид зависимости интенсивности отказов от времени

График зависимости интенсивности отказов от времени можно условно разбить на три интервала. Интервал «1» – от 0 (ввод в эксплуатацию) до момента времени t_1 соответствует периоду приработки оборудования и характеризуется повышенной интенсивностью отказов (низкой надежностью). Интервал «2» – от момента времени t_1 до момента времени t_2 соответствует периоду интенсивной эксплуатации и характеризуется

практически установившимся достаточно низким значением интенсивности отказов, $\lambda(t) \approx \text{const}$ (надежность максимальна). Интервал «3» – от момента времени t_2 и далее соответствует периоду ускоренного износа (надежность резко снижается).

Для практических расчетов основной интерес представляет период интенсивной эксплуатации (как наиболее длительный из всех). В этом случае (при $\lambda(t) \approx \text{const}$) основной закон надежности преобразуется в экспоненциальный закон:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (8.2)$$

что существенно облегчает расчеты.

Через вероятность безотказной работы наработка до отказа вычисляется следующим образом:

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (8.3)$$

8.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 8.1. Определить вероятность безотказной работы в течение 2 лет и наработку до отказа системы состоящей из линии 10 кВ длиной L_{10} , трансформатора, распределительного устройства 0,4 кВ и линии 0,4 кВ длиной $L_{0,4}$. при расчете использовать экспоненциальный закон надежности.

Исходные данные – интенсивности отказов, длины линий L_{10} и $L_{0,4}$ взять из приложения 3.

Задача 8.2. Интенсивность отказов устройства на определенном отрезке времени изменяется линейно

$$\lambda(t) = at + b$$

Используя основной закон надежности, найти вероятность безотказной работы устройства через T часов работы

Исходные данные – T , a и b взять из приложения 3.

9. Практическое занятие № 9. Расчет надежности системы при общем резервировании (1 час)

9.1 Основные теоретические сведения

Существует несколько способов резервирования. Если резервируется вся система, резервирование называется *общим (системным)*. Если резервируются отдельные элементы системы, резервирование называется *раздельным (поэлементным)*.

Структурная схема надежности для общего резервирования показана на рисунке 9.1.

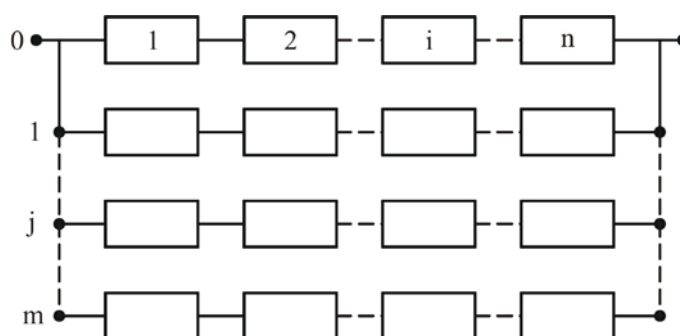


Рисунок 9.1 – Схема общего резервирования

Система с постоянным включением резерва будет нормально функционировать при сохранении работоспособности хотя бы одной из цепей. Количество резервных цепей определяет *кратность резервирования*. Так, в случае одной основной системы и одной резервной имеет место однократное резервирование (кратность резервирования $m = 1$).

9.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 9.1. Система состоит из 3 последовательно соединенных элементов. На заданном интервале времени вероятности безотказной работы каждого из элементов равны $P_1(t)$, $P_2(t)$, и $P_3(t)$. Кратность

резервирования m . Определить вероятности безотказной работы системы при общем резервировании.

Исходные данные – $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и m взять из приложения И.

10. Практическое занятие № 10. Расчет надежности системы при раздельном резервировании (1 час)

10.1 Основные теоретические сведения

Структурная схема системы с раздельным резервированием представлена на рисунке 10.1.

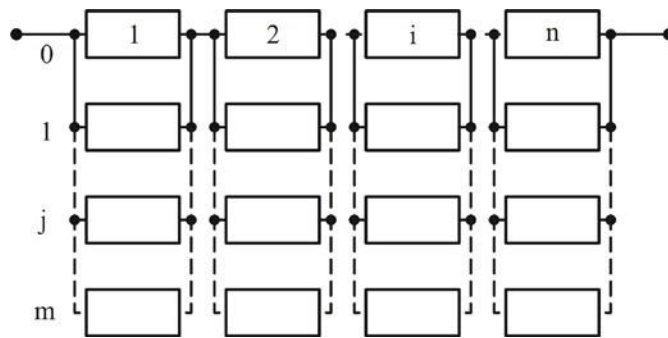


Рисунок 10.1 – Структурная схема с раздельным резервированием

В данном случае объект может быть представлен в виде последовательного соединения n секций, каждая из которых содержит $m + 1$ параллельно включенных элементов. Система находится в состоянии работоспособности, если исправно работают все n секций. В свою очередь, отказ любой из секций наступает в том случае, если откажут все $m + 1$ элементов секций.

4.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 10.1. Система состоит из 3 последовательно соединенных элементов. На заданном интервале времени вероятности безотказной работы каждого из элементов равны $P_1(t)$, $P_2(t)$, и $P_3(t)$. Кратность

резервирования m . Определить вероятности безотказной работы системы при раздельном резервировании.

Исходные данные – $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и m взять из приложения И.

11. Практическое занятие № 11. Определение оптимального количества резервных элементов в системах с многократным резервированием (1 час)

11.1 Основные теоретические сведения

Достичь требуемой надежности системы можно с использованием различных методов резервирования и варьируя количество резервных элементов. Но в реальных условиях при формировании резервного фонда существуют некоторые ограничения. В частности – денежные ресурсы на закупку резервного оборудования. В данной ситуации задача определения резервного фонда сводится к расчету необходимого количества резервных элементов для каждого звена рассматриваемой системы при условии достижения максимальной надежности с учетом заданных ограничений (например, стоимости резервного фонда).

Для решения таких задач существуют две группы методов: точные (метод прямого перебора, динамического программирования, ветвей и границ) и приближенные (метод множителей Лагранжа, градиентный метод и др.). Один из наиболее простых методов – метод наискорейшего спуска. Он заключается в следующем: на каждом шаге отыскивается участок резервирования, который дает наибольший выигрыш в виде прироста надежности отнесенного к единице затрат. Т. е., движение к экстремуму идет по направлению максимальной частной производной.

Процесс отыскания экстремума многошаговый. На каждом шаге поочередно к каждому элементу системы подключается резервный

элемент и производится расчет удельного прироста надежности. Удельный прирост на j -ом шаге при введении в систему резерва для i -го элемента:

$$d_j(m_i) = \frac{P_j(m_i+1) - P_{j-1}(m_i)}{C_i}, \quad (11.1)$$

где $P_{j-1}(m_i)$ – надежность системы до добавления резервного элемента к i -му элементу;

$P_j(m_i+1)$ – надежность системы на j -ом шаге после добавления резервного элемента к i -му элементу;

C_i – стоимость i -го элемента.

После расчета прироста надежности для каждого элемента системы в систему вводится резервный элемент соответствующий максимальному приросту надежности. Далее шаг завершается и в последующем шаге система рассматривается с уже введенным в нее резервным элементом (выбранным на завершеном шаге).

В процессе расчета на каждом шаге необходимо контролировать остаточную сумму денежных средств, выделенных на формирование резервного фонда. Остаточная сумма:

- после первого шага

$$C_1 = C_0 - c_{i(1)};$$

- после j -го шага

$$C_j = C_{j-1} - c_{i(j)}$$

где C_0 – первоначальная сумма денежных средств, выделенных на формирование резервного фонда;

$c_{i(1)}$ – стоимость i -го элемента введенного в систему после первого шага;

C_{j-1} – остаточная сумма на предыдущем шаге;

$c_{i(j)}$ – стоимость i -го элемента введенного в систему после j -го шага.

Процесс расчета повторяется до тех пор пока не будет удовлетворено одно из условий:

$$C_j = 0 \quad \text{или} \quad C_j < c_{i(\min)};$$

здесь $c_{i(\min)}$ – стоимость самого дешевого из резервируемых элементов.

11.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 11.1. Система состоит из трех последовательно соединенных элементов. На заданном интервале времени вероятности безотказной работы равны $P_1(t)$, $P_2(t)$, и $P_3(t)$, а стоимости C_1 , C_2 и C_3 . Определить оптимальное число резервных элементов (при постоянном резервировании), обеспечив максимальное значение вероятности безотказной работы системы, при условии, что стоимость резервного фонда не превысит C_0 .

Исходные данные – $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, C_1 , C_2 , C_3 , C_0 взять из приложения К.

12. Практическое занятие № 12. Расчет надежности системы при ненагруженном резерве (2 часа)

12.1 Основные теоретические сведения

При ненагруженном общем резерве вероятность безотказной работы системы, состоящей из m резервных цепей, определяется по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t} \sum_{j=0}^m \frac{(\Lambda t)^j}{j!},$$

где Λ – интенсивность отказов нерезервированной цепи;

m – число резервных цепей.

Наработка до отказа равна $T_1 = T_{10} \cdot (m + 1)$, где T_{10} – наработка до отказа основной (нерезервированной) цепи.

12.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 12.1. Система состоит из 3 последовательно соединенных элементов. На заданном интервале времени вероятности безотказной работы каждого из элементов равны $P_1(t)$, $P_2(t)$, и $P_3(t)$. Кратность резервирования m . Определить вероятности безотказной работы системы при общем и раздельном ненагруженном резервировании.

Исходные данные – $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ и m взять из приложения И.

Задача 12.2. Определить вероятность безотказной работы и наработку до отказа системы состоящей из линии 10 кВ длиной L_{10} , трансформатора 10/0,4 кВ, распределительного устройства 0,4 кВ и линии 0,4 кВ длиной $L_{0,4}$. Произвести расчет для времени работы T с учетом введения в схему резервного трансформатора. Рассмотреть варианты нагруженного и ненагруженного резерва (кратность резервирования $m = 1$).

Исходные данные – L_{10} , $L_{0,4}$ и T взять из приложения Л. Интенсивности отказов взять из приложения 3 (таблица 3.1).

13. Практическое занятие № 13. Определение закона распределения случайной величины наработки на отказ (2 часа)

13.1 Основные теоретические сведения

При экспериментальной оценке надежности основная задача сводится к определению вида функции распределения и параметров распределения исследуемой случайной величины.

При большом числе наблюдений весь диапазон полученных значений случайной величины делится на интервалы и подсчитывается количество попаданий случайной величины в каждый интервал. Это число делится на общее число наблюдений и определяется статистическая вероятность попадания случайной величины в каждый из интервалов. Сумма

статистических вероятностей всех интервалам равна единице.

Полученная статистика оформляется в виде гистограммы. По оси абсцисс откладываются интервалы случайной величины, на каждом из них строится прямоугольник, площадь которого равна статистической вероятности попадания случайной величины в данный интервал.

По виду гистограммы выдвигают гипотезу о предполагаемом законе распределения случайной величины и статистически определяют его параметры. В тех же осях строят теоретическую кривую (рисунок 13.1) и определяют теоретические вероятности попадания случайной величины в каждый интервал.

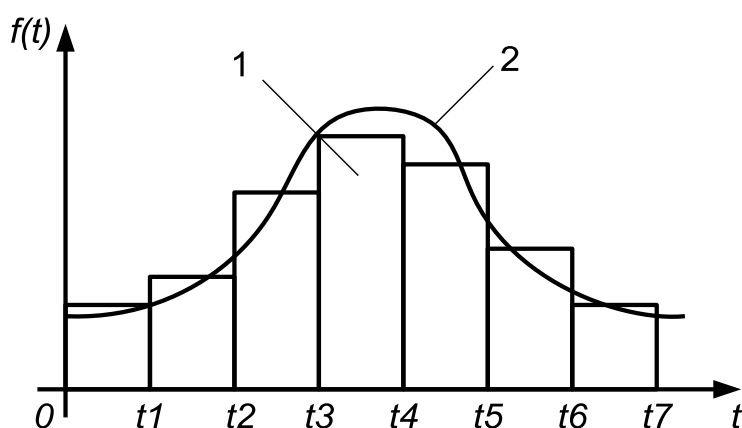


Рисунок 13.1 – К определению вида закона распределения случайной величины (1 – гистограмма, 2 – кривая теоретического распределения)

13.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 13.1. По результатам испытаний оборудования были получены статистические данные о случайной величине времени t наработки на отказ и представлены в виде вариационного ряда (таблица).

$t, ч.$	$0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	$t_3 - t_4$	$t_4 - t_5$	$t_5 - t_6$
Кол-во отказов	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6

По данным вариационного ряда построить гистограмму и выдвинуть гипотезу о законе распределения случайной величины.

Исходные данные – t_i и n_i взять из приложения М.

14. Практическое занятие № 14. Использование критериев согласия для оценки гипотезы о законе распределения случайной наработки на отказ (2 часа)

14.1 Основные теоретические сведения

Как правило, между теоретической кривой и статистическим распределением (гистограммой) имеется некоторое расхождение (см. рисунок 13.1 практического занятия № 13). Проверка гипотезы о соответствии теоретической кривой полученной статистике осуществляется с помощью критериев согласия. Наиболее часто используются критерии χ^2 и Колмогорова.

При применении критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределением рассматривается максимальное значение модуля разности между теоретической и экспериментальной интегральными функциями распределения. Условие соответствия выбранного теоретического закона распределения эмпирической статистике:

$$\Delta x = \Delta F \sqrt{N} \leq 1, \quad (14.1)$$

где $\Delta F = \max |F^*(t) - F(t)|$ – наибольшее отклонение экспериментальной кривой от теоретической;

N – общее число наблюдений.

При использовании критерия согласия χ^2 определяется мера расхождения:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - N p_i)^2}{N p_i}, \quad (14.2)$$

где k – число интервалов статистического ряда;

p_i – теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -й

интервал;

N – общее число наблюдений.

По таблицам, приведенным в приложении К, для каждого значения χ^2 с учетом количества степеней свободы s можно найти доверительную вероятность P_d согласования теоретического и экспериментального распределений. Если $P_d > 0,1$ то гипотезу о предполагаемом законе распределения можно принять.

Количество степеней свободы:

$$s = k - g - 1$$

здесь g – количество параметров распределения.

Следует отметить, что применение критерия χ^2 обосновано при $N \geq 50$ и $k \geq 6$.

14.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 14.1. Проверить гипотезу о законе распределения случайной величины задачи 13.1, используя критерии согласия χ^2 и Колмогорова.

15. Практическое занятие № 15. Расчет надежности системы с учетом преднамеренных отключений без учета взаимного влияния элементов (1 час)

15.1 Основные теоретические сведения

Если надежность анализируется за длительный промежуток времени, например, при проектировании СЭС, то заранее предусмотреть число и длительность преднамеренных отключений сложно. В этом случае последние рассматриваются как поток случайных событий и используются положения теории вероятностей и математической статистики.

Интенсивность преднамеренных отключений последовательно соединенных n элементов:

$$\varpi_O = \sum_{i=1}^n \varpi_i = \varpi_1 + \varpi_2 + \dots + \varpi_n, \quad (15.1)$$

где ϖ_i — интенсивность преднамеренных отключений i -го элемента.

Среднее время обслуживания данной схемы после преднамеренного отключения, т. е. продолжительности планово-предупредительного ремонта:

$$T_{OC} = \varpi_O^{-1} \sum_{i=1}^n \varpi_i \cdot T_{Oi}, \quad (15.2)$$

где T_{Oi} — продолжительность планово-предупредительного ремонта i -го элемента.

15.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 15.1. Для участка сети (рисунок 15.1) определить следующие показатели надежности:

- интенсивность отказов;
- среднее время восстановления;
- общую интенсивность преднамеренных отключений;
- среднее время обслуживания участка.

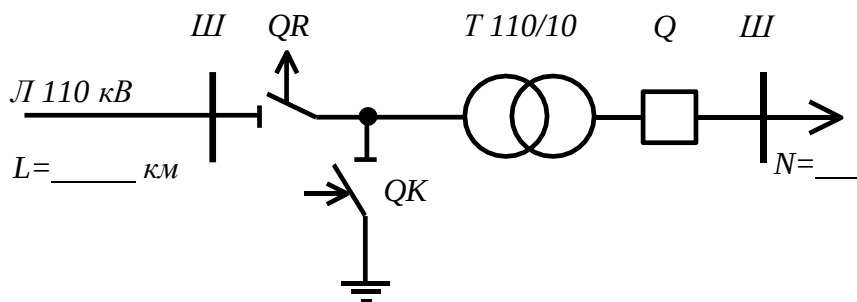


Рисунок 15.1 – Расчетный участок сети

Исходные данные – L_{110} , N взять из приложения Н, интенсивность преднамеренных отключений и среднее время обслуживания элементов взять из приложения З.

16. Практическое занятие № 16. Расчет надежности системы с учетом преднамеренных отключений с учетом взаимного влияния элементов

(1 час)

16.1 Основные теоретические сведения

При ремонте электрооборудования обычно отключаются одновременно несколько взаимосвязанных элементов. Поэтому суммарная интенсивность преднамеренных отключений цепочки, как правило, меньше суммы интенсивностей частот отдельных элементов.

Один из элементов цепочки, который чаще отключается, называется *базовым*, а относительная частота преднамеренных отключений остальных элементов по отношению к базовому — *коэффициентом совпадения*. Статистически он определяется как:

$$g_i = \frac{m_i(t)}{M_i(t)}, \quad (16.1)$$

где $m_i(t)$ – число преднамеренных отключений i -го элемента, произведенных совместно с отключением базового элемента за период t ;

$M_i(t)$ – общее число преднамеренных отключений i -го элемента за тот же период времени.

Ориентировочные значения моментов электрической сети приведены в приложении О.

С учетом коэффициента совпадения формулы для определения показателей преднамеренных отключений последовательно включенных элементов принимают вид:

- для интенсивности преднамеренных отключений

$$\varpi_O = \varpi_i + \sum_{i=1}^n \varpi_i (1 - g_i); \quad (16.2)$$

- для среднего времени восстановления после преднамеренного отключения

$$T_{OC} = \varpi_O^{-1} \left[\varpi_B T_{OB} + \varpi_{max} (T_{Omax} - T_{OB}) + \sum_{i=1}^n \varpi_i \cdot T_{Oi} (1 - g_i) \right], \quad (16.3)$$

где ϖ_B, T_{OB} - интенсивность преднамеренных отключений и среднее время обслуживания базового элемента;

ϖ_{max}, T_{Omax} - то же для элемента с максимальным временем обслуживания.

16.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 16.1. Произвести расчет задачи 15.1. с учетом взаимного влияния элементов на интенсивность преднамеренных отключений.

17. Практическое занятие № 17. Оценка вероятности состояний систем массового обслуживания с отказами (1 час)

17.1 Основные теоретические сведения

Как правило, после отказа электрооборудования в СЭС имеет место процесс восстановления. Определить вероятность восстановления оборудования в установленные сроки, можно используя теорию массового обслуживания.

Система массового обслуживания (СМО) характеризуется потоком событий, числом каналов и их быстродействием. Если представить систему электроснабжения в виде системы массового обслуживания то для нее поток событий будет представлен потоком отказов электрооборудования, каналами будут являться ремонтные бригады

(звенья). Если число ремонтных бригад ограничено и/или среднее время восстановления оборудования достаточно велико (все каналы заняты), то некоторые заявки на обслуживание могут быть отклонены (СМО с отказами), либо вероятно появление очереди заявок (СМО с ожиданием).

Параметры, определяющие состояние СМО:

- число каналов n (число ремонтных бригад);
- плотность потока заявок λ (средняя интенсивность отказов);
- плотность потока обслуживания одного канала μ (интенсивность восстановления);
- число состояний системы k .

Интенсивность восстановления:

$$\mu = 1/T_B, \quad (17.1)$$

где T_B – среднее время восстановления объекта по заявке.

Вероятность состояния СМО с отказами определяется по формуле Эрланга:

$$P_k = \frac{\alpha^k / k!}{\sum_{k=0}^n \alpha^k / k!}, \quad (0 \leq k \leq n), \quad (17.2)$$

где $\alpha = \lambda / \mu = \lambda T_B$ – приведенная плотность потока заявок.

Вероятность отказа (все каналы заняты):

$$P_{от\ k} = \frac{\alpha^n / n!}{\sum_{k=0}^n \alpha^k / k!}, \quad (0 \leq k \leq n). \quad (17.3)$$

Для одноканальной системы:

$$P_{от\ к} = \alpha / (1 + \alpha). \quad (17.4)$$

17.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 17.1. На ремонтный участок электротехнической службы (ЭТС) предприятия поступает поток заявок с интенсивностью λ . На участке работают n бригад. Среднее время обслуживания одной заявки T_B .

Приняв ЭТС как СМО с отказами найти:

- вероятность наличия одного свободного канала в произвольный момент времени;
- вероятность отказа в обслуживании.

Исходные данные – λ , n и T_B взять из приложения П.

18. Практическое занятие № 18. Оценка вероятности состояний систем массового обслуживания с ожиданием (1 час)

18.1 Основные теоретические сведения

Состояние системы массового обслуживания с ожиданием можно описать следующим образом:

S_0 - система массового обслуживания свободна;

S_1 - занят один канал, очереди нет;

* * *

S_n – заняты все каналы, очереди нет;

S_{n+1} – заняты все каналы, и одна заявка стоит в очереди;

* * *

S_{n+I} – заняты все каналы, и I заявок стоят в очереди

Вероятности состояний СМО с ожиданием

$$P_k = \frac{a^k / k!}{\sum_{k=0}^n a^k / k! + \frac{a^{n+1}}{n!(n-a)}}, (0 \leq k \leq n). \quad (18.1)$$

Вероятность наличия очереди:

$$P_O = 1 - [P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + \dots + P(S_n)]. \quad (18.2)$$

Средняя длина очереди:

$$m_o = \frac{\frac{a^{n+1}}{n \cdot n! (1 - a/n)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{a^k}{k!} + \frac{a^{n+1}}{n! (n - a)}}. \quad (18.3)$$

Среднее время пребывания в очереди:

$$T_o = m_o / \lambda. \quad (18.4)$$

18.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 18.1. На ремонтный участок электротехнической службы (ЭТС) предприятия поступает поток заявок с интенсивностью λ . На участке работают n бригад. Среднее время обслуживания одной заявки T_B .

Приняв ЭТС как СМО с ожиданием найти:

- вероятность наличия одного свободного канала в произвольный момент времени;
- вероятность наличия очереди;
- среднюю длину очереди;
- среднее время пребывания в очереди.

Исходные данные – λ , n и T_B взять из приложения П.

Приложение А

Варианты заданий к практическому занятию № 1

Таблица А.1 – Исходные данные к задаче 1.1 (по первой цифре варианта)

Кол-во элементов, шт.	Вариант			
	0	1	2	3
N	1000	1200	1400	1600
n	200	250	300	350
Δn	70	90	120	150

Таблица А.2 – Исходные данные к задаче 1.1 (по второй цифре варианта)

Время, ч	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_i	700	800	1000	1100	1300	1200	1400	1600	900	500
Δt	100	120	200	150	100	180	200	250	140	60

Таблица А.3 – Исходные данные к задаче 1.2 (по первой цифре варианта)

Кол-во элементов, шт.	Вариант			
	0	1	2	3
N	500	600	700	800
$\Delta t_{\text{вар}}$	150	250	350	450

Таблица А.4 – Исходные данные к задаче 1.2 (по второй цифре варианта)

Вариант	Количество отказов				
	Δn_1	Δn_2	Δn_3	Δn_4	Δn_5
0	10	12	15	11	13
1	20	22	12	14	17
2	11	16	8	15	19
3	18	17	16	19	20
4	21	20	19	11	18
5	9	13	12	10	15
6	16	9	11	19	21
7	8	10	15	18	22
8	6	8	12	17	19
9	5	7	13	10	18

Приложение Б

Варианты заданий к практическому занятию № 2

Таблица Б.1 – Исходные данные к задаче 2.1 (по первой цифре варианта)

Исходные данные	Вариант			
	0	1	2	3
$P_4(t)$	0,53	0,62	0,74	0,81
$P_5(t)$	0,66	0,54	0,68	0,71

Таблица Б.2 – Исходные данные к задаче 2.1 (по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1(t)$	0,85	0,9	0,75	0,95	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7	0,5
$P_2(t)$	0,7	0,85	0,7	0,8	0,55	0,75	0,6	0,65	0,75	0,6
$P_3(t)$	0,6	0,7	0,5	0,75	0,5	0,7	0,7	0,7	0,95	0,9

Приложение В

Варианты заданий к практическому занятию № 3

Таблица В.1 – Исходные данные к задаче 3.1 (по первой цифре варианта)

Исходные данные	Вариант			
	0	1	2	3
A_1	0,2	0,3	0,35	0,2
A_2	0,5	0,6	0,7	0,6
A_3	0,8	0,9	0,95	1,0

Таблица В.2 – Исходные данные к задаче 3.1 (по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B_1	0,1	0,2	0,27	0,15	0,16	0,18	0,25	0,16	0,17	0,25
B_2	0,3	0,25	0,37	0,18	0,25	0,35	0,26	0,26	0,35	0,28
B_3	0,4	0,27	0,35	0,25	0,35	0,27	0,27	0,37	0,45	0,29

Приложение Г

Варианты заданий к практическому занятию № 4

Таблица Г.1 – Исходные данные к задаче 4.1

Первая цифра варианта	A	B	Вторая цифра варианта	P_1	P_2
0	60	40	0	0,3	0,43
1	63	37	1	0,33	0,4
2	65	35	2	0,35	0,44
3	67	33	3	0,4	0,45
4	70	30	4	0,42	0,5
5	73	27	5	0,45	0,49
6	75	25	6	0,2	0,33
7	77	23	7	0,23	0,3
8	80	20	8	0,25	0,35
9	85	15	9	0,15	0,4

Приложение Д

Варианты заданий к практическому занятию № 5

Таблица Д.1 – Исходные данные к задаче 5.1 (по первой цифре варианта)

Исходные данные	Вариант			
	0	1	2	3
N_1	100	200	150	200
N_2	120	180	200	130
N_3	90	210	220	180

Таблица Д.2 – Исходные данные к задаче 5.1 (по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_1	2	5	4	6	3	4	2	5	3	4
n_2	3	5	5	3	3	5	7	6	5	4
n_3	2	6	7	5	4	8	4	3	6	5

Приложение Е

Варианты заданий к практическому занятию № 6

Таблица Е.1 – Исходные данные к задаче 6.1

Первая цифра варианта	$P_1(t)$	Вторая цифра варианта	$P_2(t)$
0	0,43	0	0,3
1	0,4	1	0,33
2	0,44	2	0,35
3	0,45	3	0,4
4	0,5	4	0,42
5	0,49	5	0,45
6	0,33	6	0,2
7	0,3	7	0,23
8	0,35	8	0,25
9	0,4	9	0,15

Приложение Ж

Варианты заданий к практическому занятию № 7

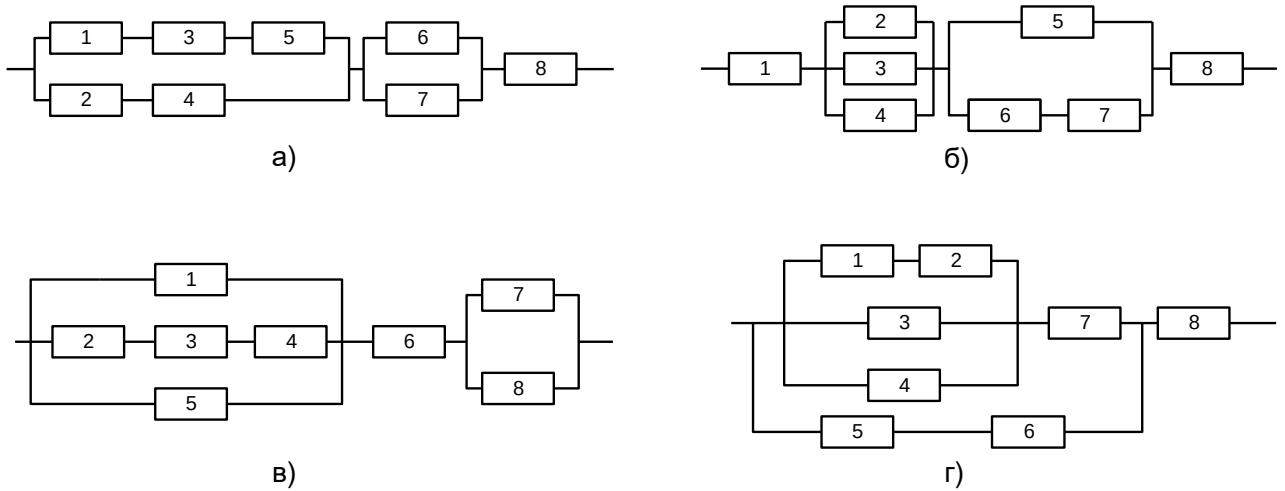


Рисунок Ж.1 – Варианты структурных схем надежности
(по первой цифре варианта а – 0; б – 1; в – 2; г – 3).

Таблица Ж.2 – Исходные данные к задаче 7.1 (по второй цифре варианта)

Вариант	Вероятность безотказной работы элементов							
	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$	$P_5(t)$	$P_6(t)$	$P_7(t)$	$P_8(t)$
0	0,5	0,4	0,95	0,6	0,9	0,65	0,75	0,55
1	0,7	0,45	0,9	0,95	0,6	0,75	0,55	0,65
2	0,8	0,5	0,4	0,45	0,75	0,55	0,9	0,95
3	0,7	0,8	0,75	0,55	0,45	0,5	0,6	0,9
4	0,55	0,7	0,5	0,75	0,9	0,45	0,4	0,8
5	0,75	0,55	0,8	0,4	0,7	0,7	0,45	0,5
6	0,9	0,75	0,7	0,5	0,55	0,4	0,8	0,45
7	0,95	0,9	0,45	0,8	0,4	0,6	0,5	0,4
8	0,6	0,95	0,55	0,7	0,5	0,8	0,7	0,75
9	0,65	0,6	0,7	0,9	0,8	0,4	0,95	0,7

Приложение 3

Варианты заданий к практическому занятию № 8

Таблица 3.1 – Расчетные значения показателей надежности основных элементов СЭС [1]

Элемент	Условное обозначение на схемах	Интенсивность отказов, λ , год ⁻¹	Среднее время восстановления, T_B , ч	Интенсивность преднамеренных отключений, ν , год ⁻¹	Среднее время обслуживания, T_O , ч
Воздушная линия (ВЛ) 35, 110 кВ одноцепная, на 1 км длины	Л	0,08	8	0,15	8
ВЛ 35, 110 кВ двухцепная, на 1 км длины	2Л	0,008	10	0,01	8
ВЛ 6, 10 кВ одноцепная, на 1 км длины	Л	0,25	6	0,25	5,8
Кабельная линия (КЛ) 6, 10 кВ, на 1 км длины	К	0,1	25	0,5	3
Две КЛ в одной траншее, на 1 км длины	2К	0,05	15	0,05	3
ВЛ 0,4 кВ, на 1 км длины	Л	0,2	4	0,3	5
Трансформатор с высшим напряжением (ВН) 35, 110 кВ	Т	0,03	30	0,4	22
Трансформатор с ВН 6, 10 кВ	Т	0,035	8	0,3	8
Ячейка выключателя 35, 110 кВ	Q	0,02	7	0,3	6
Ячейка выключателя 6, 10 кВ внутренней установки	Q	0,015	6	0,2	6
Ячейка выключателя 6, 10 кВ КРУН наружной установки	Q	0,05	5	0,3	5
Ячейка отделителя (ОД) или короткозамыкателя (КЗ) 35, 110 кВ	QR (QK)	0,05	4	0,3	5
Ячейка разъединителя 35, 110 кВ	QS	0,005	4	0,25	4
Ячейка разъединителя 6, 10 кВ внутренней установки	QS	0,002	3	0,2	3,5
Ячейка разъединителя 6, 10 кВ КРУН наружной установки	QS	0,01	3	0,2	3,5
Ячейка предохранителя 6, 10 кВ	FU	0,05	2,5	0,2	3
Линейный разъединитель 6, 10 кВ	QS	0,08	4,5	-	-
Шины ОРУ 35, 110 кВ на 1 присоединение	Ш	0,001	5	0,15	6
Шины РУ 6, 10 кВ на 1 присоединение	Ш	0,001	4	0,2	5
Сборка НН – 0,4 кВ ТП	С 0,4	0,007	4	0,2	5

Таблица 3.2 – Исходные данные к задаче 8.1 (по первой цифре варианта)

Длина линии 10 кВ	Вариант			
	0	1	2	3
L_{10}, км	1,5	2	2,5	3

Таблица 3.3 – Исходные данные к задаче 8.1 (по второй цифре варианта)

Длина линии 0,4 кВ	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{0,4}$, м	500	400	300	200	250	350	450	550	600	650

Таблица 3.4 – Исходные данные к задаче 8.2 (по первой цифре варианта)

Время работы	Вариант			
	0	1	2	3
T, ч	2000	2500	3000	4000

Таблица 3.5 – Исходные данные к задаче 8.2 (по второй цифре варианта)

Параметры функции λ	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a \cdot 10^{-6}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
$b \cdot 10^{-5}$	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5

Приложение И

Варианты заданий к практическим занятиям № 9, 10, 12

Таблица И.1 – Исходные данные к задачам 9.1, 10.1 и 12.1

(по первой цифре варианта)

Кратность резервирования	Вариант			
	0	1	2	3
<i>m</i>	3	2	4	1

Таблица И.2 – Исходные данные к задачам 9.1, 10.1 и 12.1

(по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>P₁(t)</i>	0,85	0,9	0,75	0,95	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7	0,5
<i>P₂(t)</i>	0,7	0,85	0,7	0,8	0,55	0,75	0,6	0,65	0,75	0,6
<i>P₃(t)</i>	0,6	0,7	0,5	0,75	0,5	0,7	0,7	0,7	0,95	0,9

Приложение К

Варианты заданий к практическому занятию № 11

Таблица К.1 – Исходные данные к задаче 11.1 (по первой цифре варианта)

Стоимость резервного фонда	Вариант			
	0	1	2	3
<i>C₀</i>	15	14	12	10

Таблица К.2 – Исходные данные к задаче 11.1 (по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>P₁(t)</i>	0,9	0,95	0,8	0,6	0,5	0,85	0,75	0,6	0,5	0,7
<i>P₂(t)</i>	0,85	0,8	0,75	0,65	0,6	0,7	0,7	0,55	0,6	0,75
<i>P₃(t)</i>	0,7	0,75	0,7	0,7	0,9	0,6	0,5	0,5	0,7	0,95
<i>C₁</i>	4	4	5	2	1	5	5	4	2	1
<i>C₂</i>	2	3	3	3	3	3	4	2	3	3
<i>C₃</i>	1	1	2	4	5	2	2	1	5	5

Приложение Л

Варианты заданий к практическому занятию № 12

Таблица Л.1 – Исходные данные к задаче 12.2 (по первой цифре варианта)

Время работы	Вариант			
	0	1	2	3
$T, ч$	4000	5000	6000	7000

Таблица Л.2 – Исходные данные к задаче 12.2 (по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{10}, км$	1	1,5	1,8	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$L_{0,4}, м$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

Приложение М

Варианты заданий к практическим занятиям № 13 и № 14

Таблица М.1 – Исходные данные к задаче 13.1 (по первой цифре варианта)

Интервалы	Вариант			
	0	1	2	3
t_1	100	150	200	250
t_2	200	300	400	500
t_3	300	450	600	750
t_4	400	600	800	1000
t_5	500	750	1000	1250
t_6	600	900	1200	1500

Таблица М.2 – Исходные данные к задаче 13.1 (по второй цифре варианта)

Кол-во отказов	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_1	1	20	13	4	25	15	6	30	22	26
n_2	3	14	12	6	15	13	8	20	20	16
n_3	5	10	14	8	10	12	14	11	19	10
n_4	6	5	12	10	5	14	10	6	21	7
n_5	4	3	10	7	2	16	5	4	23	4
n_6	2	2	11	3	1	15	4	2	18	3

Приложение Н

Варианты заданий к практическим занятиям № 15 и № 16

Таблица Н.1 – Исходные данные к задачам 15.1 и 16.1

(по первой цифре варианта)

Кол-во вводов 10 кВ <i>N</i>	Вариант			
	0	1	2	3
	10	12	14	16

Таблица Н.2– Исходные данные к задачам 15.1 и 16.1

(по второй цифре варианта)

Длина линии 110 кВ <i>L</i> ₁₁₀ , км	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	10	15	18	20	25	30	35	40	45	50

Приложение О

Информационные материалы к практическому занятию № 16

Таблица О.1 – Ориентировочные значения моментов электрической сети

№ момента	Условное обозначение	Базовые элементы			
		ВЛ(КЛ) 35,110 кВ	ВЛ(КЛ) 6,10 кВ	Тр-р 110,35/10 кВ	Тр-р 6,10/0,4 кВ
1	Воздушная линия (ВЛ) 6, 10 кВ	0,7	1	0,6	–
2	Кабельная линия (КЛ) 6, 10 кВ	0,6	1	0,5	–
3	Ячейка распреустройства (РУ) 6,10 кВ	0,3	0,6	0,4	1
4	Ячейка РУ 35, 110 кВ	0,8	–	0,6	–
5	Ячейка выключателя 6, 10 кВ	0,8	0,8	0,7	–
6	Трансформатор 35,110/10 кВ	0,6	–	1	–
7	Трансформатор 6,10/0,4 кВ	0,3	0,6	0,4	1
8	Шины 35,110 кВ	0,6	–	0,8	–
9	Шины 6,10 кВ	0,75	–	0,7	0,8
10	Сборка НН ТП	–	0,4	–	0,8

Приложение П

Варианты заданий к практическим занятиям № 17 и № 18

Таблица П.1 – Исходные данные к задачам 17.1 и 18.1

(по первой цифре варианта)

Кол-во бригад	Вариант			
	0	1	2	3
<i>n</i>	4	3	2	1

Таблица П.2 – Исходные данные к задачам 17.1 и 18.1

(по второй цифре варианта)

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Поток λ , ч ⁻¹	2	3	4	5	6	8	10	12	7	9
Время обслуживания, <i>T_B</i> , ч	6	5	3	2	2	3	2	3	4	3

Перечень основной литературы:

- 1 Александровская, Л. Н. Безопасность и надежность технических систем : Учебное пособие / Александровская Л. Н. - Москва : Логос, 2008. - 376 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-98704-115-5
- 2 Хорольский, В. Я. Надежность электроснабжения : учеб. пособие для вузов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. - Москва : Форум, 2014. - 126 с. : ил., табл. ; 21. - Библиогр.: с. 123-124. - ISBN 978-5-91134-796-3
- 3 Шилова, З. В. Теория вероятностей и математическая статистика Электронный ресурс : Учебное пособие / З. В. Шилова, О. И. Шилов. - Саратов : Ай Пи Ар Букс, 2015. - 158 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-906-17262-4

Перечень дополнительной литературы:

- 1 Воропай, Н. И. (1943-). Надежность систем электроснабжения : конспект лекций / Н.И. Воропай ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Иркутский гос. техн. ун-т, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. - Новосибирск : Наука, 2006. - 205 с. : ил. ; 20. - Библиогр.: с. 181 (12 назв.). - ISBN 5-02-032545-7
- 2 Калинин, В. Ф. Надежность систем электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / В. Ф. Калинин, А. В. Кобелев, С. В. Кочергин. - Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2011. - 81 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-8265-1042-1
- 3 Секретарев, Ю. А. Надежность электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. А. Секретарев. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. - 105 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-1517-7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе студента
по дисциплине «Надежность электроснабжения»
для студентов специальности 130302 «Электроэнергетика и электротехника»

Ставрополь
2026

Данные методические указания составлены с учетом основных квалификационных требований, обязательных знаний и навыков, необходимых для подготовки инженера – энергетика. Методические указания предназначены для выполнения практических занятий студентами специальности 130302 «Электроэнергетика и электротехника». В рамках самостоятельной работы рассматриваются следующие вопросы:

- расчет эмпирической вероятности случайной величины;
- оценка вероятности состояния системы по известным вероятностям состояний входящих в нее элементов;
- моделирование случайной нагрузки с помощью метода статистических испытаний

Поскольку базой основных понятий и моделей, рассматриваемых в рамках практических занятий, являются модели теории вероятностей, недостаточно или не всегда изучаемые студентами, методические указания содержат необходимые сведения из теории вероятностей.

Составитель: Петров А.В.

Содержание

Задание № 1 – Расчет эмпирической вероятности случайной величины (на примере короткого замыкания)

Задание № 2 – Расчет попадания случайной величины в заданный интервал (на примере короткого замыкания)

Задание № 3 – Оценка вероятности состояния системы по известным вероятностям состояний входящих в нее элементов

Задание № 4 – Оценка вероятности состояния системы с использованием формулы полной вероятности.

Задание № 5 – Определение закона распределения случайной величины коэффициента искажения.

Список рекомендуемой литературы

Приложения

Приложение А – Квантили распределения χ^2

Задание № 1

Расчет эмпирической вероятности случайной величины (на примере короткого замыкания)

1.1 Теоретическая часть

Математическое понятие вероятности случайного события является абстрактной характеристикой. Вероятности $\mp$ основная числовая характеристика случайного события: она является мерой его объективной возможности. Если проведено N испытаний, при этом в n из них наблюдалось событие A , то относительная частота случайного события A

$$P^*(A) = n/N \quad (1.1)$$

При небольшом числе опытов частота события носит в значительной мере случайный характер и может заметно изменяться от одной группы опытов к другой. При увеличении числа опытов частота события все более теряет свой случайный характер, проявляет тенденцию стабилизироваться, приближаясь с незначительными колебаниями к некоторой средней, постоянной величине — *его вероятности*. Очевидно, что

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

Несколько событий в опыте образуют *полную группу событий*, если в результате опыта непременно должно появиться хотя бы одно из них.

Несколько событий называются *несовместными* в данном опыте, если никакие два из них не могут появиться вместе.

Несколько событий в данном опыте называются *равновозможными*, если по условиям симметрии есть основания считать, что ни одно из этих событий не является объективно более возможным, чем другие. *Практически невозможным событием* называется событие, вероятность которого не в точности равна нулю, но весьма близка к нулю. *Практически достоверным событием* называется событие, вероятность которого не в точности равна единице, но весьма близка к единице.

Пример 1.1. Число коротких замыканий в сетях 500 кВ за период с 1961 по 1977 годы по европейской части СССР составило $K^{(1)} = 1447$ (однофазные); $K^{(2)} = 26$ (двухфазные); $K^{(1,1)} = 28$ (двухфазные на землю); $K^{(3)} = 36$ (трехфазные);

всего 1537 (3). Определить относительные частоты появления отдельных видов к.з.

Воспользовавшись формулой (1.1), получим:

$$P^*(K^{(1)}) = \frac{1447}{1537} = 0,942, \quad P^*(K^{(2)}) = 0,017,$$

$$P^*(K^{(1,1)}) = 0,018, \quad P^*(K^{(3)}) = 0,023.$$

1.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1. В процессе эксплуатации участка системы электроснабжения за определенный промежуток времени было зафиксировано следующее количество коротких замыканий различного вида: $K^{(1)} = n_1$; $K^{(2)} = n_2$; $K^{(1,1)} = n_3$; $K^{(3)} = n_4$.

Определить эмпирические вероятности возникновения каждого вида к. з. Исходные данные n_1, n_2, n_3, n_4 взять из таблицы 1.1.

Таблица 1.1 – Исходные данные к задаче 1.1.

Первая цифра варианта	n_1	n_2	Вторая цифра варианта	n_3	n_4
0	42	8	0	8	12
1	100	16	1	9	11
2	53	24	2	14	7
3	70	43	3	22	14
4	120	52	4	33	31
5	146	27	5	35	20
6	231	69	6	9	16
7	190	30	7	18	15
8	745	147	8	24	5
9	338	105	9	19	4

Задача 1.2. В процессе измерения нагрузки за сутки был получен следующий статистический ряд (таблица 1.2) описывающий время нахождения нагрузки в различных интервалах.

Таблица 1.2 – Время нахождения нагрузки в заданных пределах

Интервал нагрузки ΔP , кВт	100 - 199	200 - 299	300 - 399	400 - 499	500 - 599	600 - 699
Суммарное время нахождения в интервале t , ч	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6

Требуется определить:

- 1) Вероятность превышения заданной нагрузки $P_{з. min}$ в произвольный момент времени.
- 2) Вероятность нахождения нагрузки в заданном интервале ($P_{з. min}; P_{з. max}$) в произвольный момент времени.

Таблица 1.1 – Исходные данные к задаче 1.1.

Первая цифра варианта	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	Вторая цифра варианта	$P_{з. min}$	$P_{з. max}$
0	4	2	6	8	1	3	0	200	400
1	1	3	4	6	8	2	1	300	500
2	2	4	8	3	6	1	2	400	500
3	2	3	4	6	8	1	3	200	400
4	3	1	2	4	8	6	4	300	600
5	6	8	4	3	2	1	5	400	600
6	8	6	4	3	1	2	6	200	600
7	2	2	6	7	3	4	7	300	700
8	6	8	5	3	1	1	8	400	700
9	3	4	6	1	8	2	9	200	700

1.3 Контрольные вопросы

1. Что называется «полной группой событий»? Приведите примеры.
2. Как определяется статистическая вероятность?
3. Приведите примеры совместных и несовместных случайных событий.
4. Чему равна вероятность достоверного события?

Задание № 2

Расчет попадания случайной величины в заданный интервал (на примере короткого замыкания)

2.1 Теоретическая часть

Пусть X - случайная величина, принимающая случайные значения на интервале $-\infty < x < \infty$. Исчерпывающее описание статистических свойств X дает функция распределения $F(X)$, которая равна вероятности того, что случайная величина X примет значение, равное или меньшее конкретного x :

$$F(x) = P(X \leq x).$$

Функция распределения случайной величины является неубывающей, значение которой лежит в интервале $0 \leq F(x) \leq 1$. Имеют место предельные равенства $F(-\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$. Производная функция распределения:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

есть плотность распределения вероятностей данной случайной величины. При этом размерность плотности распределения обратна размерности случайной величины

Плотность распределения вероятностей должна удовлетворять условию не отрицательности $f(x) \geq 0$ и условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.1)$$

Для описания основных свойств распределения случайной величины применяют начальные и центральные моменты.

Для непрерывной случайной величины X начальным моментом s -го порядка называют интеграл:

$$\alpha_s[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx,$$

центрального момента s -го порядка интеграл:

$$\mu_s[x] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^s f(x) dx.$$

Важнейшую роль играет начальный момент первого порядка, так называемое *математическое ожидание*:

$$\alpha_1 = m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

Важнейший центральный момент – дисперсия:

$$\mu_2 = \sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx$$

Квадратный корень из дисперсии σ_x называется *среднеквадратическим отклонением*.

Если случайная величина X лежит в пределах некоторого определенного интервала и все значения x одинаково вероятны, то случайная величина X распределяется *по закону равномерной плотности*:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x_2 - x_1} & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0 & \text{при } x_2 \leq x \leq x_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Фундаментальное значение имеет *нормальный закон распределения*, который характеризует плотность вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

Функция распределения нормальной величины:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(\xi - m)^2}{2\sigma^2}\right] d\xi$$

Замена переменной $t = (\xi - m_x) / \sigma_x$ позволяет получить:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-m}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$$

$\Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$ - *функция Лапласа*, которая относится к классу специальных

функций, ее значения табулированы.

Вероятность появления случайной величины X со значением $x_1 \leq x \leq x_2$ при известной плотности распределения:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

и равна площади S_2 (рисунок 2.1):

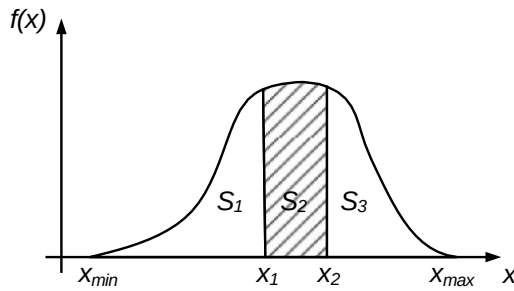


Рисунок 2.1 - Определение вероятности попадания случайной величины X на заданный отрезок.

$$S_2 = P(x_1 \leq X \leq x_2) = S_2 / S_{\Sigma}$$

При этом:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 = 1$$

Если случайная величина Y связана со случайной величиной X однозначной функциональной зависимостью $y=y(x)$, то закон распределения величины Y :

$$F(y) = P(y_{\min} \leq Y \leq y) = P(x_{\min} \leq X \leq x) = \int_{x_{\min}}^x f(x) dx = \int_{x_{\min}}^{\phi(y)} f(x) dx \quad (2.4),$$

где ϕ - функция, обратная y .

Если функция $y(x)$ неоднозначно определяет зависимость величин Y и X , то функция распределения представляется несколькими слагающими (рисунок 2.2).

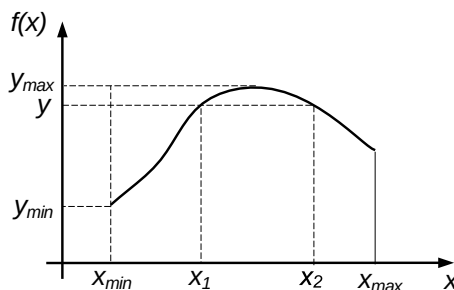


Рисунок 2.2 - Неоднозначная зависимость случайных величин:

$$F(y) = P(y_{\min} \leq Y \leq y) = P(x_{\min} \leq X \leq x_1) + P(x_2 \leq X \leq x_{\max})$$

Пример 2.1. фаза включения тока к.з. при грозовых перенапряжениях имеет равномерный закон распределения. Определить закон распределения апериодической слагающей тока к.з. в момент замыкания ($t = 0$), пренебрегая величиной тока предшествующего режима.

Апериодическая слагающая в момент к.з:

$$I_a = \phi(\alpha) = I_m \cos \alpha$$

где I_m , - амплитуда периодической составляющей тока к.з. Обратная функция имеет вид:

$$\Psi(I_a) = \alpha = \arccos \frac{I_a}{I_m}$$

Функция $\phi(\alpha)$ неоднозначна и симметрична. Учитывая симметричность $\phi(\alpha)$, выражение для плотности распределения можно записать только для отрезка $0 \div \frac{\pi}{2}$.

При выполнении условия нормировки (2.3) согласно (2.4):

$$f(\alpha) = \frac{2}{\pi} \text{ при } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

$$f(\alpha) = 0 \text{ при } 0 \geq \alpha \geq \frac{\pi}{2}$$

Тогда:

$$F(I_a) = \int_0^{\arccos(I_a/I_m)} \frac{2}{\pi} d\alpha = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{I_a}{I_m}$$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.1. Случайная величина места короткого замыкания вдоль линии длиной L распределена по равномерному закону.

Определить параметр закона распределения и вероятность возникновения к.з. на участке от l_{min} до l_{max} .

Исходные данные взять из таблицы 2.1.

Задача 2.2. Напряжение на шинах источника питания в момент короткого замыкания является нормально распределенной величиной с математическим ожиданием m_U и среднеквадратическим отклонением σ_U .

Определить вероятность попадания случайного напряжения в диапазон от U_{min} до U_{max} .

Найти границу интегральной вероятности 0,95.

Исходные данные взять из таблицы 2.2.

Таблица 2.1 – Исходные данные для задачи 2.1.

Первая цифра варианта	$L, м$	Вторая цифра варианта	$l_{min}, м$	$l_{max}, м$
0	200	0	100	120
1	300	1	220	270
2	400	2	240	300
3	500	3	0	180
4	700	4	50	340
5	850	5	400	800
6	900	6	200	650
7	150	7	10	90
8	180	8	100	120
9	130	9	20	130

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2.2.

Первая цифра варианта	$m_U, В$	$\sigma_U, В$	Вторая цифра варианта	$U_{min}, В$	$U_{max}, В$
0	370	10	0	370	380
1	375	15	1	370	400
2	380	5	2	380	385
3	385	10	3	390	400
4	390	15	4	350	370
5	395	5	5	380	390
6	400	20	6	390	405
7	405	10	7	400	430
8	410	15	8	380	385
9	415	5	9	400	410

2.3 Контрольные вопросы

1. Что характеризует среднеквадратическое отклонение?
2. Как производится замена переменных для получения нормированного нормального закона распределения?
3. Для чего служит функция Лапласа?
4. Что называется центральным моментом второго порядка?
5. Сформулируйте условие нормировки функции плотности вероятности.

Задание № 3

Оценка вероятности состояния системы по известным вероятностям состояний входящих в нее элементов

3.1 Теоретическая часть

На практике обычно требуется определять вероятности событий, непосредственное экспериментальное воспроизведение которых затруднено. Такая оценка производится для того, чтобы выявить наиболее рациональные конструктивные параметры элементов проектируемой, перспективной техники.

Поэтому, как правило, для определения вероятностей событий применяются не непосредственные прямые методы, а косвенные, позволяющие по известным вероятностям одних событий определять вероятности других событий, связанных с ними. Теория вероятностей, в основном, и представляет собой систему таких косвенных методов, пользование которыми позволяет свести необходимый эксперимент к минимуму.

Перед тем как формулировать основные теоремы, введем вспомогательные понятия о *сумме событий* и *произведении событий*.

Суммой двух событий A и B называется событие C , состоящее в выполнении события A или события B , или обоих вместе.

Пример 3.1. К трансформатору подведено два питающих кабеля. На трансформаторе будет напряжение (событие C), если включить первый кабель (событие A) или включить второй кабель (событие B) или оба вместе.

Если события A и B несовместны, то естественно, что появление обоих этих событий вместе отпадает, и сумма событий A и B сводится к появлению или события A , или события B .

Другими словами, *суммой двух событий A и B* называется событие C , состоящее в появлении хотя бы одного из событий A и B .

Суммой нескольких событий называется событие, состоящее в появлении хотя бы одного из этих событий.

Произведением двух событий A и B называется событие C , состоящее в совместном выполнении события A и события B .

Произведением нескольких событий называется событие, состоящее в совместном появлении всех этих событий.

Теорема сложения вероятностей

Теорема сложения вероятностей формулируется следующим образом.

Вероятность суммы двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A + B) = P(A) + P(B)$$

Обобщим теорему сложения на случай трех событий. Обозначая событие $A + B$ буквой D и присоединяя к сумме еще одно событие C , легко доказать, что

$$\begin{aligned} P(A + B + C) &= P(D + C) = P(D) + P(C) = \\ &= P(A + B) + P(C) = P(A) + P(B) + P(C) \end{aligned}$$

Методом полной индукции можно обобщить теорему сложения на произвольное число несовместных событий n .

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n)$$

Она в общем виде записывается в виде: $P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i)$

Следствия, вытекающие из теоремы сложения вероятностей.

С л е д с т в и е 1. Если события $A_1, A_2, \dots, A_n$ образуют полную группу несовместных событий, то сумма их вероятностей равна единице:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$$

Перед тем, как записать второе следствие теоремы сложения, определим понятие о «противоположных событиях».

Противоположными событиями называются два несовместных события, образующих полную группу.

Событие, противоположное событию A , принято обозначать $\bar{A}$.

С л е д с т в и е 2. Сумма вероятностей противоположных событий равна единице: $P(A) + P(\bar{A}) = 1$

Как указывалось выше, теорема сложения вероятностей справедлива только для несовместных событий. В случае, когда события A и B совместны, вероятность суммы этих событий выражается формулой

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB)$$

Аналогично вероятность суммы трех совместных событий вычисляется по формуле

$$P(A+B+C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AB) - P(AC) - P(BC) + P(ABC)$$

Аналогичные формулы можно написать для произведения событий.

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A+B)$$

При этом:

$$P(ABC) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A+B) - P(A+C) - P(B+C) + P(A+B+C)$$

Общая формула, выражающая вероятность произведения произвольного числа событий через вероятности сумм этих событий, взятых по одному, по два, по три и т. д., имеет вид:

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

В зависимости от конкретной задачи иногда бывает удобнее пользоваться только суммами, а иногда только произведениями событий. Для преобразования одних в другие и служат приведенные формулы.

Теорема умножения вероятностей

Прежде, чем начать излагать теорему умножения вероятностей, введем еще одно понятие: понятие о независимых и зависимых событиях.

Событие A называется независимым от события B, если вероятность события A не зависит от того, произошло событие B или нет.

Событие A называется зависимым от события B, если вероятность события A меняется в зависимости от того, произошло событие B или нет.

Вероятность произведения двух событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную при условии, что первое имело место:

$$P(AB) = P(A)P(B/A)$$

При применении теоремы умножения безразлично, какое из событий A и B считать первым, а какое вторым, и теорему умножения можно записать и в таком виде:

$$P(AB) = P(B)P(A/B)$$

С л е д с т в и е 1. Если событие A не зависит от события B , то и событие B не зависит от события A .

Два события называются независимыми, если появление одного из них не изменяет вероятности появления другого.

Понятие независимости событий может быть распространено на любое число событий. Несколько событий называются независимыми, если любое из них не зависит от любой совокупности остальных.

С л е д с т в и е 2. Вероятность произведения двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Вероятность произведения нескольких событий равна произведению вероятностей этих событий, причем вероятность каждого следующего по порядку события вычисляется при условии, что все предыдущие имели место:

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1)P(A_2 | A_1)P(A_3 | A_1 A_2) \dots P(A_n | A_1 A_2 \dots A_{n-1})$$

Для независимых событий теорема упрощается и принимает вид

$$P(A_1 A_2 \dots A_n) = P(A_1)P(A_2)P(A_3) \dots P(A_n)$$

т. е. вероятность произведения независимых событий равна произведению вероятностей этих событий.

Применяя знак произведения, теорему можно записать в виде:

$$P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i)$$

Пример 3.2. Имеем распределительный пункт (РП) с четырьмя отходящими линиями к потребителям (П). Потребители имеют номинальную нагрузку: Π_1 – 20 кВт; Π_2 – 30 кВт; Π_3 – 20 кВт; Π_4 – 30 кВт. Вероятность включенного состояния потребителей соответственно равна P_1 – 0,3; P_2 – 0,4; P_3 – 0,2; P_4 – 0,8.

Определить вероятность того, что питающий РП кабель будет загружен на 100 %.

Решение. События включения потребителей – события независимые. Обозначим через A событие полной загрузки питающего РП кабеля. Тогда

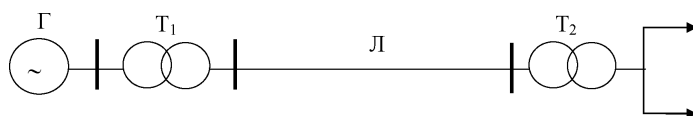
$$P(A) = P_1 P_2 P_3 P_4 = 0,3 \times 0,3 \times 0,2 \times 0,8 = 0,192$$

Из примера видно, что хотя вероятности работы каждого потребителя в отдельности достаточно велики, вероятность же одновременной работы всех четырех потребителей *на порядок* ниже. Это обстоятельство следует учитывать при выборе кабелей и электрооборудования.

На практике сравнительно редко встречаются задачи, в которых нужно применять только теорему сложения или только теорему умножения вероятностей. Обычно приходится применять совместно обе теоремы. При этом чаще всего, событие, вероятность которого требуется определить, представляется в виде суммы нескольких несовместных событий (вариантов данного события), каждое из которых в свою очередь является произведением событий.

3.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.1. На рисунке приведена система электроснабжения, состоящая из источника питания Γ , повышающего трансформатора T_1 , линии электропередач $Л$ и понижающего трансформатора T_2



Вероятности отказа элементов системы электроснабжения обозначены как q с соответствующим индексом и приведены в таблице 3.1. Определить в общем виде вероятность отказа системы электроснабжения.

Задача 3.2. Экскаватор производит вскрытие кабельной траншеи. При этом он три раза ковшем зацепил кабель. Вероятность повреждения кабеля при первом зацеплении P_1 ; при втором – P_2 ; при третьем – P_3 .

Найти вероятность того, что в результате этих трех зацеплений кабель будет поврежден: а) ровно один раз; б) хотя бы один раз.

Исходные данные приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Исходные данные к задаче 3.1

Первая цифра варианта	$q_{Г}$	$q_{ГЛ}$	Вторая цифра варианта	$q_{Л}$	$q_{ЛГ}$
0	0,3	0,35	0	0,1	0,15
1	0,2	0,15	1		0,35
2	0,25	0,3	2	0,15	0,1
3	0,15	0,2	3	0,25	0,35
4	0,35	0,25	4	0,3	0,05
5	0,1	0,05	5	0,05	0,3
6	0,05	0,3	6	0,1	0,25
7	0,1	0,2	7	0,05	0,35
8	0,35	0,05	8	0,2	0,01
9	0,05	0,1	9	0,15	0,2

Таблица 3.2 – Исходные данные к задаче 3.2.

Первая цифра варианта	P_1	P_2	Вторая цифра варианта	P_3
0	0,1	0,3	0	0,34
1	0,15	0,2	1	0,32
2	0,2	0,25	2	0,33
3	0,25	0,3	3	0,31
4	0,35	0,4	4	0,41
5	0,1	0,2	5	0,21
6	0,15	0,3	6	0,42
7	0,2	0,3	7	0,33
8	0,25	0,35	8	0,39
9	0,25	0,4	9	0,44

3.3 Контрольные вопросы

1. Чему равна вероятность произведения двух независимых событий?
2. Что такое «условная вероятность»? Приведите примеры.
3. Чему равна сумма вероятностей событий, образующих полную группу?
4. Что такое «сумма событий» и «произведение событий»?
5. Сформулируйте теорему сложения вероятностей для совместных и несовместных событий?

Задание № 4

Оценка вероятности состояния системы с использованием формулы полной вероятности

4.1 Теоретическая часть

Формула полной вероятности

Формула полной вероятности является следствием обеих основных теорем – теоремы сложения вероятностей и теоремы умножения вероятностей.

Пусть требуется определить вероятность некоторого события A , которое может произойти вместе с одним из событий:

$H_1, H_2, \dots, H_n$, образующих полную группу несовместных событий. Будем эти события называть *гипотезами*.

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ образуют полную группу, то событие A может появиться только в комбинации с какой-либо из этих гипотез:

$$A = H_1A + H_2A + \dots + H_nA$$

Так как гипотезы $H_1, H_2, \dots, H_n$ несовместны, то и комбинации $H_1A + H_2A + \dots + H_nA$ также несовместны. Применяя к ним теорему сложения вероятностей, получим:

$$P(A) = P(H_1A) + P(H_2A) + \dots + P(H_nA) = \sum_{i=1}^n P(H_iA)$$

Применяя к событию H_iA теорему умножения, получим:

$$P(A) = P(H_1)P(A|H_1) + P(H_2)P(A|H_2) + \dots + P(H_n)P(A|H_n)$$

Полученная формула и есть *формула полной вероятности*.

Пример 4.1. Вдоль линии электропередач (ЛЭП) происходит три грозовых разряда. Вероятность попадания в ЛЭП первого грозового разряда равна 0,4; второго – 0,5; третьего – 0,7. ЛЭП выходит из строя при одном попадании молнии с вероятностью 0,2; при двух попаданиях с вероятностью 0,6 и при трех попаданиях с вероятностью 1,0. Найти вероятность того, что в результате грозовых разрядов ЛЭП вышла из строя.

Решение. Рассмотрим четыре гипотезы:

H_0 – в ЛЭП не попало ни одного грозового разряда;

H_1 – в ЛЭП попал один разряд молнии;

H_2 – в ЛЭП попало два разряда молнии;

H_3 – в ЛЭП попало три разряда молнии.

Очевидно, что эти гипотезы имеют место при следующих сочетаниях событий, образующих несколько несовместных вариантов:

$$H_0 = \overline{B_1} \overline{B_2} B_3$$

$$H_1 = \overline{B_1} B_2 B_3 + \overline{B_1} B_2 \overline{B_3} + \overline{B_1} \overline{B_2} B_3$$

$$H_2 = B_1 B_2 B_3 + B_1 B_2 \overline{B_3} + B_1 \overline{B_2} B_3$$

$$H_3 = B_1 B_2 \overline{B_3}$$

где B_1, B_2, B_3 – попадание молнии в ЛЭП при первом, втором и третьем грозовом разряде соответственно.

Пользуясь теоремами сложения, умножения и свойством противоположных событий, найдем вероятности этих гипотез.

$$P(H_0) = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,3 = 0,09;$$

$$P(H_1) = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,3 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,3 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,7 = 0,36;$$

$$P(H_2) = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,7 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,3 = 0,41;$$

$$P(H_3) = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,7 = 0,14.$$

Условные вероятности события A (выход из строя ЛЭП) при этих гипотезах

$$P(A|H_0) = 0; P(A|H_1) = 0,2; P(A|H_2) = 0,6; P(A|H_3) = 1,0$$

Применяя формулу полной вероятности, получим:

$$\begin{aligned} P(A) &= P(H_0)P(A|H_0) + P(H_1)P(A|H_1) + P(H_2)P(A|H_2) + P(H_3)P(A|H_3) = \\ &= 0,09 \times 0 + 0,36 \times 0,2 + 0,41 \times 0,6 + 0,14 \times 1,0 = 0,458 \end{aligned}$$

Из результатов расчета видно, что первую гипотезу H_0 можно было бы не рассматривать, так как соответствующий член в формуле полной вероятности обращается в нуль. Так обычно и поступают при применении формулы полной вероятности, рассматривая не полную группу несовместных гипотез, а только те из них, при которых данное событие возможно.

Теорема гипотез (формула Байеса)

Следствием теоремы умножения и формулы полной вероятности является так называемая *теорема гипотез* или формула Байеса.

Поставим задачу. Имеется полная группа несовместных гипотез $H_1, H_2, \dots, H_n$. Вероятности этих гипотез до опыта известны и равны соответственно $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$. Произведен опыт, в результате которого имело место событие A , спрашивается, как следует изменить вероятности гипотез в связи с появлением этого события?

По существу речь идет о том, чтобы найти условную вероятность $P(H_i|A)$ для каждой гипотезы.

Из теоремы умножения имеем:

$$P(AH_i) = P(A)P(H_i | A) = P(H_i)P(A|H_i)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Из последнего уравнения, отбрасывая левую часть, находим:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A|H_i)}{P(A)}$$

Выражая $P(A)$ с помощью формулы полной вероятности, имеем:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A|H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A|H_i)}$$

Полученная формула носит название *формулы Байеса* или *теоремы гипотез*.

4.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.1. Кабель, питающий трансформаторную подстанцию, работает в двух режимах: а) номинальном; б) с перегрузкой.

Первый режим работы составляет A % времени эксплуатации, а второй – B %. Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t в номинальном режиме равна P_1 ; во втором – P_2 .

Требуется найти:

1. Вероятность выхода кабеля из строя в течение времени t .
2. Кабель вышел из строя. Какова вероятность того, что он вышел из строя, работая в первом режиме?

Исходные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные к задаче 4.1

Первая цифра варианта	A	B	Вторая цифра варианта	P_1	P_2
0	60	40	0	0,3	0,43
1	63	37	1	0,33	0,4
2	65	35	2	0,35	0,44
3	67	33	3	0,4	0,45
4	70	30	4	0,42	0,5
5	73	27	5	0,45	0,49
6	75	25	6	0,2	0,33
7	77	23	7	0,23	0,3
8	80	20	8	0,25	0,35
9	85	15	9	0,15	0,4

4.3 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте теорему гипотез.
2. Применима ли формула полной вероятности для несовместных событий?
3. Из каких теорем выводится формула полной вероятности?

Задание № 5

Определение закона распределения случайной величины коэффициента искажения

5.1 Теоретическая часть

При экспериментальной обработке случайных процессов основная задача сводится к определению вида функции распределения и параметров распределения исследуемой случайной величины.

При большом числе наблюдений весь диапазон полученных значений случайной величины делится на интервалы и подсчитывается количество попаданий случайной величины в каждый интервал. Это число делится на общее число наблюдений и определяется статистическая вероятность попадания случайной величины в каждый из интервалов. Сумма статистических вероятностей всех интервалам равна единице.

Полученная статистика оформляется в виде гистограммы. По оси абсцисс

откладываются интервалы случайной величины, на каждом из них строится прямоугольник, площадь которого равна статистической вероятности попадания случайной величины в данный интервал.

По виду гистограммы выдвигают гипотезу о предполагаемом законе распределения случайной величины и статистически определяют его параметры. В тех же осях строят теоретическую кривую (рисунок 5.1) и определяют теоретические вероятности попадания случайной величины в каждый интервал.

Как правило, между теоретической кривой и статистическим распределением (гистограммой) имеется некоторое расхождение (см. рисунок 5.1). Проверка гипотезы о соответствии теоретической кривой полученной статистике осуществляется с помощью критериев согласия. Наиболее часто используются критерии χ^2 и Колмогорова.

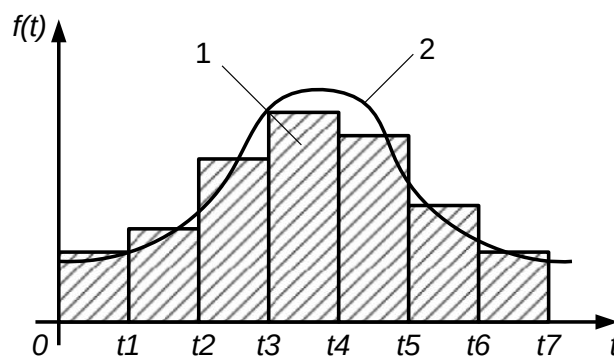


Рисунок 5.1 – К определению вида закона распределения случайной величины (1 – гистограмма, 2 – кривая теоретического распределения)

При применении критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределением рассматривается максимальное значение модуля разности между теоретической и экспериментальной интегральными функциями распределения. Условие соответствия выбранного теоретического закона распределения эмпирической статистике:

$$\Delta x = \Delta F \sqrt{N} \leq 1,$$

где $\Delta F = \max|F^*(t) - F(t)|$ – наибольшее отклонение экспериментальной кривой от теоретической; N – общее число наблюдений.

При использовании критерия согласия χ^2 определяется мера расхождения:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - N p_i)^2}{N p_i},$$

где k – число интервалов статистического ряда; p_i – теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -й интервал; N – общее число наблюдений.

По таблицам, приведенным в приложении А, для каждого значения χ^2 с учетом количества степеней свободы s можно найти доверительную вероятность P_d согласования теоретического и экспериментального распределений. Если $P_d > 0,1$ то гипотезу о предполагаемом законе распределения можно принять.

Количество степеней свободы:

$$s = k - g - 1$$

здесь g – количество параметров распределения.

Следует отметить, что применение критерия χ^2 обосновано при $N \geq 50$ и $k \geq 6$.

5.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.1. В результате обработки статистических данных были получены статистические данные о случайной величине наработки на отказ и представлены в виде вариационного ряда (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Вариационный ряд

$T_i, \%$	$0 - T_1$	$T_1 - T_2$	$T_2 - T_3$	$T_3 - T_4$	$T_4 - T_5$	$T_5 - T_6$
Кол-во попаданий случайной величины в интервал	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6

По данным вариационного ряда выдвинуть гипотезу о законе распределения случайной величины и проверить ее, используя критерии согласия χ^2 и Колмогорова.

Исходные данные – T_i и n_i представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исходные данные к задаче 5.1

Исходные данные	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
По первой цифре варианта										
n_1	3	4	6	5	8	9	8	7	6	7
n_2	2	3	5	4	7	8	8	7	4	9
n_3	3	4	6	7	9	7	7	6	6	7
n_4	4	5	4	6	7	8	7	7	5	9
n_5	2	3	7	7	8	7	6	8	6	7
n_6	3	5	5	5	6	9	9	6	7	8
По второй цифре варианта										
T_1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	4
T_2	2	3	4	4	6	3	5	3	3	8
T_3	3	4	5	6	9	5	6	4	5	12
T_4	4	5	6	8	12	7	7	6	7	14
T_5	5	6	7	10	15	9	8	8	8	16
T_6	7	7	8	12	18	11	9	10	9	18

5.3 Контрольные вопросы

1. В каких случаях обосновано применение критерия χ^2 ?
2. Чем следует руководствоваться при выборе гипотезы о предполагаемом законе распределения?
3. Чему равна площадь прямоугольников составляющих гистограмму?
4. Чему равна площадь гистограммы?
5. Как выбрать масштаб для построения гистограммы?

Список рекомендуемой литературы:

1. Вентцель Е. С. «Теория вероятностей», М.: Наука, 1979 г.
2. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. «Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений», М.: Наука, 1969.
3. Фокин Ю.А. Вероятностно-статические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат. 1985.

Приложение А

Таблица А.1 – Квантили распределения χ^2

S	Вероятность Р _д							
	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	1,07	1,64	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88	10,8
2	2,41	3,22	4,61	5,99	7,38	9,21	10,6	13,8
3	3,67	4,64	6,25	7,81	9,35	11,3	12,8	16,3
4	4,88	5,99	7,78	9,49	11,1	13,3	14,9	18,5
5	6,06	7,29	9,24	11,1	12,8	15,1	16,7	20,5
6	7,23	8,56	10,6	12,6	14,4	16,8	18,5	22,5
7	8,38	9,80	12,0	14,1	16,0	18,5	20,3	24,3
8	9,52	11,0	13,4	15,5	17,5	20,1	22,0	26,1
9	10,7	12,2	14,7	16,9	19,0	21,7	23,6	27,6
10	11,8	13,4	16,0	18,3	20,5	23,2	25,2	29,6
11	12,9	14,6	17,3	19,7	21,9	24,7	26,8	31,6
12	14,0	15,8	18,5	21,0	23,3	26,2	28,3	32,9

Перечень основной литературы:

- 1 Александровская, Л. Н. Безопасность и надежность технических систем : Учебное пособие / Александровская Л. Н. - Москва : Логос, 2008. - 376 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-98704-115-5
- 2 Хорольский, В. Я. Надежность электроснабжения : учеб. пособие для вузов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. - Москва : Форум, 2014. - 126 с. : ил., табл. ; 21. - Библиогр.: с. 123-124. - ISBN 978-5-91134-796-3
- 3 Шилова, З. В. Теория вероятностей и математическая статистика Электронный ресурс : Учебное пособие / З. В. Шилова, О. И. Шилов. - Саратов : Ай Пи Ар Букс, 2015. - 158 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-906-17262-4

Перечень дополнительной литературы:

- 1 Воропай, Н. И. (1943-). Надежность систем электроснабжения : конспект лекций / Н.И. Воропай ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Иркутский гос. техн. ун-т, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. - Новосибирск : Наука, 2006. - 205 с. : ил. ; 20. - Библиогр.: с. 181 (12 назв.). - ISBN 5-02-032545-7
- 2 Калинин, В. Ф. Надёжность систем электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / В. Ф. Калинин, А. В. Кобелев, С. В. Кочергин. - Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2011. - 81 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-8265-1042-1
- 3 Секретарев, Ю. А. Надежность электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. А. Секретарев. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. - 105 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-1517-7

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к контрольной работе по дисциплине
«Надежность электроэнергетических систем»
для студентов специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника»
Направленность (профиль): "Электроэнергетические системы и сети"

Ставрополь
2026

В рамках контрольной работы студент должен решить комплексную задачу расчета надежности сложной системы с использованием методов и подходов, рассмотренных в различных темах дисциплины.

Числовые исходные данные для задач генерируются специальной программой в соответствии с заданным студенту вариантом.

Составитель: Петров А.В.

Содержание

Введение.....	4
1.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	7
1.2 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ.....	8
1.3 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ	11
1.4 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ....	13
1.5 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ БЕЗДЕФИЦИТНОЙ РАБОТЫ И ГОТОВНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ.....	16
1.6 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ВВОДА РЕЗЕРВА	18
2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ.....	19
2.1 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ВВОДА РЕЗЕРВА	24
3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СХЕМНОЙ (СТРУКТУРНОЙ) НАДЁЖНОСТИ .	27
3.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	27
3.2 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПИТАНИЯ УЗЛА НАГРУЗКИ	28

Введение

В данной контрольной работе ставится цель: сделать оценку надежности исследуемой энергосистемы.

Под надежностью энергосистемы (ЭС) будем понимать её свойство выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Функциями ЭС являются бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией требуемого качества и недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

Для того, чтобы сделать оценку надёжности, необходимо решить две задачи: задачу режимной надёжности и задачу схемной (структурной) надёжности.

В задаче режимной надёжности необходимо рассмотреть энергосистему в целом, основными элементами которой будут являться нагрузка и генерирующая часть, описываемые случайными величинами. Эта задача предполагает выявление таких состояний энергосистемы, в которых возникает дефицит, т.е. превышение мощности нагрузки над располагаемой мощностью генерирующей части и как следствие недоотпуска электроэнергии. Возникновение дефицита будет являться случайным событием.

В задаче схемной надёжности необходимо рассмотреть часть энергосистемы или схему, в которой элементами могут являться источник питания, распределительные устройства, ЛЭП, трансформаторы, нагрузка. Для решения данной задачи нужно выявить такое состояние схемы, когда нарушается связь между источником питания и потребителем. Это состояние также будет являться случайным событием.

Для задачи режимной надёжности необходимо сделать вывод о надёжности электроснабжения потребителей, а также указать величину вводимого резерва, если таковой необходим.

В итоге решения задачи схемной надёжности делается вывод о надёжности питания узла нагрузки и при необходимости указываются “слабые” места в связи между источником питания и нагрузкой.

Числовые исходные данные генерируются программой (файл «Zadanie_nad_ees.xls») в соответствии с индивидуальным номером варианта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РЕЖИМНОЙ НАДЁЖНОСТИ

Для выполнения главной функции ЭС, т.е. обеспечения качества и надежности электроснабжения потребителей, суммарный уровень мощности генерирующих агрегатов (располагаемой мощности энергосистемы) должен быть не менее прогнозируемого максимума нагрузки. При равенстве указанных мощностей любое снижение располагаемой мощности или увеличение нагрузки приводит к дефициту мощности и недоотпуску электроэнергии потребителям.

Перед тем как перейти к расчётам основных показателей режимной надёжности необходимо сформировать модель энергосистемы. Модель энергосистемы является вероятностной моделью. Главными элементами энергосистемы в рамках этой задачи являются генерирующая часть и нагрузка. Поэтому сначала формируются вероятностные модели этих элементов.

Модели элементов включают в себя создание ряда распределения случайной величины. Для модели генерирующей части случайной величиной является мощность генерирующей части, для модели нагрузки, соответственно, – мощность нагрузки. Для энергосистемы формируется ряд распределения различных состояний энергосистемы (бездефицитной работы или дефицита генерируемой мощности).

После этого проводится определение величины показателей надежности: коэффициента надежности (α) и коэффициента бездефицитной работы ($K_{БД}$), сравнение их с нормативными значениями, и, при необходимости делается вывод о введении резерва.

Введение резерва предполагает увеличение мощности генерирующей части.

1.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными являются суммарная мощность нагрузки энергосистемы, параметры этой нагрузки по периодам года, продолжительность периодов годового графика нагрузки; суммарная мощность генерирующей части энергосистемы, параметры однотипных генераторов.

Суммарную мощность нагрузки энергосистемы находим путём суммирования всех нагрузок, а точнее воспользуемся эквивалентом нагрузки $P_H = 4510$ МВт.

Разделим генераторы на всех электростанциях в энергосистеме на две группы и примем следующие параметры генераторов (таблица 1.1).

При этом величина суммарной мощности генераторов $P_G = 4700$ МВт.

В таблице 1.1 дана информация о номинальной мощности генераторов каждой группы, количество генераторов в каждой группе, коэффициент вынужденного простоя, который определяется как вероятность того, что генератор будет неработоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между плановыми ремонтами, длительность плановых ремонтов.

Таблица 1.1 – Параметры однотипных генераторов по группам

Номер группы генераторов	Мощность P_G , МВт	n_i , шт.	Коэффициент вынужденного простоя K_{Bi} , о.е.	Длительность плановых ремонтов t_{Pi} , мес.
1	500	3	0,02	1,5
2	800	4	0,02	1,5

В таблице 1.2 приведены параметры нагрузки для суток по периодом года. В таблице 1.3. приведена информация о продолжительности периодов годового графика нагрузки.

Таблица 1.2 – Параметры нагрузки для суток по периодам года

Время суток, час.	Время года	
	Зима	Лето
00-02	1804	1353
02-04	1353	902
04-06	2255	1804
06-08	4059	2255
08-10	3608	2255
10-12	3157	2255
12-14	3157	2029,5
14-16	3382,5	2255
16-18	3608	2480,5
18-20	4510	2029,5
20-22	4510	2255
22-24	3157	1804

Таблица 1.3 – Продолжительность периодов годового графика нагрузки

Длительности периодов t_j (месяцев)/ d_j (дней)	
Зимний t_1 / d_1	Летний t_2 / d_2
7/213	5/152

1.2 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ

На данном этапе необходимо перейти от событийной модели нагрузки к вероятностной модели в виде ряда распределения случайной величины. Для этого на основе параметров нагрузки для суток (таблица 1.2) определяется продолжительность действия каждой нагрузки в год $t_i(P_{ni})$, и строится годовой график нагрузки энергосистемы (рисунок 2). Случайной величиной будет являться та или иная мощность нагрузки, возникающая на определенном участке годового графика нагрузки. Ряд распределения случайной величины предполагает упорядоченное описание случайной величины в форме таблицы, где пронумерованы состояния нагрузки (номера ступеней графика нагрузки), приведены соответствующие им мощности в мегаваттах и расчетные значения вероятности этих состояний.

Статистические вероятности состояний определяем по формуле:

$$K_H^{P_{Hi}} = \frac{t_i(P_{Hi})}{8760}, \quad (1.1)$$

где i – номер ступени графика нагрузки; $t_i(P_{Hi})$ – продолжительность действия нагрузки с уровнем P_{Hi} в год.

В общем виде вероятностная модель представляется рядом распределения нагрузки:

$$K_H = \sum_{i=1}^N K_H^{P_{Hi}},$$

где N – количество интервалов, соответствующих количеству разных ступеней графика нагрузок P_{Hi} .

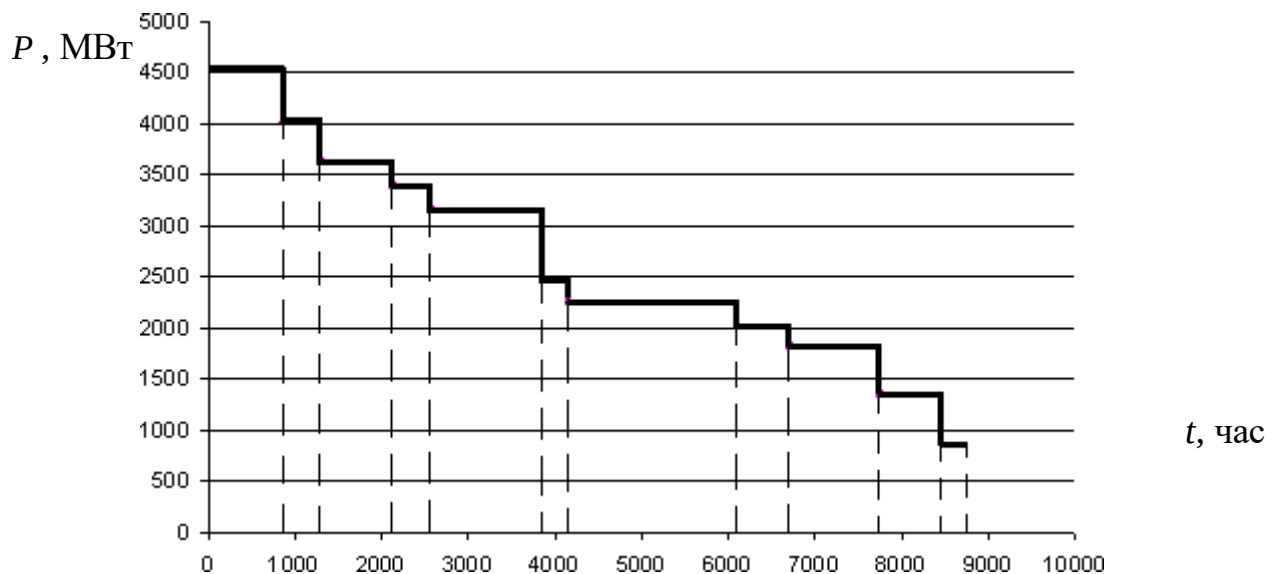


Рисунок 2. Годовой график нагрузки энергосистемы

Т.к. в результате предстоит сравнение полученных значений коэффициентов готовности и бездефицитной работы с нормативными значениями, имеющие третий порядок после запятой, то нам нужно получить величину, имеющую хотя бы на один порядок больше, то есть четвёртый. А на этот порядок в свою очередь будет влиять пятый порядок. Таким образом, все полученные результаты будем округлять до 5 знака после запятой.

Для упрощения расчётов воспользуемся программой MS Excel (рисунок 3-8).

Для рисунка 2 $t_1(P_{н1}) = 852$ ч, $t_2(P_{н2}) = 426$ ч, $t_3(P_{н3}) = 852$ ч при $P_{i1} = 4510$ МВт, $P_{н2} = 4059$ МВт, $P_{i3} = 3608$ МВт. Рассчитаем статистические вероятности данных состояний:

$$K_H^{4510} = \frac{852}{8760} = 0,09726;$$

$$K_H^{4059} = \frac{426}{8760} = 0,04863;$$

$$K_H^{3608} = \frac{852}{8760} = 0,09726.$$

Результаты расчётов для остальных состояний нагрузки приведены в приложении 1 (таблица 1.1).

	Представление нагрузки							
	00	02	04	06	08	10	12	14
Зимний график, о.е.	0,4	0,3	0,5	0,9	0,8	0,7	0,7	0,75
Летний график, о.е.	0,3	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,45	0,5
Зимний график, МВт	1804	1353	2255	4059	3608	3157	3157	3382,5
Летний график, МВт	1353	902	1804	2255	2255	2255	2029,5	2255
Сортировка ЗИМА	4510	4510	4059	3608	3608	3382,5	3157	3157
Длительность ЗИМА	213	213	213	213	213	213	213	213
Сортировка ЛЕТО	2480,5	2255	2255	2255	2255	2255	2029,5	2029,5
Длительность ЛЕТО	152	152	152	152	152	152	152	152
Величина нагрузки	4510	4059	3608	3382,5	3157	2480,5	2255	2029,5
Продолжительность действия	852	426	852	426	1278	304	1946	608
Годовая потребность в ЭЭ	3842520	1729134	3074016	1440945	4034646	754072	4388230	1233936
Продолжительность итогом	852	1278	2130	2556	3834	4138	6084	6692
Вероятность нагрузки	0,09726	0,04863	0,09726	0,04863	0,14589	0,03470	0,22215	0,06941

Рисунок 3. Формирование вероятностной модели нагрузки в MS Excel

Вероятностная модель нагрузки в общем виде:

$$K_H = \sum_{i=1}^{11} K_H^{P_{ni}} = 0,0347032^{902} + 0,083333^{1353} + 0,118037^{1804} + 0,069406^{2029,5} + 0,222146^{2255} +$$

$$+ 0,034703^{2480,5} + 0,14589^{3157} + 0,04863^{3382,5} + 0,09726^{3608} + 0,04863^{4059} + 0,09726^{4510}$$

1.3 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ

Задачей данного этапа является формирование вероятностной модели генерирующей части энергосистемы. Для этого каждое из состояний генерирующей части, определяемой мощностью генерирующей части, должно быть представлено вероятностью его возникновения, т.е. должен быть составлен ряд распределения генерирующей части.

Каждый из генераторов может находиться лишь в двух состояниях – работоспособном или вынужденном простое. Эти два состояния образуют полную группу событий и, следовательно,

$$K_G = 1 - K_B,$$

где K_G – коэффициент готовности, K_B – коэффициент вынужденного простоя.

Таким образом, задача сводится к построению ряда распределения коэффициентов готовности для генераторов каждой группы. А чтобы построить ряд распределения генерирующей части энергосистемы, нужно определить вероятности состояний генерирующей части путём перемножения коэффициентов готовности генераторов каждой группы, а также привести им в соответствие мощность генерирующей части для каждого состояния.

Если в задаче примем для i -ой группы n_i – количество агрегатов в группе, m_i – агрегаты в вынужденном простое; $(n_i - m_i)$ – агрегаты, находящиеся в работе, P_{Gi} – номинальная мощность агрегатов i -ой группы, то коэффициент рабочего состояния генераторов i -ой группы (коэффициент готовности) описывается формулой:

$$K_G^{(n_i - m_i)P_{Gi}} = C_n^{m_i} K_G^{(n_i - m_i)} K_B^{m_i}, \quad (1.2)$$

где $C_n^{m_i} = \frac{n_i!}{m_i!(n_i - m_i)!}$ – биномиальный коэффициент; $K_B^{m_i}$ – коэффициент вынужденного простоя m_i генераторов (m_i –

показатель степени); $K_{\Gamma}^{(n_i-m_i)}$ – коэффициент готовности генераторов i -ой группы ($(n_i - m_i)$ – показатель степени).

Вероятностную модель i -ой группы однотипных генераторов представим в виде алгебраического ряда распределения:

$$K_{\Gamma i} = K_{\Gamma}^{n_i P_{\Gamma i}} + K_{\Gamma}^{(n_i-1)P_{\Gamma i}} + K_{\Gamma}^{(n_i-2)P_{\Gamma i}} + \dots + K_{\Gamma}^{(n_i-m_i)P_{\Gamma i}} + \dots + K_{\Gamma}^{(n_i-n_i)P_{\Gamma i}}.$$

Определяем вероятность состояний генерирующей части для каждой группы генераторов.

Например, для первой группы генераторов при одном генераторе, находящемся в вынужденном простое ($n_1 = 3$, $m_1 = 1$, $(n_1 - m_1) = 2$, $C_n^{m_1} = 3$):

$$K_{\Gamma 1}^2 = C_n^{m_1} \cdot K_{\Gamma}^{(n_1-m_1)} \cdot K_{\Gamma}^{m_1} = 3 \cdot 0,98^2 \cdot 0,02^1 = 0,057624.$$

Аналогично расчеты проводятся для всех остальных состояний первой группы генераторов и для всех состояний второй группы генераторов.

Полученные результаты приведены в приложении 1 (таблица 1.2).

Перемножаем коэффициенты готовности двух групп генераторов между собой. Результат сводим в таблицу вероятностей состояний генерирующей части энергосистемы (приложение 1, таблица 1.3).

	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н
	Вероятность состояний генерирующей части энергосистемы						
	Располагаемое число генераторов для 2 группы						
			4	3	2	1	0
Располагаемое		3	0,86813	0,07087	0,00217	0,00003	0,00000
число		2	0,05315	0,00434	0,00013	0,00000	0,00000
генераторов		1	0,00108	0,00009	0,00000	0,00000	0,00000
для 1 группы		0	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Рисунок 4. Расчёт вероятности состояния генерирующей части в MS Excel

Сформируем возможные значения мощности генерирующей части (рисунок 5). На основе вероятности состояний генерирующей части энергосистемы и значений мощности для каждого из состояний строим ряд распределения.

I	J	K	L	M	N	O
	Значение мощности генерирующей части энергосистемы					
		Располагаемое число генераторов для 2 группы				
		4	3	2	1	0
Располагаемое	3	4700	3900	3100	2300	1500
число	2	4200	3400	2600	1800	1000
генераторов	1	3700	2900	2100	1300	500
для 1 группы	0	3200	2400	1600	800	0

Рисунок 5. Расчёт значений мощности генерирующей части в MS Excel

Фрагмент ряда распределения генерирующей части в программе MS Excel показан на рисунке 6.

	Ряд распределения мощности генерирующей части энергосистемы						
	Значение мощности генерирующей части энергосистемы						
	4700	4200	3900	3700	3400	3200	3100
Вероятность	0,86813	0,05315	0,07087	0,00108	0,00434	0,00001	0,00217

Рисунок 6. Фрагмент ряда распределения генерирующей части в MS Excel

1.4 ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

На данном этапе необходимо сформировать модель энергосистемы путём объединения моделей нагрузки и генерирующей части. Каждое состояние энергосистемы можно охарактеризовать совпадением какого-либо состояния нагрузки с каким-либо состоянием генерирующей части.

Совпадение процессов производства и потребления во времени выразим через произведение вероятностных моделей этих процессов:

$$K_{\Sigma} = K_{\Gamma} \cdot K_H = \left[\prod_{i=1}^L \sum_{m_i=0}^{n_i} K_{\Gamma}^{i \quad m_i} \right] \cdot \sum_{j=1}^N K_H^{H_j}, \quad (1.3)$$

где K_{Σ} , K_{Γ} и K_H – ряды распределений соответственно энергосистемы, генерирующей части и нагрузки; i – индекс группы, состоящей из n_i

однотипных генераторов с номинальной мощностью $P_{Гi}$, $i = \overline{1, L}$; L – количество групп однотипных генераторов; m_i – количество генераторов, находящихся в вынужденном простое, $m_i = \overline{0, n_i}$; j – номер ступени графика нагрузки $P_{Hj} = \overline{1, N}$.

Полученное аналитическое выражение и есть вероятностная модель энергосистемы. Однако для практических нужд полезно разделить модель на две части: первая будет характеризовать нормальное бездефицитное состояние, а вторая – дефицитные состояния. Такое представление модели приблизит ее к практически важной задаче оценки недоотпуска электроэнергии вследствие возникновения дефицитных состояний.

Анализ будет состоять в выявлении бездефицитных и дефицитных состояний энергосистемы:

$$K_{\mathcal{O}} = K_{БД} + K_{Д} = K_{БД} + \sum_{i=1} K_{Д}^{P_{Дi}}, \quad (1.4)$$

где $K_{БД} = \sum_{k=1}^G \sum_{j=1}^N K_{\mathcal{O}}^{(P_{Гk} - P_{Hj})}$ – суммарная вероятность бездефицитных

состояний, соответствующих условию $(P_{Гk} - P_{Hj}) \geq 0$; k – порядковый номер состояний генерирующей части системы, $k = \overline{1, G}$; j – номер ступени графика

нагрузки P_{Hj} , $j = \overline{1, N}$; $K_{Д} = \sum_{i=1} K_{Д}^{P_{Дi}} = \sum_{k=1}^G \sum_{j=1}^N K_{\mathcal{O}}^{(P_{Гk} - P_{Hj})}$ – ряд распределения

дефицитных состояний, соответствующих условию $(P_{Гk} - P_{Hj}) < 0$; i – порядковый номер учтенных уровней дефицита.

Численные расчеты оформляем в виде двух матриц-таблиц с необходимой для анализа возможных состояний энергосистемы информацией. В первой матрице операндами будут вектор значений вероятности существования нагрузки и вектор значений вероятности генерирующей части с соответствующими им значениями мощностей нагрузки P_{Hj} и генерирующей части $P_{Гk}$ (рисунок 7). Для удобства эту таблицу назовём матрицей коэффициентов.

Значение вероятностей возможных состояний генерирующей части									
Значение мощности генерирующей части энергосистемы									
		4700	4200	3900	3700	3400	3200	3100	2900
		0,86813	0,05315	0,07087	0,00108	0,00434	0,00001	0,00217	0,00009
	902	0,03470	0,03013	0,00184	0,00246	0,00004	0,00015	0,00000	0,00000
	1353	0,08333	0,07234	0,00443	0,00591	0,00009	0,00036	0,00000	0,00018
	1804	0,11804	0,10247	0,00627	0,00836	0,00013	0,00051	0,00000	0,00026
	2029,5	0,06941	0,06025	0,00369	0,00492	0,00008	0,00030	0,00000	0,00015
Значение	2255	0,22215	0,19285	0,01181	0,01574	0,00024	0,00096	0,00000	0,00048
мощности	2480,5	0,03470	0,03013	0,00184	0,00246	0,00004	0,00015	0,00000	0,00008
нагрузки	3157	0,14589	0,12665	0,00775	0,01034	0,00016	0,00063	0,00000	0,00032
	3382,5	0,04863	0,04222	0,00258	0,00345	0,00005	0,00021	0,00000	0,00011
	3608	0,09726	0,08443	0,00517	0,00689	0,00011	0,00042	0,00000	0,00021
	4059	0,04863	0,04222	0,00258	0,00345	0,00005	0,00021	0,00000	0,00011
	4510	0,09726	0,08443	0,00517	0,00689	0,00011	0,00042	0,00000	0,00021

Рисунок 7. Фрагмент таблицы значений вероятности возможных состояний энергосистемы в MS Excel

Во вторую матрицу поместим соотношения мощностей генерации $P_{Гк}$ и нагрузки $P_{Нj}$ в виде значений разностей $(P_{Гк} - P_{Нj})$. Для удобства эту таблицу назовём матрицей состояний (рисунок 8).

Значение мощности возможных состояний генерирующей части									
Значение мощности генерирующей части энергосистемы									
		4700	4200	3900	3700	3400	3200	3100	2900
	902	3798	3298	2998	2798	2498	2298	2198	1998
	1353	3347	2847	2547	2347	2047	1847	1747	1547
	1804	2896	2396	2096	1896	1596	1396	1296	1096
Значение	2029,5	2670,5	2170,5	1870,5	1670,5	1370,5	1170,5	1070,5	870,5
мощности	2255	2445	1945	1645	1445	1145	945	845	645
нагрузки	2480,5	2219,5	1719,5	1419,5	1219,5	919,5	719,5	619,5	419,5
	3157	1543	1043	743	543	243	43	-57	-257
	3382,5	1317,5	817,5	517,5	317,5	17,5	-182,5	-282,5	-482,5
	3608	1092	592	292	92	-208	-408	-508	-708
	4059	641	141	-159	-359	-659	-859	-959	-1159
	4510	190	-310	-610	-810	-1110	-1310	-1410	-1610

Рисунок 8. Фрагмент таблицы значений мощности возможных состояний энергосистемы в MS Excel

Пример расчета:

1) матрица коэффициентов: для вырабатываемой мощности $P_{Г2} = 4200$ МВт и соответствующей вероятности генерирующей части $K_{Г} = 0,05315$ при мощности нагрузки $P_{Н3} = 1804$ МВт и вероятности существования нагрузки $K_{Л} = 0,11804$ получим вероятность данного состояния энергосистемы $K_{\Sigma} = 0,00627$.

2) матрица состояний: при располагаемом значении мощности энергосистемы $P_{Г4} = 3700$ МВт и значении мощности нагрузки $P_{Н3} = 1804$ МВт получим разность $(P_{Г4} - P_{Н3}) = 1896$ МВт. Разность положительна, поэтому она

характеризует бездефицитное состояние энергосистемы.

Результаты расчётов приведены в приложении 1 (таблицы 1.4, 1.5).

1.5 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ БЕЗДЕФИЦИТНОЙ РАБОТЫ И ГОТОВНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Коэффициент бездефицитной работы определяется по вероятностной модели функционирования ЭС путем выявления состояний энергосистемы, в которых дефицит не возникает, т.е. при $(P_{Гк} - P_{Hj}) \geq 0$, и суммирования вероятностей возникновения таких состояний:

$$K_{БД} = \sum_{i=1} K_{БДi}, \quad (1.5)$$

где $K_{БДi}$ – коэффициенты готовности для каждого бездефицитного состояния энергосистемы $P_{БДi}$ (в соответствии с таблицами 1.4 и 1.5, приложение 1).

Коэффициент готовности энергосистемы определим по формуле:

$$\alpha = \frac{\mathcal{E}_{год} - \Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_{год}}, \quad (1.6)$$

где $\mathcal{E}_{год}$ – годовая потребность в электроэнергии; $\Delta \mathcal{E}$ – математическое ожидание недоотпуска электроэнергии за год вследствие дефицита мощности.

Коэффициенты мощности, для которых не выполняется условие $(P_{Гк} - P_{Hj}) \geq 0$, называют коэффициентами дефицитной работы системы. Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии за год вследствие дефицита мощности в энергосистеме определится по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = 8760 \cdot \sum_{i=1} P_{Дi} \cdot K_{Д}^{P_{Дi}}, \quad (1.7)$$

где $K_{Д}^{P_{Дi}}$ – коэффициент ряда распределения дефицитных состояний,

соответствующий уровню дефицита $P_{дi}$.

Пример расчета коэффициента бездефицитной работы: для генерируемой мощности $P_{ГЗ} = 3900$ МВт дефицит в системе будет существовать при мощностях нагрузки $P_{Н11} = 4059$ МВт и $P_{Н11} = 4510$ МВт. Соответственно, исключаем эти состояния при вычислении $K_{БД}$. Суммируем коэффициенты бездефицитной работы для оставшихся мощностей нагрузок при $P_{ГЗ} = 3900$ МВт. Получаем:

$$K_{БД} = 0,00246 + 0,00591 + 0,00836 + 0,00492 + 0,0157 + 0,00246 + \\ + 0,0103 + 0,00345 + 0,00689 = 0,0605.$$

Затем вычисляем суммарный коэффициент бездефицитной работы для всех состояний энергосистемы при отсутствии в ней дефицита мощности. Получим $K_{БД\Sigma} = 0,982$.

Пример расчёта величины недоотпуска: для генерируемой мощности $P_{ГЗ} = 3900$ МВт вычисляем коэффициент дефицитной работы при мощностях нагрузки $P_{Н11} = 4059$ МВт и $P_{Н12} = 4510$ МВт. Этим состояниям соответствуют коэффициенты энергосистемы $K_{Э11} = K_{Д11} = 0,00345$ и $K_{Э12} = K_{Д12} = 0,00689$. Рассчитываем годовой недоотпуск электроэнергии для вышеперечисленных значений $P_{Г}$ и $P_{Н}$.

Определим суммарный годовой недоотпуск электроэнергии по (1.7) для всех значений соответствующих дефициту мощности в системе:

$$\Delta \mathcal{E} = 315026 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Определим коэффициент готовности энергосистемы по (1.6):

$$\alpha = \frac{23624733 - 315026}{23624733} = 0,98666.$$

Сравним полученные коэффициенты с нормативными значениями:

$$\alpha = 0,98666 < 0,999;$$

$$K_{БД\Sigma} = 0,982 < 0,996.$$

Полученные значения показателей надёжности меньше нормативных

значений. Следовательно, уровень надёжности недостаточен, поэтому следует его увеличить за счёт введения резерва генерируемой мощности в энергосистему.

1.6 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ВВОДА РЕЗЕРВА

В связи с несоответствием показателей надёжности системы с нормативными значениями вводим резерв генерирующей мощности путем добавления 1 генератора мощностью 800 МВт во 2 группу генераторов.

Расчёт показателей надёжности производим аналогичным образом. Сначала составляем новый ряд распределения генерирующей части с учётом ввода резерва (приложение 2, таблицы 2.1, 2.2). В связи с этим необходимо перестроить ряд распределения состояний энергосистемы и выявлять новые бездефицитные состояния.

Результаты расчетов приведены в приложении 2 (таблицы 2.3, 2.4).

Получаем коэффициент бездефицитной работы по (1.5):

$$K_{БДС} = 0,999.$$

Определим математическое ожидание недоотпуска электроэнергии по (1.7):

$$\Delta \mathcal{E} = 4094 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Определим коэффициент готовности ЭС по (1.6):

$$\alpha = \frac{23624733 - 4094}{23624733} = 0,99982$$

Сравним полученные значения коэффициентов с нормативными значениями:

$$\alpha = 0,99982 > 0,999;$$

$$K_{БДС} = 0,999 > 0,996.$$

Полученные значения показателей надёжности больше нормативных

значений.

Следовательно, вводимый резерв обеспечивает надежное и бесперебойное электроснабжение потребителей.

2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ

При оценке надежности энергосистемы необходимо также учитывать тот факт, что в течение года количество агрегатов в системе изменяется в связи с тем, что они могут периодически выводиться в ремонт.

Соответственно, при выводе генераторов в планово-предупредительный ремонт генерируемая мощность уменьшается. Это обстоятельство может существенно повлиять на надежность работы энергосистемы, поэтому ставится задача расчета показателей надежности энергосистемы с учетом предупредительно-плановых ремонтов генераторов.

Для того, чтобы решать данную задачу построим годовые графики максимальных значений мощностей нагрузки для зимнего и летнего периода, а также генерирующей части (рисунок 9).

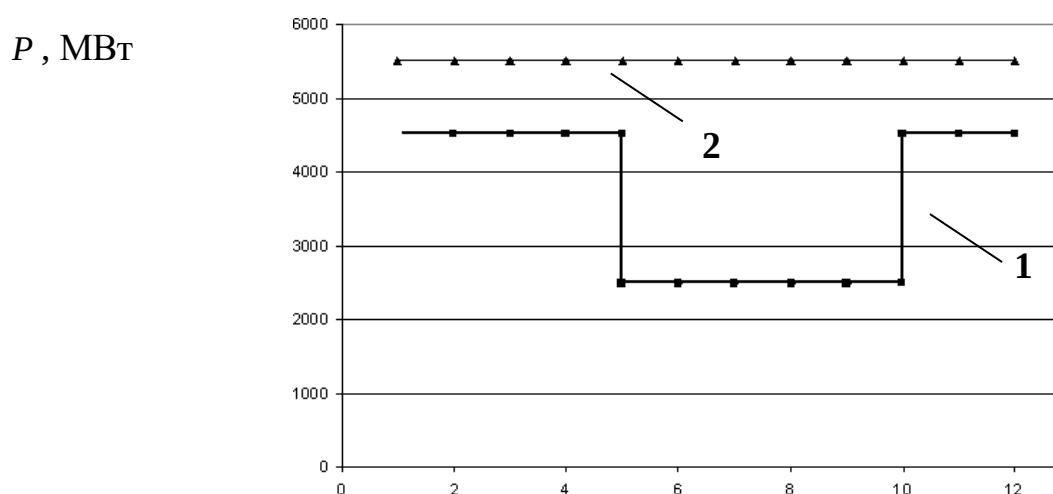


Рисунок 9. Годовые графики максимальных значений мощностей:

1 – нагрузки для зимнего и летнего периодов; 2 – генерирующей части

Анализируя годовые графики максимальных значений мощностей нагрузки и генерирующей части (рисунок 9), можно заметить, что в летнее время существует заметное уменьшение потребляемой электроэнергии.

Поэтому целесообразно проводить плановые ремонты генераторов летом, когда мощность генерации существенно превышает мощность нагрузки.

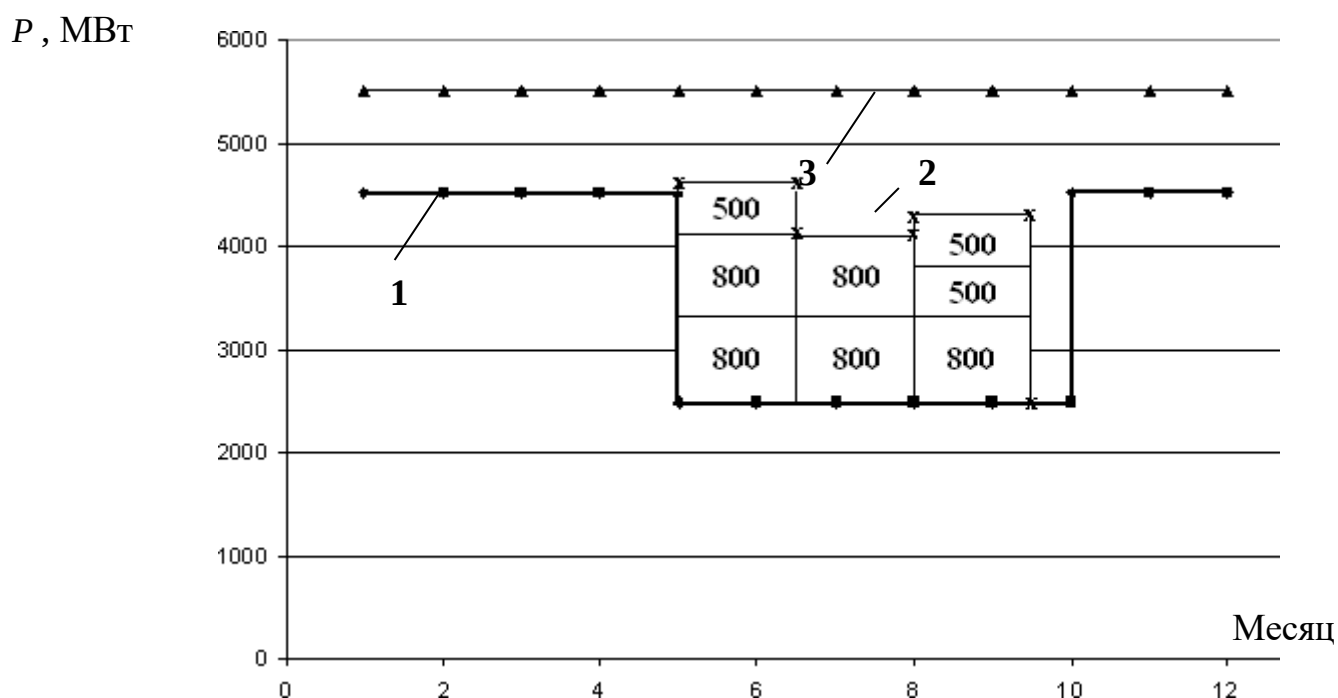


Рисунок 10. Расчётные иллюстрирующие метод годовые графики для максимальных значений мощностей: 1 – нагрузки для летнего и зимнего периодов; 2 – нагрузки с учётом плановых ремонтов; 3 – генерирующей части

В данной задаче для оценки надёжности энергосистемы с учётом предупредительно-плановых ремонтов необходимо рассчитать и проанализировать показатели надёжности: коэффициент готовности (α) системы и коэффициент бездефицитной работы ($K_{БДР}$).

Поскольку часть генераторов поочередно выводятся в ремонт, то некоторые условия, необходимые при расчете показателей надёжности, изменяются. В частности, изменяется генерируемая мощность в энергосистеме. Так, например, при выводе в ремонт одновременно двух генераторов мощностью 500 МВт и одного генератора мощностью 800 МВт генерируемая

мощность снижается до 3700 МВт. С учетом продолжительности вывода в ремонт каждого генератора снижение располагаемой мощности длится в течение 4,5 месяцев.

В данной энергосистеме прямой учет изменения располагаемой мощности в системе за счет вывода в плановый ремонт генераторов весьма трудоёмок. Для упрощения расчетов модель реального явления возникновения недоотпуска от снижения располагаемой мощности заменим эквивалентной по результату моделью, в которой эффект от снижения величины располагаемой мощности воспроизводится соответствующим увеличением нагрузки (рисунок 11). В этом случае решение задачи сводится к простейшей методике определения недоотпуска.

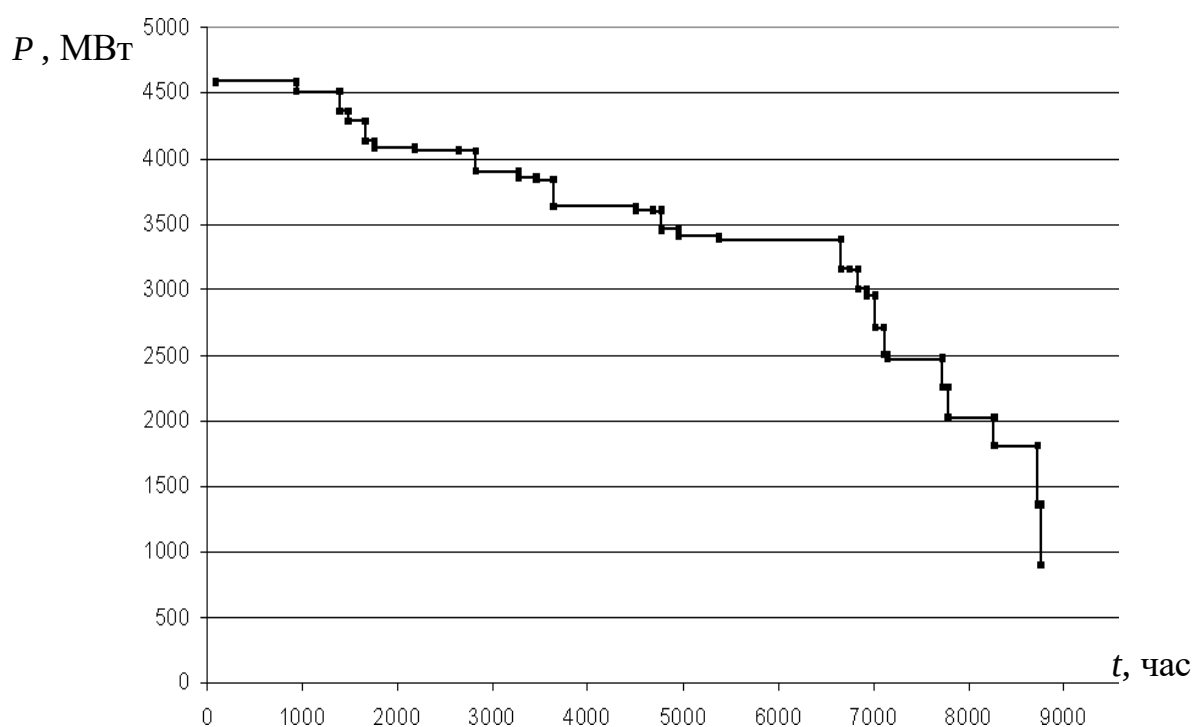


Рисунок 11. Годовой график нагрузки энергосистемы с учётом предупредительно-плановых ремонтов

Таким образом, расчеты проводим для пяти периодов со следующими значениями мощности нагрузки:

$P_{н1} = 4580,5$ МВт – при выводе в ремонт одновременно одного генератора 500 МВт и двух 800 МВт;

$P_{н3} = 4280,5$ МВт – при выводе в ремонт одновременно одного генератора 800 МВт и двух 500 МВт;

$P_{н4} = 2480,5$ МВт – когда все генераторы находятся в работоспособном состоянии;

$P_{н5} = 4510$ МВт – максимальная мощность нагрузки в зимний период (рисунок 10).

График вывода генераторов в ремонт показан на рисунке 12.

Все расчеты проводим аналогично. Т.е. сначала составляем ряд распределения нагрузки, приводя каждому значению мощности нагрузки вероятность возникновения данного состояния (приложение 3, таблица 3.1). Затем формируем ряд распределения состояний энергосистемы и выявляем бездефицитные состояния. Результаты расчётов в таблицы (приложение 3, таблица 3.3, 3.4).

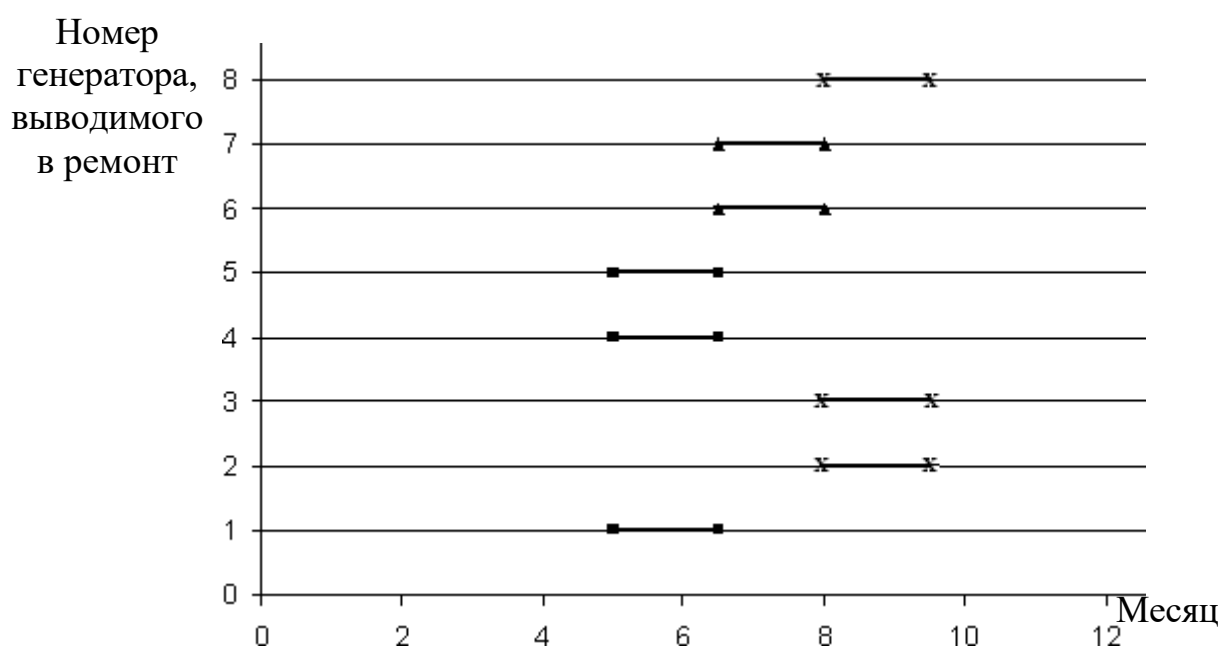


Рисунок 12. График вывода генераторов в ремонт

Таблица 2.1 – Генераторы, выводимые в ремонт

Номер генератора	Мощность генератора, выведенного в ремонт, МВт	Продолжительность простоя t _{пр} , месяцев
1	500	1,5
2	500	1,5
3	500	1,5
4	800	1,5
5	800	1,5
6	800	1,5
7	800	1,5
8	800	1,5

Определим годовую потребность в электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{год} = \sum_{i=1}^n P_{ni} \cdot t_{ni} = 38123184 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Определим математическое ожидание недоотпуска энергии по (1.7):

$$\Delta \mathcal{E} = 30312 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Определим коэффициент готовности ЭС, используя (1.6):

$$\alpha = \frac{38123184 - 30312}{38123184} = 0,9992.$$

Сравним полученные значения коэффициентов с нормативными значениями:

$$\alpha = 0,9992 > 0,999;$$

$$K_{БД\Sigma} = 0,994 < 0,996.$$

Значение такого показателя надёжности как коэффициент бездефицитной работы оказалось меньше нормативного значения. Следовательно, для увеличения уровня надёжности необходимо ввести резерва генерируемой мощности в энергосистему.

2.1 РАСЧЁТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ВВОДА РЕЗЕРВА

Для увеличения уровня надёжности введём генератор мощностью 500 МВт в первую группу генераторов. В связи с этим увеличивается количество генераторов, выводимые в ремонт, но и увеличивается максимальное значение мощности генерирующей части.

Расчёты в данном случае проводятся для четырёх периодов со следующими значениями мощности нагрузки:

$P_{н1} = 4580,5$ МВт – при выводе в ремонт одновременно одного генератора 500 МВт и двух 800 МВт;

$P_{н2} = 4280,5$ МВт – при выводе в ремонт одновременно одного генератора 800 МВт и двух 500 МВт;

$P_{н3} = 2480,5$ МВт – когда все генераторы находятся в работоспособном состоянии;

$P_{н4} = 4510$ МВт – максимальная мощность нагрузки в зимний период (рисунок 10).

Аналогично составляем график плановых ремонтов (рисунок 14).

Формируем ряд распределения нагрузки (приложение 4, таблица 4.1) и генерирующей части с учётом ввода резерва (таблица 4.2, 4.3), затем ряд распределения состояний энергосистемы и выявляем бездефицитные состояния. Результаты расчётов приведены в приложении 4 (таблица 4.4, 4.5).

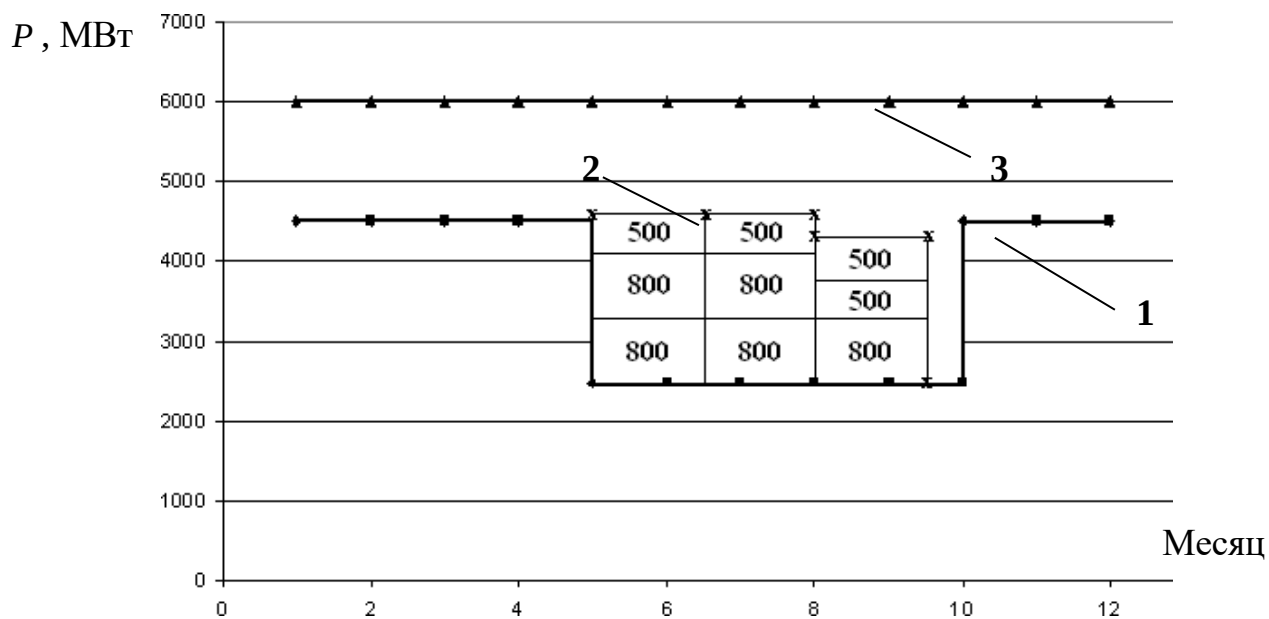


Рисунок 13. Расчётные иллюстрирующие метод годовые графики с учётом ввода резерва для максимальных значений мощностей: 1 – нагрузки для летнего и зимнего периодов; 2 – нагрузки с учётом плановых ремонтов; 3 – генерирующей части

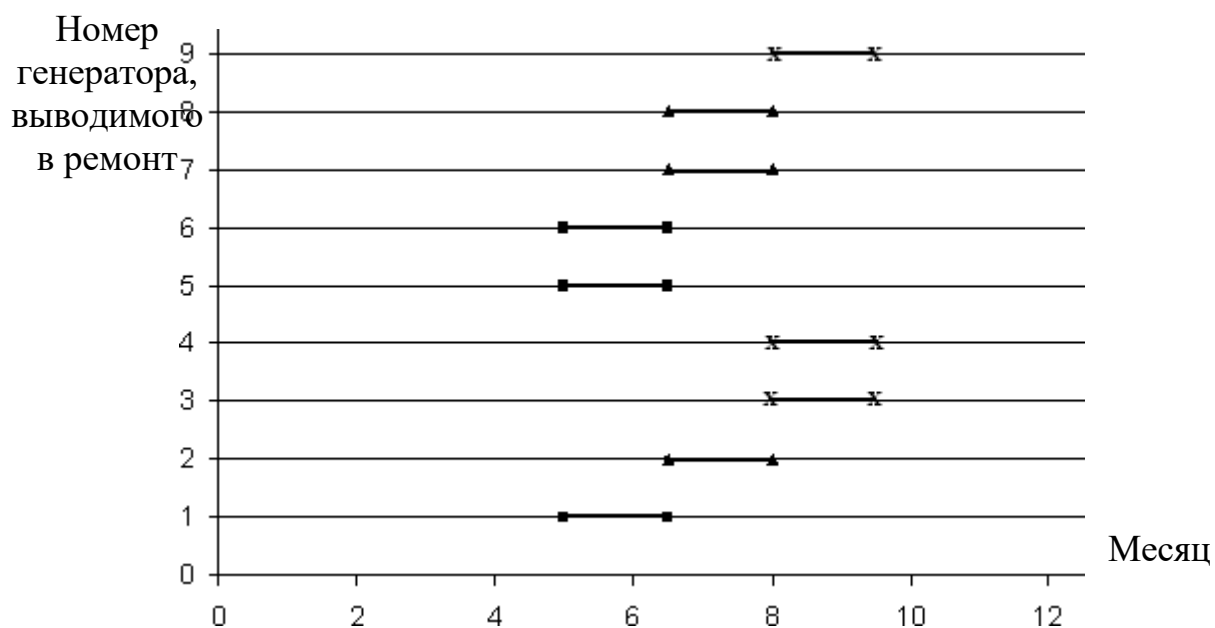


Рисунок 14. График вывода генераторов в ремонт с учётом ввода резерва

Таблица 2.2 – Генераторы, выводимые в ремонт

Номер генератора	Мощность генератора, выведенного в ремонт, МВт	Продолжительность простоя, месяцев
1	500	1,5
2	500	1,5
3	500	1,5
4	500	1,5
5	800	1,5
6	800	1,5
7	800	1,5
8	800	1,5
9	800	1,5

Определим годовую потребность в электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{год} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i = 38451504 \text{ МВт*ч.}$$

Определим математическое ожидание недоотпуска энергии по (1.7):

$$\Delta \mathcal{E} = 2116,5 \text{ МВт*ч.}$$

Определим коэффициент готовности ЭЭС, используя (1.6):

$$\alpha = \frac{38451504 - 2116,5}{38451504} = 0,99945.$$

Сравним полученные значения коэффициентов с нормативными значениями:

$$\alpha = 0,99945 > 0,999;$$

$$K_{БД\Sigma} = 0,99945 > 0,996.$$

Полученные значения коэффициентов надежности больше нормативных значений, следовательно, вводимый резерв обеспечивает надежное и бесперебойное электроснабжение потребителей при учете планово-предупредительных ремонтов генераторов.

Решение задачи режимной надёжности можно считать завершённым. Переходим к задаче схемной (режимной) надёжности.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СХЕМНОЙ (СТРУКТУРНОЙ) НАДЁЖНОСТИ

В рамках решения данной задачи необходимо оценить надёжность питания узла нагрузки. В качестве узла нагрузки выбрана ПС Ново-Ленинская. Данный узел нагрузки получает питание с двух сторон: по двухцепной ВЛ 110 кВ от Беловской ГРЭС и по двухцепной ВЛ 110 кВ от ПС Краснополянская (приложение 5, рисунок 1).

Для решения данной задачи необходимо определить показатели надёжности – индекс надёжности, частота отказов, время восстановления и коэффициент вынужденного простоя. Питание узла нагрузки осуществляется через следующие элементы электрической сети, РУ 220 кВ, РУ 110 кВ, автотрансформаторы, ВЛ 110 кВ.

3.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными для решения данной задачи являются частота отказов и время восстановления для каждого элемента схемы питания узла нагрузки (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Исходные данные

№ блока	Замещаемый элемент	ω , 1/год	ТВ, час
1	РУ 220 кВ	0,015	2,5
2	РУ 110 кВ	0,01	2,2
3	Трансформатор АТДЦТН 125000/220/110	0,02	250
4	Трансформатор АТДЦТН 125000/220/110	0,02	250
5	РУ 110 кВ	0,01	2,2
6	ВЛЭП 110 кВ	1	14
7	ВЛЭП 110 кВ	1	14
8	ВЛЭП 110 кВ	1	14
9	ВЛЭП 110 кВ	1	14
10	РУ 110 кВ	0,01	2,2

3.2 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПИТАНИЯ УЗЛА НАГРУЗКИ

Для решения данной задачи используем структурную схему надежности, составленную на основе электрической схемы сети. В данной схеме все источники питания объединяются, остальные элементы замещаются блоком с набором параметров, характеризующих надежность этого элемента. Далее путем эквалентирования схема сворачивается до одного блока и рассчитанные параметры надежности для этого блока, и характеризуют схемную надежность питания нагрузки.

Прежде чем начать расчёт основных показателей надёжности, необходимо рассчитать следующие дополнительные показатели надёжности:

1) наработка на отказ – это среднее время наработки, или, иначе говоря, продолжительности работы элемента между отказами, ч, равное:

$$T_H = 8760 / \omega \quad (3.1)$$

2) коэффициент готовности – это вероятность того, что элемент будет работоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между плановыми ремонтами:

$$K_G = T_H / (T_H + T_B) \quad (3.2)$$

3) коэффициент вынужденного простоя – это вероятность того, что элемент неработоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между плановыми ремонтами, т. е. восстанавливается после отказа:

$$K_B = 1 - K_G = T_B / (T_H + T_B) \quad (3.3)$$

Коэффициент вынужденного простоя может быть вычислен и непосредственно через основные показатели надежности:

$$K_B = T_B / (8760 / \omega + T_B) \quad (3.4)$$

или при $T_B \omega \ll 8760$:

$$K_B = T_B \omega / 8760 \quad (3.5)$$

Для определения индекса надёжности используется следующее соотношение:

$$P = (W - \Delta W_{\text{зод}}) / W \quad (3.6)$$

где:

$$W = P_i \cdot t_i \quad (3.7)$$

$$\Delta W_{\text{зод}} = P_{\text{ср}} \cdot \omega_i \cdot T_{Bi} \quad (3.8)$$

РСР – среднегодовая нагрузка, ω_i , T_{Bi} – частота отказов и время восстановления эквивалентного элемента соответственно.

Для определения частоты отказов ω_i и времени восстановления T_{Bi} необходимо составить блок-схему и по известным формулам преобразовать ее до одного эквивалентного элемента, характеризующегося $\omega_{\text{экв}}$ и $T_{B\text{экв}}$.

При последовательном сложении блоков частота отказов и время восстановления рассчитываются следующим образом:

$$\omega_{\Sigma} = \sum_i \omega_i \quad (3.9)$$

$$T_{B\Sigma} = \frac{\sum_i (\omega_i \cdot T_{Bi})}{\omega_{\Sigma}} \quad (3.10)$$

При параллельном сложении блоков частота отказов и время восстановления рассчитываются следующим образом:

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_i \cdot \omega_j \cdot (T_{Bi} + T_{Bj})}{8760} \quad (3.11)$$

$$T_{Bij} = \frac{T_{Bi} \cdot T_{Bj}}{T_{Bi} + T_{Bj}} \quad (3.12)$$

По схеме, изображенной на рисунке 1 (приложение 5) строим блок-схему питания узла нагрузки (рисунок 15).

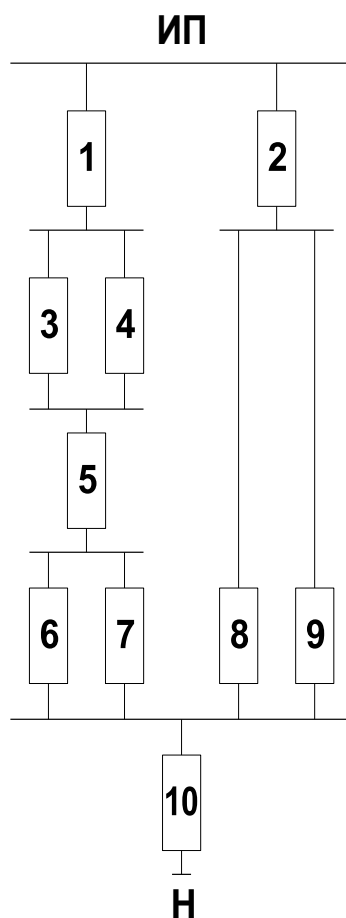


Рисунок 15. Блок-схема питания узла нагрузки

По представленным выше соотношениям (3.9 – 3.12) преобразуем блок-схему до одного эквивалентного блока (рисунок 16). Результаты преобразования заносим в таблицу 3.2.



Рисунок 16. Эквивалентный блок, полученный в результате преобразований

Таблица 3.2 – Параметры эквивалентных элементов

№ блока	ω , 1/год	ТВ, час
11 = 3//4	2,283E-05	125
12 = 6//7	0,0032	7
13 = 8//9	0,0032	7
14 = 11+5+12	0,0132	3,58
15 = 2+13	0,0132	3,36
16 = 14//15	1,38E-07	1,73
17 = 16+10	0,01	2,2

Таблица 3.3 – Параметры эквивалентного блока

№ блока	ω , 1/год	ТВ, час
17	0,01	2,2

Наработка на отказ по (3.1):

$$T_H = 8760 / \omega = 8760 / 0,01 = 876000 \text{ час.}$$

Коэффициент вынужденного простоя по (3.5):

$$K_B = T_B \omega / 8760 = 2,2 \cdot 0,01 / 8760 = 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

Индекс надёжности по (3.6):

$$П = (W - \Delta W_{\text{год}}) / W = (536988 - 1,35) / 536988 = 0,999998, \text{ где}$$

$$W = P_{cp} \cdot 8760 = 61,3 \cdot 8760 = 536988 \text{ МВт} \cdot \text{час},$$

$$\Delta W_{\text{год}} = P_{cp} \cdot \omega_i \cdot T_{Bi} = 61,3 \cdot 0,01 \cdot 2,2 = 1,35 \text{ МВт} \cdot \text{час}.$$

Результат расчета показателей надежности питания узла нагрузки приведён в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты расчета показателей надежности питания узла нагрузки

ω , 1/год	ТВ, час	KB	W, МВт·час	РСП, МВт	$\Delta W_{\text{год}}$, МВт·час	П
0,01	2,2	$2,5 \cdot 10^{-6}$	536988	61,3	1,35	0,999998

Из таблицы 3.4 видно, что значение индекса надежности выше нормативного значения (0,999). Это говорит о том, что питание выбранного узла нагрузки надёжно.

восстановления по значению равны показателям надёжности РУ 110 кВ. Следовательно, «слабым» местом в схеме питания узла является данный элемент. На него следует обратить особое внимание в плане эксплуатации и технического обслуживания, т.к. при отказе этого элемента нарушается связь между узлом нагрузки и источником питания, и время восстановления питания узла нагрузки будет определяться временем восстановления данного элемента.

Решение задачи схемной надёжности можно считать завершённой.

Перечень основной литературы:

- 1 Александровская, Л. Н. Безопасность и надёжность технических систем : Учебное пособие / Александровская Л. Н. - Москва : Логос, 2008. - 376 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-98704-115-5
- 2 Хорольский, В. Я. Надёжность электроснабжения : учеб. пособие для вузов / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. - Москва : Форум, 2014. - 126 с. : ил., табл. ; 21. - Библиогр.: с. 123-124. - ISBN 978-5-91134-796-3
- 3 Шилова, З. В. Теория вероятностей и математическая статистика Электронный ресурс : Учебное пособие / З. В. Шилова, О. И. Шилов. - Саратов : Ай Пи Ар Букс, 2015. - 158 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-906-17262-4

Перечень дополнительной литературы:

- 1 Воропай, Н. И. (1943-). Надёжность систем электроснабжения : конспект лекций / Н.И. Воропай ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Иркутский гос. техн. ун-т, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. - Новосибирск : Наука, 2006. - 205 с. : ил. ; 20. - Библиогр.: с. 181 (12 назв.). - ISBN 5-02-032545-7
- 2 Калинин, В. Ф. Надёжность систем электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / В. Ф. Калинин, А. В. Кобелев, С. В. Кочергин. - Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2011. - 81 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-8265-1042-1
- 3 Секретарев, Ю. А. Надёжность электроснабжения Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. А. Секретарев. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. - 105 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-1517-7