



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра “Электрические системы”

**НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И СЕТЕЙ**

Сборник задач

Минск 2006

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра “Электрические системы”

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И СЕТЕЙ

Сборник задач

для студентов дневного и заочного отделений
специальностей 1-43 01 02 “Электроэнергетические системы и сети”
и 1-53 01 04 “Автоматизация и управление энергетическими
процессами”

Под редакцией А.А. Волкова

Минск 2006

УДК 621.311. 019.3 (076)

ББК 31.279, я 7

Н 17

Составитель
В.М. Цыганков

Рецензенты:
В.А. Анищенко, А.А. Золотой

Цыганков, В.М.

Н 17

Надежность электрических систем и сетей: сборник задач для студентов дневного и заочного отделений специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-53 01 04 «Автоматизация и управление энергетическими процессами» / Сост. В.М. Цыганков; под ред. А.А. Волкова. – Мн.: БНТУ, 2006. – 134 с.

ISBN 985-479-234-X.

Сборник задач по курсу “Надежность электрических систем и сетей” включает двенадцать тем и охватывает широкий круг вопросов, связанных с расчетами и анализом надежности электрических систем и сетей.

УДК 621.311.019.3(076)
ББК 31.279 я 7

ВВЕДЕНИЕ

Инженерная практика требует решения задач, охватывающих широкий круг вопросов, связанных с расчетами и анализом надежности электрических систем и сетей, включая расчеты вероятностей аварийного отключения и надежной работы электрических сетей, надежности схем питания потребителей и схем передачи энергии, определение вероятностной оценки надежности электроснабжения потребителей и экономичности вариантов электроснабжения промышленного узла, составление структурных схем электрической сети и расчет их показателей надежности, а также надежности электроснабжения подстанций для схемы электрической сети с учетом распределительных устройств, определение потока отказов и среднего времени восстановления элементов, исследование функциональных зависимостей, числовых характеристик и законов вероятности, используемых при расчетах надежности, а также расчет статистических показателей эксплуатационной надежности элементов.

Основные термины и определения, применяемые для расчетов и анализа надежности электрических систем и сетей, приведены в нормативных документах и рекомендациях:

1. ГОСТ 21.027-75. Системы энергетические. Термины и определения.
2. Надежность систем энергетики. Терминология: сборник рекомендуемых терминов. — М.: Наука, 1980. — Вып. 95.
3. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

Тема 1

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ И НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ РАЗНЫХ ВАРИАНТОВ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Исходные данные для решения задач по теме приведены в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1

Исходные данные для расчета
вероятности отключения и надежности

Ва- ри- ант	$q_{Г}$	$q_{Т}$	$q_{Л} \cdot 10^{-3}$	$q_{Т1}$	p	$q_{В1} \cdot 10^{-3}$	$q_{В2}$	$q_{СШ} \cdot 10^{-3}$	p_1	$q_{Д2} \cdot 10^{-3}$
1	0,02	0,1	10	0,014	0,94	0,04	0,005	0,002	0,98	1,4
2	0,03	0,15	12,5	0,01	0,98	0,2	0,007	0,005	0,99	2,9
3	0,0	0,14	5	0,13	0,96	6	0,014	0,006	0,94	3,5
4	0,05	0,13	4	0,12	0,98	7	0,015	0,003	0,97	1,4
5	0,06	0,08	8	0,06	0,99	13	0,007	0,004	0,98	4
6	0,065	0,11	0,7	0,08	0,93	6	0,012	0,005	0,96	2,6
7	0,035	0,14	18	0,18	0,97	5	0,011	0,004	0,99	3,9
8	0,055	0,13	20	0,014	0,96	8	0,025	0,005	0,94	4,5
9	0,066	0,09	4	0,09	0,98	9	0,011	0,006	0,92	6,1
10	0,045	0,16	0,8	0,15	0,995	14	0,013	0,007	0,99	7
11	0,037	0,17	0,6	0,16	0,994	15	0,007	0,004	0,88	0,8
12	0,055	0,19	1,6	0,005	0,991	18	0,02	0,005	0,89	0,9
13	0,044	0,14	6	0,008	0,91	0,15	0,011	0,003	0,98	0,69
14	0,054	0,91	3	0,11	0,97	2	0,014	0,004	0,99	0,84
15	0,046	0,12	7	0,12	0,98	6	0,01	0,006	0,91	0,14
16	0,064	0,15	14	0,14	0,94	4	0,012	0,004	0,89	1,5
17	0,069	0,11	0,7	0,08	0,97	3	0,014	0,005	0,93	1,6
18	0,049	0,13	3	0,07	0,98	6	0,012	0,003	0,92	17
19	0,055	0,07	6	0,08	0,94	0,4	0,016	0,0036	0,94	18
20	0,058	0,15	4	0,09	0,991	5	0,17	0,0045	0,85	14

Примечание. q – вероятность отказа элемента схемы системы передачи энергии; p – вероятность безотказной работы элемента схемы. Индексы параметров: Г – генератор; Т – трансформатор; Л – линия; В – выключатель; СШ – сборные шины.

Схемы систем передачи энергии для задач по данной теме представлены на рис. 1.1.

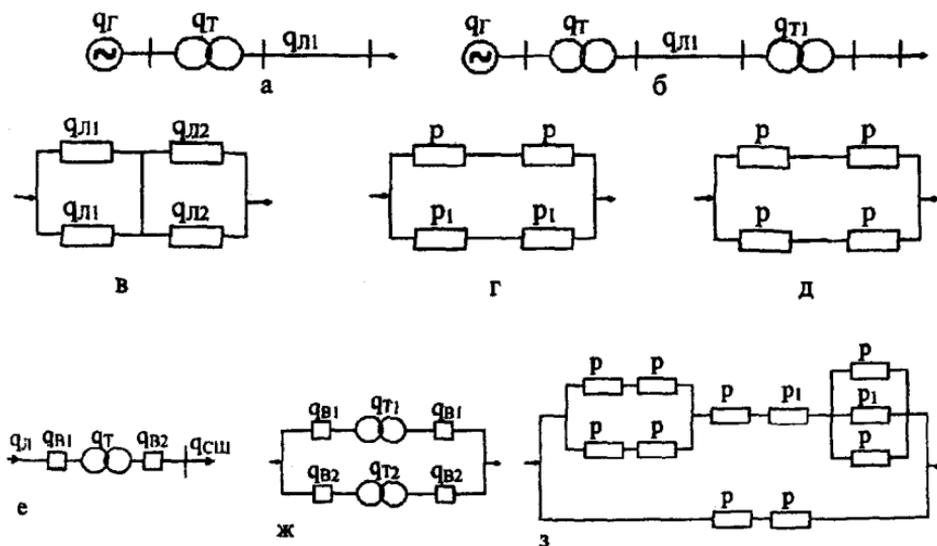


Рис. 1.1. Схемы систем передачи энергии

Задача 1.1. Схема сети представлена на рис. 1.1,а и состоит из последовательно соединенных элементов. Точно и приближенно определить вероятность аварийного отключения схемы и вероятность ее надежной работы.

Решение. Точный вариант

Вероятность отказа схемы:

$$q_{\text{сх}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = 1 - (1 - q_{\text{Г}})(1 - q_{\text{Т}})(1 - q_{\text{Л1}}). \quad (1.1)$$

Вероятность надежной (безаварийной) работы схемы:

$$p_{\text{сх}} = 1 - q_{\text{сх}}. \quad (1.2)$$

Приближенный вариант

Для элементов схемы электроэнергетической системы с $q_i \ll 1$ величины произведений коэффициентов вероятности отказов q_i отдельных элементов малы в сравнении с величинами этих коэффициентов аварийности. С учетом этого обстоятельства запишем:

$$q_{\text{сх}} = \sum_{i=1}^n q_i = q_{\Gamma} + q_{\Gamma} + q_{\text{ЛЛ}}. \quad (1.3)$$

В этом случае ошибка

$$\delta \ll \left[\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \right]^2.$$

Если коэффициент аварийности $q \leq 0,01$, то ошибка не превышает 1 - 3%; $q_c = 0,168$ (точное значение); $q_c = 0,176$ (приближенное значение).

$$\delta \ll \left[\frac{1}{2} \cdot 0,176 \right]^2 = 0,8\%.$$

Задача 1.2. Определить вероятность отказа схемы передачи энергии, представленной на рис. 1.1,б, считая повреждения элементов: а) независимыми друг от друга; б) зависимыми.

Решение. Определим вероятность аварийного отключения схемы:

$$q_{\text{сх}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (1.4)$$

или

$$q_{\text{сх}} \approx \sum_{i=1}^n q_i. \quad (1.5)$$

Аварийный режим системы наступает при повреждении любого элемента схемы. Применяя теорию сложения вероятности для совместимых событий $(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$, имеем:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{ij} P(A_i \cdot A_j) + \sum_{ijk} P(A_i \cdot A_j \cdot A_k) + \dots +$$

$$+ (-1)^{n-1} \sum_n P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n),$$

где $P(A_i)$ – вероятность события A_i ;
 i, j, k – индексы изменения событий.
 В нашем случае

$$q_c = q_\Gamma + q_T + q_{Л1} + q_{Т1} - q_\Gamma(q_T + q_{Л1} + q_{Т1}) -$$

$$- q_T(q_{Т1} + q_{Л1}) - q_{Л1}q_{Т1} + q_\Gamma q_{Л1}(q_T + q_{Т1}) +$$

$$+ q_T q_{Т1}(q_{Л1} + q_\Gamma) - q_\Gamma q_T q_{Л1} q_{Т1}.$$

Задача 1.3. Определить вероятность отказа и вероятность надежной работы схемы передачи энергии, представленной на рис. 1.1,в.

Решение. Система состоит из двух групп последовательно соединенных элементов с одинаковыми коэффициентами аварийности. Вероятность отказа схемы с последовательной структурой определяется так:

$$q_{cx} = 1 - P_{cx} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - q_j),$$

где m – количество параллельных цепей;
 j – номер параллельной цепи.

Для группы из n параллельных элементов имеем:

$$q_{гр} = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i.$$

В нашем случае

$$q_{гр1} = q_{л1}^2; \quad q_{гр2} = q_{л2}^2. \quad (1.10)$$

Вероятность безотказной работы схемы, состоящей из n параллельно соединенных элементов:

$$p_{сх} = 1 - q_{сх} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (1.11)$$

Для нашей задачи

$$P_{Гр} = 1 - q_{Гр1}; \quad P_{Гр2} = 1 - q_{Гр2}. \quad (1.12)$$

В схеме, состоящей из n последовательных элементов, вероятность надежной (безотказной) работы

$$p_c = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (1.13)$$

В рассматриваемом примере

$$p_{сх} = (1 - q_{Гр1})(1 - q_{Гр2}) = p_{Гр1} \cdot p_{Гр2}. \quad (1.14)$$

Определим вероятность аварийного отключения схемы. В общем случае для схемы с последовательной структурой элементов

$$q_{сх} = 1 - p_{сх} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \quad (1.15)$$

Для нашей задачи

$$q_{сх} = 1 - p_{сх}. \quad (1.16)$$

Задача 1.4. Определить вероятность аварии и безотказной работы для схемы передачи энергии (рис. 1.1,г).

Решение. В данном случае имеем сеть, состоящую из двух параллельных ветвей с двумя последовательными элементами, характеризующимися одинаковыми вероятностями надежной работы p .

Вероятность надежной работы ветви сети с двумя одинаковыми последовательными элементами:

$$p_{\text{в}} = p^2. \quad (1.17)$$

Вероятность отказа работы ветви сети:

$$q_{\text{в}} = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - q_i) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) = 1 - p_1 p_2 = 1 - p^2. \quad (1.18)$$

Вероятность аварийного отключения сети из двух параллельных ветвей:

$$q_{\text{сх}} = \prod_{i=1}^2 q_{\text{в}i} = \prod_{i=1}^2 (1 - p_{\text{в}i})^2, \quad (1.19)$$

$$q_{\text{сх}} = (1 - p_{\text{в}1})(1 - p_{\text{в}2}). \quad (1.20)$$

Вероятность надежной работы сети:

$$p_{\text{сх}} = 1 - q_{\text{сх}}. \quad (1.21)$$

Задача 1.5. Рассчитать вероятность безотказной работы схемы передачи энергии и ее отказа (рис. 1.1,д).

Решение. Здесь представлен способ отдельного резервирования элементов сети. Вероятность надежной работы каждого из двух групп элементов составит:

$$p_{гр1} = 1 - (1 - p)^2; p_{гр2} = 1 - (1 - p)^2. \quad (1.22)$$

Вероятность надежной работы элементов сети

$$P_{сх} = P_{гр1} \cdot P_{гр2} = (1 - (1 - p)^2)^2. \quad (1.23)$$

Вероятность аварийного отключения рассматриваемой схемы

$$q_{сх} = 1 - P_{сх}. \quad (1.24)$$

Задача 1.6. Система передачи электроэнергии потребителю состоит из следующих элементов: линии, выключателя В1, трансформатора, выключателя В2, системы сборных шин.

Блочная схема к расчету представлена на рис. 1.2. Определить вероятность режима аварийного отключения системы.

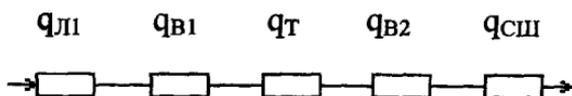


Рис. 1.2. Блочная схема передачи энергии

Решение. Для определения вероятности аварии системы воспользуемся приближенной формулой:

$$q_c \approx q_{Л} + q_{В1} + q_{Т} + q_{В2} + q_{СШ}. \quad (1.25)$$

Тогда вероятность надежной работы системы рассчитаем по формуле

$$q_c = 1 - p_c. \quad (1.26)$$

Задача 1.7. Схема передачи энергии, представленная на рис. 1.1,ж предназначена для питания крупного узла нагрузки (промышленное предприятие). Каждая из параллельных цепей может обеспечить полностью потребность предприятия в электрической энергии. Блочная схема к расчету представлена на рис. 1.3.

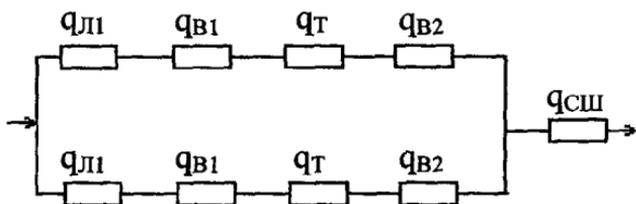


Рис. 1.3. Блочная схема передачи энергии

Решение. Сборные шины 6 – 10 кВ – общий элемент для двух параллельных цепей питания – дают последовательную составляющую выражения для определения вероятности аварийного режима схемы:

$$q_c \approx (q_{Л1} + q_{В1} + q_T + q_{В2})^2 + q_{СШ}. \quad (1.27)$$

Если дано: $q_{Л1}, q_{Л2}, q_{В1}, q_{В2}$, то

$$q_c \approx (q_{Л1} + q_{В1} + q_T + q_{В2})(q_{Л1} + q_{В1} + q_T + q_{В2}) + q_{СШ}. \quad (1.28)$$

Вероятность надежной работы элементов сети для этого варианта передачи энергии составит:

$$q_c = 1 - p_c. \quad (1.29)$$

Задача 1.8. Рассчитать параметры надежности ($q_{сх}, p_{сх}$) для системы передачи энергии, представленной на рис. 1.4.

Решение. Представлена блочная схема сети для расчета надежности, имеющая смешанную последовательно-параллельную (комбинированную) группировку. На рис. 1.4 дано деление этой сети на две подсхемы с выделением в первой из них трех блоков элементов (а, б, в). Подсхемы 1, 2 соединены параллельно.

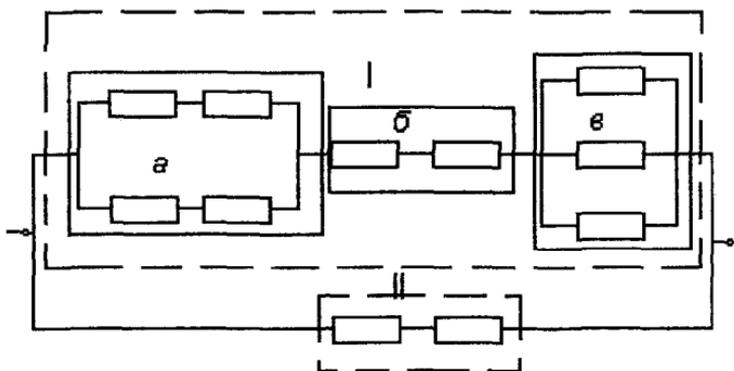


Рис. 1.4. Представление схемы передачи энергии для расчета надежности

Вероятность надежной работы сети составит:

$$q_{\text{сх}} = 1 - (1 - p_1)(1 - p_{\parallel}), \quad (1.30)$$

где p_1, p_2 – вероятности безаварийной работы схем 1, 2.

Задание сводится к определению p_1, p_2 .

Рассмотрим режимы работы подсхем. Вероятность надежной (безаварийной) работы подсхем 1 составит:

$$P_1 = P_a P_b P_v; \quad (1.31)$$

в блоке “а”

$$p_a = (1 - (1 - p)^2)^2; \quad (1.32)$$

в блоке “б”

$$P_b = p \cdot P_1; \quad (1.33)$$

в блоке “в”

$$q_v = (1 - p)(1 - p_1)(1 - p); \quad (1.34)$$

$$p_v = 1 - q_v. \quad (1.35)$$

Для второй подсхемы вероятность режима надежной работы составит:

$$p_{\parallel} = p^2. \quad (1.36)$$

Определим вероятность режима надежной работы сети:

$$p_c = 1 - (1 - p_l)(1 - p_{ll}). \quad (1.37)$$

Вычислим вероятность режима аварии для схемы:

$$q_c = 1 - p_c. \quad (1.38)$$

Тема 2

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Исходные данные по теме приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета надежности

Вариант	S_T , МВ·А	$q_{л1} = q_{л3} \cdot 10^{-3}$	$q_{л2} = q_{л4} \cdot 10^{-3}$	$q_{т1} =$ $=q_{т2}$	$q_{т3} =$ $=q_{т4}$	$q_b \cdot 10^{-3}$
1	2	3	4	5	6	7
1	80	12,5	2,9	0,01	0,15	0,2
2	63	10	1,4	0,015	0,1	0,15
3	125	4	3,5	0,16	0,14	15
4	200	5	3,9	0,14	0,12	18
5	250	7	2,6	0,07	0,09	2
6	400	8	6,1	0,09	0,11	4
7	165	18	4,5	0,014	0,13	6,5
8	158	4	8	0,18	0,14	3,1
9	200	20	7	0,12	0,17	14
10	250	6	1,5	0,15	0,2	11
11	400	0,8	8,4	0,135	0,18	9
12	100	6	1,6	0,145	0,1	14
13	125	1,6	19	0,09	0,14	8
14	200	3	35	0,12	0,13	11

1	2	3	4	5	6	7
15	250	15	17	0,09	0,145	5
16	400	14	13	0,15	0,155	3
17	160	1,7	3,8	0,08	0,175	9
18	125	4	4,5	0,065	0,195	3,1
19	100	8	8,5	0,16	0,126	5
20	160	9	5,4	0,145	0,132	8

Примечание. S_T - номинальная мощность трансформатора; $q_{л}$, q_T , q_a - вероятность аварии линии, трансформатора, выключателя.

Задача 2.1. Для схемы сети (рис. 2.1) определить вероятность отключения двух цепей и надежного электроснабжения потребителя. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.1.

Решение. Определяем для схемы вероятность аварийного отключения двух цепей линий:

$$q_c = q_{л1} \cdot q_{л1} \quad (2.1)$$

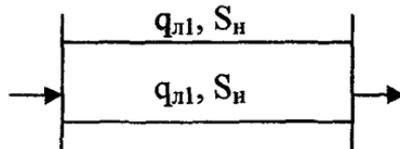


Рис. 2.1. Схема сети

Вероятность надежного электроснабжения потребителя

$$p_c = 1 - q_c \quad (2.2)$$

Надежность электроснабжения по двум цепям линии можно рассчитать другим способом. Потребитель получает электроэнергию в двух случаях:

а) если не повреждена ни одна цепь. Вероятность этого события определим по формуле

$$p_{л1} \cdot p_{л1} = (1 - q_{л1})(1 - q_{л1}) = (1 - q_{л1})^2; \quad (2.3)$$

б) если повреждена одна из цепей, то вероятность этого события составит:

$$p_c = (1 - q_{л1})^2 + 2 \cdot (1 - q_{л1}) \cdot q_{л1} = 1 - q_{л1}^2. \quad (2.4)$$

Задача 2.2. Электроснабжение завода осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.2. При этом:

– каждая двухцепная линия пропускает мощность, необходимую заводу;

– каждая цепь линии пропускает половину мощности, нужной заводу.

Требуется определить вероятностный режим надежной работы завода. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.1. При этом $q_{г1} = q_{г2} = q_{г3} = q_{г4}$.

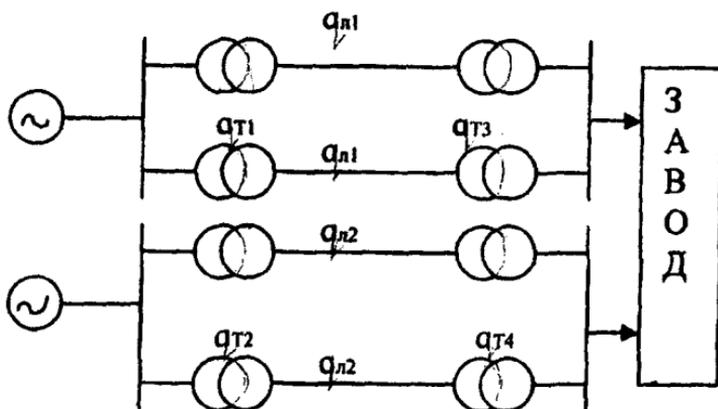


Рис. 2.2. Схема электроснабжения завода

Решение. Получение мощности заводом возможно, если хотя бы две (любые) параллельные цепи из четырех в работе. Вероятность надежной работы системы (без учета надежности станций) можно получить через вероятность отказа трёх и более цепей. Вероятность отказа каждой из четырех цепей составит:

$$q_I = q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3} - q_{T1} \cdot q_{Л1} - q_{T1} \cdot q_{T3} - q_{Л1} \cdot q_{T3} + q_{T1} \cdot q_{Л1} \cdot q_{T3} \approx q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3}. \quad (2.5)$$

Аналогично запишем:

$$q_{II} \approx q_I \approx q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3}; \quad (2.6)$$

$$q_{III} \approx q_{T2} + q_{Л2} + q_{T4}; \quad (2.7)$$

$$q_{III} \approx q_{III} \approx q_{T2} + q_{Л2} + q_{T4} \quad (2.8)$$

Вероятность надежной работы двух и более цепей как событие, противоположное отказу трех и более цепей, определим по формуле

$$p = 1 - [q_I^2 q_{III}^2 + q_I^2 \cdot 2q_{III}(1 - q_{III}) + q_{III}^2 2q_I(1 - q_I)] = 1 - \{(q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3})^2 \times (q_{T2} + q_{Л2} + q_{T4})^2 + (q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3})^2 + 2(q_{T2} + q_{Л2} + q_{T4})(1 - q_{T2} - q_{Л2} - q_{T4}) + (q_{T2} + q_{T3} + q_{T4})^2 \times 2 \cdot (q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3})[1 - (q_{T1} + q_{Л1} + q_{T3})]\}.$$
(2.9)

Задача 2.3. На рис. 2.3 представлена система передачи энергии.

Вариант "а": по каждой линии и повышающему трансформатору можно передать 100% мощности, необходимой потребителю; по понижающему трансформатору генератор выдает в систему 50% необходимой мощности;

Вариант "б": пропускная способность каждого элемента передачи составляет 50% передаваемой мощности.

Определить вероятность передачи потребителю: 1)100%; 2)50%; 3)0% мощности. Повреждение элементов системы – независимые события. Исходные данные приведены в табл. 2.1.

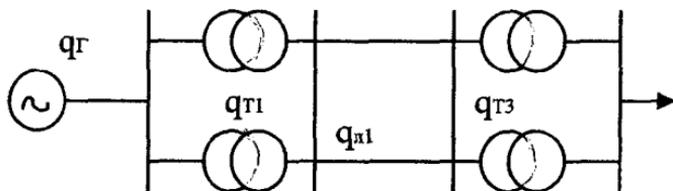


Рис. 2.3. Система передачи энергии

Решение. Вариант "а".

1. Рассчитаем вероятность передачи потребителю 100% мощности:

$$P_{c100} = (1 - q_{Г})^2 (1 - q_{Т1}^2) (1 - q_{Л1}^2) (1 - q_{Т2}^2)^2.$$

2. Определим вероятность передачи потребителю 50% мощности:

$$P_{c50} = 2p_{Г}q_{Г}(1 - q_{Т1}^2)(1 - q_{Л1}^2)(1 - q_{Т2}^2)^2 + p_{Г}^2(1 - q_{Т1}^2)(1 - q_{Л1}^2)2p_{Т2}q_{Т2}. \quad (2.10)$$

3. Вероятность передачи потребителю 0% мощности вычислим по формуле

$$P_{c0} = q_{Г}^2 + q_{Т1}^2 + q_{Л1}^2 + q_{Т2}^2 + q_{Г}^2q_{Т1}^2 - q_{Г}^2q_{Л1}^2 - q_{Г}^2q_{Т2}^2 - q_{Т1}^2q_{Л1}^2 - q_{Т1}^2q_{Т2}^2 - q_{Л1}^2q_{Т2}^2 + q_{Г}^2q_{Т1}^2q_{Л1}^2 + q_{Л1}^2q_{Г}^2q_{Т2}^2 + q_{Т1}^2q_{Л1}^2q_{Т2}^2 + q_{Г}^2q_{Т1}^2q_{Т2}^2 - q_{Г}^2q_{Т1}^2q_{Л1}^2q_{Т2}^2. \quad (2.11)$$

Вариант "б".

1. Определим вероятность передачи потребителю 100% мощности:

$$P_{c100} = (1 - q_r)^2 (1 - q_{T1})^2 (1 - q_{Л1})^2 (1 - q_{T2})^2. \quad (2.12)$$

2. Рассчитаем вероятность передачи потребителю 50% мощности:

$$P_{c50} = [2p_r^2 p_{T1} q_{T1} + 2p_r q_r (1 - q_{T1}^2)] [2p_{Л1} q_{Л1} p_{T2}^2 + (1 - q_{Л1})^2 2p_{T1} \cdot q_{T1}]. \quad (2.13)$$

3. Вероятность передачи потребителю 0% мощности вычислим по формуле

$$P_{c0} \approx q_r^2 + q_{T1}^2 + q_{Л1}^2 + q_{T2}^2. \quad (2.14)$$

Задача 2.4. Определить вероятность отключения различных значений мощности на подстанции, имеющей два одинаковых автотрансформатора и вероятную протяженность аварии в течение года. Номинальная мощность каждого – S [МВ·А] (рис. 2.4).

Исходные данные представлены в табл. 2.1.

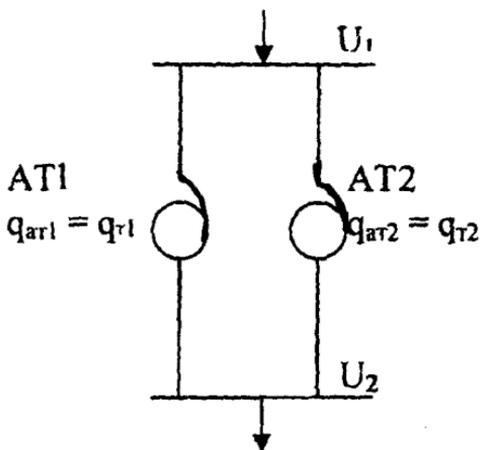


Рис. 2.4. Схема подстанции

Решение. Вероятность аварии m среди n элементов схемы определяется обобщенно уравнением двучлена Бернулли, который для элементов с одинаковой вероятностью отказа $q_i = q$ имеет вид

$$q_{m,n0} = C_n^m (1-q)^{n-m} q^m, \quad (2.15)$$

где количество сочетаний m из n элементов параллельной группировки составит:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (2.16)$$

При заложенных величинах $m = 0, 1, 2$ и $n = 2$ необходимо рассмотреть следующие сочетания:

а) одновременная работа двух автотрансформаторов; вероятность этого события:

$$p_1 \cdot p_2 = (1-q_1)(1-q_2) = (1-q)^2; \quad (2.17)$$

б) авария T_1 при работе T_2 ; вероятность этого события:

$$q_1 \cdot p_2 = q_1 \cdot (1-q_2) = q \cdot (1-q); \quad (2.18)$$

в) авария T_2 при работе T_1 :

$$p_1 \cdot q_1 = (1-q_1) \cdot q_2 = (1-q) \cdot q; \quad (2.19)$$

г) одновременная авария T_1 и T_2 :

$$q_1 \cdot q_2 = q^2. \quad (2.20)$$

Общее число возможных комбинаций при n параллельных элементах — 2.

Вероятностное время длительности аварии (часы):

$$t_{a,m} = q_{m,n} \cdot T, \quad (2.21)$$

где T – заданный период времени.

Результаты сводим в табл. 2.2

Т а б л и ц а 2.2

Результаты решения задачи

Вариант	Число аварийно отключенных автотрансформаторов	Аварийное отключение мощности, МВ·А	$q_{m,n}$	$t_a, \text{ч}$
1	0	S	q_1	t_1
2	1	S_1	q_2	t_2
3	2	S_2	q_3	t_3

Задача 2.5. Определить вероятность аварийных отключений мощности для приведенной схемы питания потребителя (рис. 2.5).

Допущения: пропускная способность L_1 или L_2 – 100% S_H ; два трансформатора – 100% S_H ; аварии элементов – независимые события. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.1.

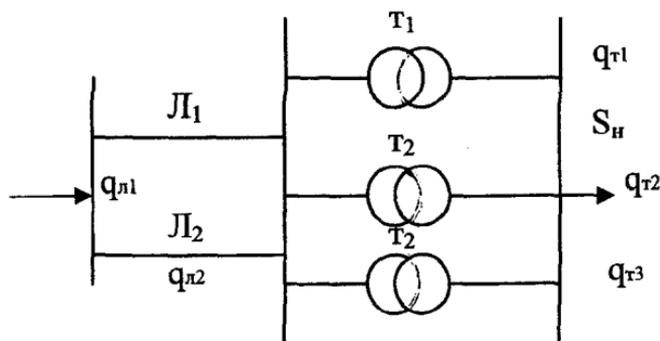


Рис. 2.5. Схема передачи энергии

Решение. Расчет случайных коэффициентов аварийности для различных комбинаций элементов в режиме аварии требует предварительного анализа параллельных элементов схемы с помощью формулы Бернулли, отражающей биномиальное распределение вероятностей m среди n элементов схемы:

$$q_{m,n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot q^m \cdot (1-q)^{n-m}. \quad (2.22)$$

а) Параллельная группа линий L_1 и L_2 . При $m = 0, 1, 2$ и $n = 2$ имеем следующие комбинации:

1) одновременная работа двух линий; вероятность этого события:

$$p_{л1} \cdot p_{л2} = (1 - q_{л1})(1 - q_{л2}) = (1 - q_{л})^2. \quad (2.23)$$

2) авария L_1 при работе L_2 или L_2 при работе L_1 :

$$q_{л1} \cdot p_{л2} = q_{л1}(1 - q_{л2}) = q_{л2} \cdot p_{л1} = q_{л2}(1 - q_{л1}) = q_{л}(1 - q_{л}); \quad (2.24)$$

3) одновременная авария L_1 и L_2 :

$$q_{л1} \cdot q_{л2} = q_{л}^2. \quad (2.25)$$

Общее число возможных комбинаций при n параллельных элементах — 2^n .

Вероятное время длительности аварии (часы):

$$t_{a,m} = q_{m,n} \cdot T, \quad (2.26)$$

где $T = 8760$ ч — заданный период времени.

Результаты расчета сводим в табл. 2.3.

Работа группы линий

Номер комбинации	Число аварийно отключившихся цепей	Вероятность аварийного отключения цепей	Вероятностная продолжительность аварии
1	0	q_1	t_1
2	1	q_2	t_2
3	2	q_3	t_3

б) Параллельная группа трансформаторов T_1, T_2, T_3 , например, при

$$q_{T1} = q_{T2} = q_{T3} = q_T.$$

При $m = 1, 2, 3$ и $n = 3$ имеем следующие $2^3 = 8$ комбинаций:

1) одновременная работа трех трансформаторов; вероятность этого события:

$$P_{T1} \cdot P_{T2} \cdot P_{T3} = (1 - q_{T1})(1 - q_{T2})(1 - q_{T3}) = (1 - q_T)^3;$$

2) авария одного из трансформаторов:

$$\begin{aligned} q_{T1} \cdot P_{T2} \cdot P_{T3} &= P_{T1} \cdot q_{T2} \cdot P_{T3} = \\ &= P_{T1} \cdot P_{T2} \cdot q_{T3} = q_T \cdot (1 - q_T)(1 - q_T); \end{aligned}$$

3) вероятность аварии двух трансформаторов:

$$q_{T1} \cdot q_{T2} \cdot P_{T3} = q_{T1} \cdot q_{T3} \cdot P_{T2} = q_T \cdot q_T \cdot (1 - q_T);$$

4) вероятность аварии трех трансформаторов:

$$q_{T1} \cdot q_{T2} \cdot q_{T3} = q_T \cdot q_T \cdot q_T = q_T^3.$$

Вероятная продолжительность режима аварии:

$$1) t_{a,0} = T \cdot p_{\tau 1} \cdot p_{\tau 2} \cdot p_{\tau 3} = T \cdot (1 - q_{\tau})^3;$$

$$2) t_{a,\tau 1} = T \cdot q_{\tau} \cdot (1 - q_{\tau}) \cdot (1 - q_{\tau});$$

$$3) t_{a,\tau 1, \tau 2} = T \cdot q_{\tau}^2 \cdot (1 - q_{\tau});$$

$$4) t_{a,\tau 1, \tau 2, \tau 3} = T \cdot q_{\tau}^3.$$

Недопоставленная за время аварии мощность составит:

$$1) S_{a,0} = S, \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$2) S_{a,\tau 1} = S_0, \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$3) S_{a,\tau 1, \tau 2} = S_2, \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$4) S_{a,\tau 1, \tau 2, \tau 3} = S_3, \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Результаты можно представить в таблице, аналогичной табл. 2.3.

в) Вероятности отключения разных величин мощности даны, исходя из независимости событий, произведениями вероятностей аварии трансформаторов и линий с учетом ограничений пропускной способности элементов. Объединив результаты расчетов аварийных отключений линий и трансформаторов, составляем табл. 2.4, из которой находим окончательные величины суммарных вероятностей для аварийных отключений мощностей.

Так как имеем последовательное соединение элементов при $n = 2$, то

$$q_{л2} = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) = q_1 + q_2 - q_1 \cdot q_2. \quad (2.27)$$

Суммарная аварийность параллельно-последовательной сети составит:

$$1) q(S_a = 0) = q_1 + q_4 - q_1 \cdot q_4 + q_1 + q_5 - q_1 \cdot q_5 + q_2 + q_4 - q_2 \cdot q_4 + q_2 + q_5 - q_2 \cdot q_5; \quad (2.28)$$

$$2) q(S_a = S_H / 2) = q_1 + q_6 - q_1 \cdot q_6 + q_2 + q_6 - q_2 \cdot q_6; \quad (2.29)$$

$$3) q(S_a = S_H) = q_1 + q_4 - q_1 \cdot q_4 + q_1 + q_5 - q_1 \cdot q_5 + q_2 + q_4 - q_2 \cdot q_4 + q_2 + q_5 - q_2 \cdot q_5. \quad (2.30)$$

Результаты работы группы линий и трансформаторов

Отключено линий	Отключено трансформаторов		
	0	1	2
	$(1 - q_T)^3 = q_4$	$q_T(1 - q_T)^2 = q_5$	$q_T^2(1 - q_T) = q_6$
1	$(0)^*$ $q_1 + q_4 - q_1 \cdot q_4$	$(0)^*$ $q_1 + q_5 - q_1 \cdot q_5$	$(S_H / 2)^*$ $q_1 + q_6 - q_1 \cdot q_6$
2	$(0)^*$ $q_2 + q_4 - q_2 \cdot q_4$	$(0)^*$ $q_2 + q_5 - q_2 \cdot q_5$	$(S_H / 2)^*$ $q_2 + q_6 - q_2 \cdot q_6$
3	$(0)^*$ $q_3 + q_4 - q_3 \cdot q_4$	$(0)^*$ $q_3 + q_5 - q_3 \cdot q_5$	$(S_H / 2)^*$ $q_3 + q_6 - q_3 \cdot q_6$
	Вероятность $(1 - q_{л})^2 = q_1$		$q_T^3 = q_7$
	$q_{л}(1 - q_{л}) = q_2$		$(S_H)^*$ $q_1 + q_7 - q_1 \cdot q_7$
	$q_{л}^2 = q_3$		$(S_H)^*$ $q_2 + q_7 - q_2 \cdot q_7$
			$(S_H)^*$ $q_3 + q_7 - q_3 \cdot q_7$

Примечание. Звездочкой помечена недопоставленная мощность вследствие аварии пути питания (S_H).

Вероятное время режима аварии определим по формулам

$$1) t_a(S_a = 0) = q(S_a = 0) \cdot T; \quad (2.31)$$

$$2) t_a(S_a = S_n / 2) = q(S_a = S_n / 2) \cdot T; \quad (2.32)$$

$$3) t_a(S_a = S_n) = q(S_a = S_n) \cdot T. \quad (2.33)$$

Задача 2.6. Двухцепная линия имеет переключательный пункт, на котором установлен выключатель (В) (рис. 2.6). Решить задачу для двух вариантов:

- 1) пропускная способность $L_1, L_2, L_3, L_4 - 100\% S_n$;
 - 2) пропускная способность элементов схемы - $50\% S_n$.
- q_n - вероятность отключенного состояния В.

Определить вероятность передачи $100\% S_n$. Исходные данные приведены в табл. 2.1.

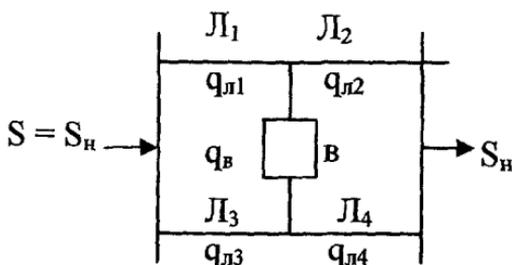


Рис. 2.6. Схема передачи энергии

Решение. Число возможных сочетаний событий поврежденных элементов схемы довольно велико, поэтому в данном случае воспользуемся формулой полной вероятности и рассмотрим два варианта:

- 1) выключатель В - включен;
- 2) выключатель В - отключен.

Обозначим событие, состоящее в передаче $100\% S_n$, как событие А. По формуле полной вероятности имеем:

$$p(A) = p(A/\bar{B}) \cdot q_v + p(A/B) \cdot p_v, \quad (2.34)$$

где $p_v = 1 - q_v$; $p(A/\bar{B})$ - надежность схемы для варианта 1, когда выключатель включен;

$p(A/\bar{B})$ – надежность схемы для варианта 2, когда выключатель отключен.

Определим надежность работы схемы (пропускная способность $L_1, L_2, L_3, L_4 - 100\% S_n$) при отключенном выключателе:

$$p(A/\bar{B}) = 1 - (q_{л1} + q_{л2} - q_{л1} \cdot q_{л2})(q_{л3} + q_{л4} - q_{л3} \cdot q_{л4}), \quad (2.35)$$

где $(q_{л1} + q_{л2} - q_{л1} \cdot q_{л2})(q_{л3} + q_{л4} - q_{л3} \cdot q_{л4})$ – вероятность повреждения одновременно двух цепей $(L_1+L_2)|(L_3+L_4)$.

Находим надежность схемы при включенном выключателе:

$$p(A/\bar{B}) = (1 - q_{л1} \cdot q_{л3})(1 - q_{л3} \cdot q_{л4}), \quad (2.36)$$

где $(1 - q_{л1} \cdot q_{л3})$ и $(1 - q_{л3} \cdot q_{л4})$ – вероятность работы хотя бы одной из параллельных цепей L_1, L_3 и L_2, L_4 .

Вероятность передачи $100\% S_n$ потребителю составит:

$$p(A) = p(A/\bar{B}) \cdot q_v + p(A/B) \cdot p_v. \quad (2.37)$$

Для второго варианта решения задачи определим надежную работу схемы при условии, что пропускная способность каждой линии составляет $50\% S_n$. В этом случае для получения $100\% S_n$ необходимо, чтобы при включенном и отключенном выключателе работали все четыре участка двухцепной линии:

$$\begin{aligned} p(A) &= p_{л1} \cdot p_{л2} \cdot p_{л3} \cdot p_{л4} = \\ &= (1 - q_{л1})(1 - q_{л2})(1 - q_{л3})(1 - q_{л4}). \end{aligned} \quad (2.38)$$

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ АВАРИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СЕТЕЙ

Исходные данные по теме приведены в табл. 3.1

Задача 3.1. На электростанции работают на общие шины четыре генератора (S_1, S_2, S_3, S_4) с вероятностями отказа q_1, q_2, q_3, q_4 .

Определить вероятности недопоставки различных величин мощности (S_a), а также длительность времени отключения при T_r . Исходные данные по вариантам приведены в табл. 3.1.

Решение. Общее количество режимов генераторов (комбинаций) в задаче $2^n = 2^4 = 16$. На возрастающее количество блоков в аварии ($m = 0, 1, 2, 3, 4$) выпадает n (соответственно 1, 4, 6, 1) комбинаций ($C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$). Принимая во внимание различие мощностей генераторов, одинаковому количеству блоков в аварии отвечают различные величины мощностей, отключаемых аварийно.

В качестве примера представим расчет для определения вероятности выпадения из работы мощности $S_{ам} = 150 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ при $S_1 = S_2 = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $S_3 = S_4 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $S = 50 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Указанная мощность может выпасть в четырех комбинациях:

- 1) комбинация 1 – выпадают генераторы 1 и 3;
- 2) комбинация 2 – выпадают генераторы 1 и 4;
- 3) комбинация 3 – выпадают генераторы 2 и 3;
- 4) комбинация 4 – выпадают генераторы 2 и 4.

В нашей задаче имеем параллельную схему, характеризующуюся высокой степенью надежности. Элементы схемы – разной мощности S_i и с разной величиной коэффициента аварийности q_i .

Исходные данные

Вариант	S ₁ , МВ·А	S ₂ , МВ·А	S ₃ , МВ·А	S ₄ , МВ·А	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	S _a =S _Σ *	T _b , ч
1	60	60	100	100	0,02	0,02	0,04	0,04	0,6	7500
2	200	200	60	60	0,04	0,04	0,03	0,03	0,45	6500
3	300	300	100	100	0,05	0,05	0,04	0,04	0,45	7500
4	500	500	800	800	0,06	0,06	0,05	0,05	0,65	8000
5	100	100	200	200	0,03	0,03	0,06	0,06	0,85	5900
6	25	25	50	50	0,02	0,02	0,03	0,03	0,65	6400
7	800	800	200	200	0,03	0,03	0,05	0,05	0,55	7200
8	60	60	150	150	0,02	0,02	0,04	0,04	0,75	7300
9	160	160	60	60	0,05	0,05	0,03	0,03	0,45	7400
10	500	500	300	300	0,025	0,025	0,045	0,045	0,6	7500
11	25	25	50	50	0,45	0,45	0,6	0,6	0,65	7600
12	50	50	100	100	0,04	0,04	0,06	0,06	0,55	7650
13	160	160	150	150	0,03	0,03	0,05	0,05	0,75	7700
14	25	25	75	75	0,02	0,02	0,04	0,04	0,6	7400
15	150	150	50	50	0,2	0,2	0,3	0,3	0,7	8000
16	60	60	160	160	0,3	0,3	0,5	0,5	0,45	8100
17	50	50	100	100	0,5	0,5	0,2	0,2	0,54	7400
18	75	75	150	150	0,3	0,3	0,4	0,4	0,65	6500
19	500	500	200	200	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	5800
20	160	160	300	300	0,5	0,5	0,7	0,7	0,45	6000

Вариант	$q_{п1} \cdot 10^{-3}$	$q_{п2} \cdot 10^{-3}$	$q_{п3} \cdot 10^{-3}$	$q_{т1} \cdot 10^{-3}$	$q_{т2} \cdot 10^{-3}$	$q_{т3} \cdot 10^{-3}$	P_1	P_2	P_3
1	2	3	4	8	15	20	0,6	0,8	0,9
2	1,5	2	3,5	30	45	50	0,5	0,68	0,8
3	4	1,5	2	150	200	100	0,55	0,5	0,9
4	1,5	2,3	3,2	40	60	100	0,6	0,8	0,7
5	3,1	2,2	1,6	110	120	200	0,57	0,6	0,8
6	2,1	1,8	1,1	15	60	70	0,9	0,7	0,5
7	3,1	2,7	1,6	70	110	80	0,71	0,8	0,54
8	1,6	2,4	3,5	40	65	84	0,65	0,55	0,8
9	1,9	2,3	1,7	45	85	155	0,7	0,65	0,5
10	2,6	3,1	4,3	160	100	58	0,9	0,7	0,6
11	1,8	3,9	2,7	74	49	58	0,56	0,65	0,84
12	1,3	2,4	3,6	15	40	50	0,49	0,54	0,61
13	1,7	2,6	3,3	105	55	160	0,55	0,78	0,84
14	2,3	3,2	1,1	35	90	60	0,59	0,64	0,78
15	2,4	1,3	2,3	25	60	45	0,7	0,64	0,52
16	1,4	2,1	1,7	75	115	120	0,62	0,65	0,8
17	1,2	2,1	3,1	8	35	54	0,55	0,6	0,45
18	1,4	1,9	2,1	25	54	65	0,54	0,65	0,76
19	1,45	2,15	3,4	45	60	110	0,64	0,75	0,9
20	3,1	1,5	2,2	15	30	42	0,61	0,72	0,8

Рассмотрим возможные варианты отдельных $m = 2$ элементов, отличающихся при аварии. Каждой комбинации отвечает определенное аварийное уменьшение мощности S_{am} , равной сумме m элементов, входящих в состав данного варианта:

$$S_{am} = \sum_{i=1}^m S_{ai} \cdot \quad (3.1)$$

Вероятность появления аварийного уменьшения мощности S_{am} для определенной комбинации в общем случае рассчитывается по выражению

$$q_{mi} = \prod_{i=1}^m q_i \cdot \prod_{i=m+1}^{n-(m+1)} p_i \cdot \quad (3.2)$$

Рассчитаем коэффициент аварийности для каждой комбинации при $m = 2$:

$$q_{2i} = \prod_2 q_i \prod_2 p_i ; \quad (3.3)$$

комбинация 1

$$q_{21} = q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 ; \quad (3.4)$$

комбинация 2

$$q_{22} = q_1 \cdot p_2 \cdot q_4 \cdot p_3 ; \quad (3.5)$$

комбинация 3

$$q_{33} = q_2 \cdot p_1 \cdot q_3 \cdot p_4 ; \quad (3.6)$$

комбинация 4

$$q_{24} = q_2 \cdot p_1 \cdot q_4 \cdot p_3 \cdot \quad (3.7)$$

Вероятность выпадения из работы мощности S_{a2i} равна сумме вероятностей этих четырех комбинаций:

$$q_m = \sum q_{2i} \cdot \quad (3.8)$$

Вероятное время, на которое мощность S_{ami} будет выключена из работы в течение годового времени T_r (ч), определим по формуле

$$t_a = q_{mi} \cdot T_r. \quad (3.9)$$

Аналогичные расчеты выполняются для остальных случаев выпадения мощности и результаты представляются в табл. 3.2.

Задача 3.2. Сравнить по надежности два варианта электроснабжения (рис. 3.1).

В первом варианте пропускная способность каждой линии – $100\%(S_{н1}+S_{н2})$. Вероятности повреждения линий во втором варианте – независимые. Исходные данные по вариантам приведены в табл. 3.2.

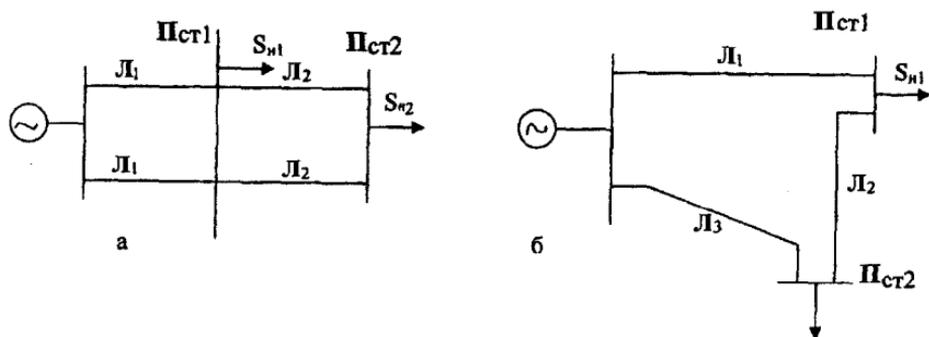


Рис. 3.1. Схемы передачи энергии (а – первый вариант; б – второй вариант)

Решение. 1. Определим вероятность передачи $100\% (S_{н1} + S_{н2})$ по первому варианту. Потребители теряют питание при аварии двух цепей линии L_1 . Вероятность повреждения второй линии зависит от повреждения первой цепи. Применяя теорему умножения для зависимых событий, получаем вероятность повреждения двух цепей L_1 (рис. 3.1,а):

$$q_{л1}(L_1, L_1) = q_{л1}(q_{л1}' / q_{л1}), \quad (3.10)$$

где $(q_{л1}' / q_{л1})$ – условия вероятности повреждения второй цепи L_1 при повреждении первой цепи L_1 .

Результаты решения задачи

Номер комбинации	Число аварийно отключенных блоков	Мощность S_a , отключенная аварийно	Вероятность отключения мощности	Вероятность аварийного отключения S_a	Длительность аварии, ч/год
1	0	0	$p_1 p_2 p_3 p_4$	q_a	t_1
2	1	S_1	$q_1 p_2 p_3 p_4$	q_6	t_2
3	1	S_2	$p_1 q_2 p_3 p_4$	q_b	t_3
4	1	S_3	$p_1 p_2 q_3 p_4$	q_r	t_4
5	1	S_4	$p_1 p_2 p_3 q_4$	q_d	t_5
6	2	$S_1 + S_2$	$q_1 q_2 p_3 p_4$	q_e	t_6
7	2	$S_1 + S_3$	$q_1 p_2 q_3 p_4$	q_k	t_7
8	2	$S_1 + S_4$	$q_1 p_2 p_3 q_4$	q_n	t_8
9	2	$S_2 + S_3$	$p_1 q_2 q_3 p_4$	q_m	t_9
10	2	$S_2 + S_4$	$p_1 q_2 p_3 q_4$	q_v	t_{10}
11	2	$S_3 + S_5$	$p_1 p_2 q_3 q_4$	q_m	t_{11}
12	3	$S_1 + S_2 + S_3$	$q_1 q_2 q_3 q_4$	q_o	t_{12}
13	3	$S_1 + S_2 + S_4$	$q_1 q_2 p_3 q_4$	q_n	t_{13}
14	3	$S_1 + S_3 + S_4$	$q_1 p_2 q_3 q_4$	q_p	t_{14}
15	3	$S_2 + S_3 + S_4$	$p_1 q_2 q_3 q_4$	q_e	t_{15}
16	4	$S_1 + S_2 + S_3 + S_4$	$q_1 q_2 q_3 q_4$	q_r	t_{16}

Вероятность надежного электроснабжения потребителей Пст1 (см. рис. 3.1,а) составит:

$$p_1 = 1 - q(l_1, l_1) = p_1' \quad (3.11)$$

Для потребителей Пст2 (рис. 3.1,а) вероятность надежного электроснабжения определим по формуле

$$p_2 = p_1 \cdot [1 - q_{л2}(q_{л2}' / q_{л2})], \quad (3.12)$$

где $q_{л2}' / q_{л2}$ – условная вероятность повреждения второй цепи L_2 (см. рис. 3.1,а) при поврежденной первой цепи L_2 .

2. Определим вероятность передачи 100% мощности потребителям Пст1 или Пст2 при электроснабжении их по второму варианту (рис. 3.1,б).

Вероятность надежного электроснабжения потребителей Пст1 для второго варианта определяем, как для системы, состоящей из параллельных линий $L_1 || (L_2 + L_3)$:

$$p_1 = 1 - q_{л1} \cdot (q_{л3} + q_{л2} - q_{л3} \cdot q_{л2}) = p_1'' \quad (3.13)$$

Вероятность надежного питания потребителей Пст2 для второго варианта определяем, как для системы, состоящей из параллельных линий $L_3 || (L_1 + L_2)$:

$$p_2 = 1 - q_{л3} \cdot (q_{л1} + q_{л2} - q_{л1} \cdot q_{л2}). \quad (3.14)$$

Вероятность потери питания потребителям Пст1 во втором варианте по сравнению с первым составит:

$$K_1 = \frac{1 - p_1'}{p_1''} \quad (3.15)$$

Для потребителей Пст2 запишем:

$$K_2 = \frac{1 - p_2'}{1 - p_2''}. \quad (3.16)$$

Задача 3.3. На рис. 3.2 для системы передачи электроэнергии представлены передаваемые мощности, пропускные способности элементов и вероятности их повреждения. Определить вероятность потери потребителями мощности 0,5P; 0,7P. Исходные данные приведены в табл. 3.1.

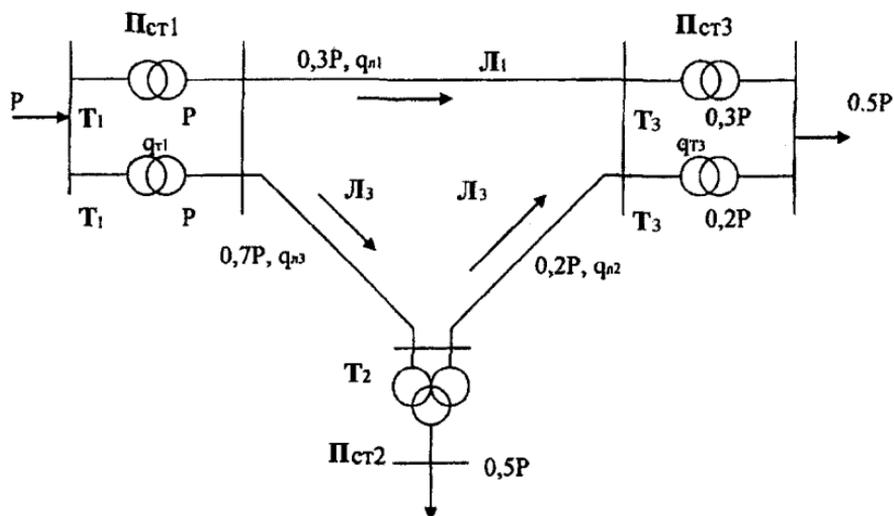


Рис. 3.2. Схема сети

Решение. Для того чтобы потребители потеряли 0,5P, необходимы следующие условия:

- а) чтобы был в работе хотя бы один трансформатор Пст1;
- б) чтобы не повреждены были линии Л₃ и Т₂ Пст2 (при повреждении любой обмотки Т₂ отключается).

Вероятность потери потребителями 0,5P определяется из выражения:

$$p(0,5P) = (1 - q_{T1}^2)(1 - q_{Л3})(1 - q_{T2}) \times \\ \times [(q_{Л1} + q_{T3} - q_{Л1} \cdot q_{T3})(q_{Л2} + q_{T3} - q_{Л2} \cdot q_{T3})], \quad (3.17)$$

где $(q_{Л1} + q_{T3} - q_{Л1} \cdot q_{T3})(q_{Л2} + q_{T3} - q_{Л2} \cdot q_{T3})$ – вероятность одновременного повреждения двух цепей линии Л₁ – Т₂ и линии Л₂ – Т₂, состоящих из последовательно соединенных элементов.

Рассуждая аналогично, получаем вероятность потери потребителями мощности 0,7P:

$$p(0,7P) = (1 - q_{T2}^2)(1 - q_{Л1})(1 - q_{T3})(q_{Л3} + q_{T2} - q_{Л3} \cdot q_{T2}). \quad (3.18)$$

Задача 3.4. На рис. 3.3 представлены передаваемые мощности, вероятности повреждения элементов и их пропускная способность. Определить вероятность потери потребителями мощности 0,5P или $\leq 0,5P$. Исходные данные приведены в табл. 3.1.

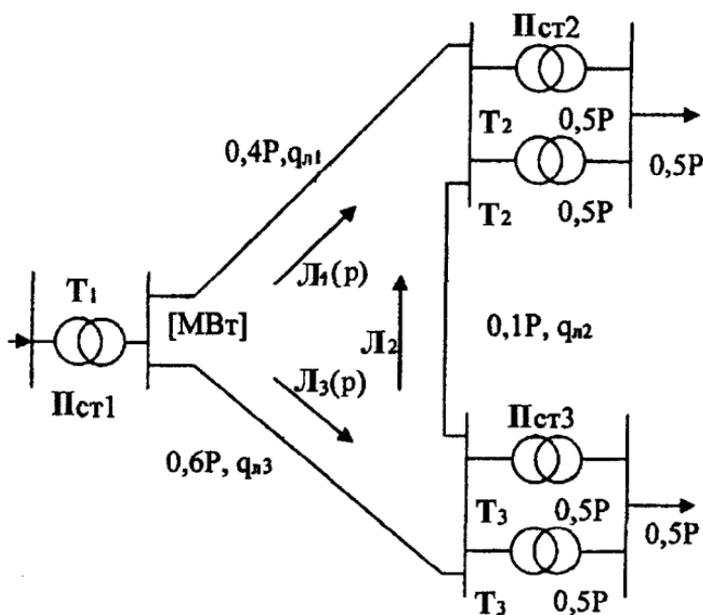


Рис. 3.3.Схема сети

Решение. 1. Потребители теряют $0,5P$ мощности, если повреждаются два трансформатора T_2 , при этом хотя бы один трансформатор T_3 не поврежден; или если повреждаются два трансформатора на подстанции 3, при этом хотя бы один трансформатор T_2 подстанции 2 не поврежден. При выполнении первой гипотезы вероятность надежной работы оставшейся части системы относительно шин подстанции 3 определим по формуле

$$p_3 = (1 - q_{т1})[1 - q_{л3} \cdot (q_{л1} + q_{л2} - q_{л1} \cdot q_{л2})]. \quad (3.19)$$

При выполнении второй гипотезы вероятность надежной работы оставшейся части сети относительно шин подстанции 2 определим по формуле

$$p_2 = (1 - q_{т1})[1 - q_{л1} \cdot (q_{л3} + q_{л2} - q_{л3} \cdot q_{л2})]. \quad (3.20)$$

Вероятности работы хотя бы одного трансформатора T_2 или T_3 соответственно равны: $(1 - q_{т2}^2)$ и $(1 - q_{т3}^2)$.

Вероятность потери потребителями мощности $0,5P$:

$$\begin{aligned} p(0,5P) &= q_{т2}^2 \cdot p_3(1 - q_{т3}^2) + q_{т3}^2 \cdot p(1 + q_{т2}^2) = \\ &= (1 - q_{т1})\{q_{т2}^2 \cdot (1 - q_{т3}^2)[1 - q_{л3}(q_{л1} + q_{л2} - q_{л1} \cdot q_{л2}) + \\ &+ q_{т3}^2(1 - q_{т2}^2)[1 - q_{л1}(q_{л3} + q_{л2} - q_{л3} \cdot q_{л2})]\}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

2. Вероятность потери потребителями не более $0,5P$ мощности равна сумме вероятностей потери 0 и $0,5P$ мощности. Вероятность потери $0,5P$ мощности была получена выше. Определим вероятность сохранения мощности без потерь, то есть вероятность передачи потребителям мощности P :

$$p(0) = (1 - q_{т1})(q_{л2} \cdot p_{л1} \cdot (1 - q_{т2}^2)p_{л3}(1 - q_{т3}^2) +$$

$$\begin{aligned}
 & + p_{л2}(1 - q_{л3} \cdot q_{л1})(1 - q_{т2}^2)(1 - q_{т3}^2) = \\
 & = (1 - q_{т1})(1 - q_{т2}^2)(1 - q_{т3}^2) \cdot [q_{л2}(1 - q_{л1}) \times \\
 & \quad \times (1 - q_{л3})(1 - q_{л2}) \cdot (1 - q_{л3} \cdot q_{л1})].
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Вероятность потери потребителями не более 0,5P:

$$p = p(0,5P) + p(0). \tag{3.23}$$

Задача 3.5. От магистральной кабельной линии в цеху фабрики (рис. 3.4) получают питание три группы двигателей (n_1, n_2, n_3) с одинаковым $\cos\phi$ и вероятностями включения в работу каждого двигателя соответствующей группы p_1, p_2, p_3 . Определить вероятность нагрузки головного участка линии: 1) $S_1 = 0$ кВ·А; 2) $S_2 = 0,3S$; 3) $S_3 = 0,5S$; 4) $S_4 = S$. Допущение: события включения в работу и отключения каждого двигателя каждой группы – независимые. Исходные данные приведены в табл. 3.1.

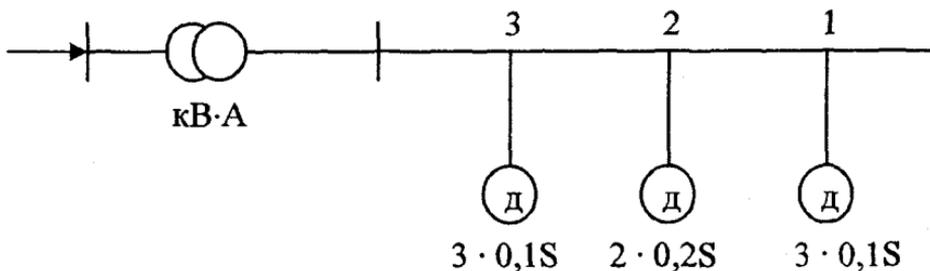


Рис. 3.4. Схема электроснабжения

Решение. Для определения вероятностей нагрузки головного участка используем схему независимых испытаний – биномиальный закон распределения.

1. Вероятность нагрузки головного участка ($S_1 = 0$ кВ·А) определяется при условии, что не включен ни один двигатель (в этом случае $m = 0$):

$$\begin{aligned}
 p(S_1 = 0) &= C_{n_1}^0 \cdot p_1^0 \cdot q_1^{n_1} \cdot C_{n_2}^0 \cdot p_2^0 \cdot q_2^{n_2} \cdot C_{n_3}^0 \cdot p_3^0 \cdot q_3^{n_3} = \\
 &= (1-p_1)^3 \cdot (1-p_2)^2 (1-p_3)^2,
 \end{aligned}$$

где $(1-p_i)$ – вероятность отключенного состояния первого двигателя;

C_n^m – число сочетаний из n элементов по m .

2. Вероятность нагрузки головного участка ($S_2 = 0,3S$) определяется при условии, что включены три двигателя по $0,1S$, один двигатель $0,1S$ и один $0,2S$. Если сложить все вероятности этих состояний, то получается вероятность нагрузки головного участка $S_2 = 0,3S$:

$$\begin{aligned}
 p(S_2 = 0,3S) &= p(3 \cdot 0,1S) + p(1 \cdot 0,1S + 1 \cdot 0,2S) = \\
 &= C_{n_1}^3 \cdot p_1^3 \cdot q_1^0 + C_{n_1}^1 \cdot p_1^1 \cdot q_1^2 \cdot C_{n_2}^1 \cdot p_2^1 \cdot q_2^1.
 \end{aligned}$$

3. Вероятность нагрузки головного участка $p(S_3 = 0,5S)$ определится при условии, что включены в работу пять двигателей по $0,1S$, два двигателя по $0,2S$ и один двигатель $0,1S$, один двигатель $0,2S$ и три двигателя по $0,1S$:

$$\begin{aligned}
 p(S_3 = 0,5S) &= C_{n_1}^3 \cdot p_1^3 \cdot q_1^0 \cdot C_{n_3}^2 \cdot p_3^2 \cdot q_3^1 + \\
 &+ C_{n_2}^2 \cdot p_2^2 \cdot q_2^0 + C_{n_2}^1 \cdot p_2^1 \cdot q_2^1 \cdot C_{n_1}^3 \cdot p_1^3 \cdot q_1^0.
 \end{aligned}$$

4. Вероятность нагрузки головного участка составит:

$$p(S_4 = S) = C_{n_1}^3 \cdot p_1^3 \cdot q_1^0 + C_{n_2}^2 \cdot p_2^2 \cdot q_2^0 + C_{n_3}^3 \cdot p_3^3 \cdot q_3^0.$$

Тема 4

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Исходные данные по теме приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные по вариантам

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L, км	110	150	170	130	140	200	250	300	240
S, МВ·А	120	180	200	240	300	350	390	400	180
$q_k 10^{-2}$	0,7	0,8	0,9	1	0,65	0,7	0,8	0,9	1
$q_T 10^{-2}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$q_{ат} 10^{-2}$	5	8	10	12	15	16	17	18	19
$q_{тр} 10^{-2}$	20	11	12	10	14	8	7	9	10

Окончание табл.4.1

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L, км	120	170	240	260	270	280	290	145	210	230	255
S, МВ·А	190	210	230	240	280	260	230	240	350	310	380
$q_k 10^{-2}$	0,7	0,8	0,8	1	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9
$q_T 10^{-2}$	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
$q_{ат} 10^{-2}$	20	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16
$q_{тр} 10^{-2}$	11	18	19	20	17	16	6	7	10	11	12

Примечание. L – длина линии; S – нагрузка потребителя; q_k , q_T , $q_{ат}$, $q_{тр}$ – вероятности аварийного простоя соответственно котла, турбины, авто-трансформатора, трансформатора.

Задача 4.1. Оценить по трем вариантам степень надежности электроснабжения (рис. 4.1 - 4.3) промышленного потребителя на пилах 110 кВ подстанции 3 при передаче ему мощности S. Принять

для всех вариантов следующие вероятности аварийного простоя элементов схемы электроснабжения: $q_r = 0,04$; $q_{л} = 0,03$ на 100 км; $q_{py220} = 0,3 \cdot 10^{-4}$ для одной ячейки; $q_{py110} = 0,4 \cdot 10^{-5}$; длина линии $L_1 = 1,1 \cdot L$; длина линии $L_2 = 1,2 \cdot L$.

Решение. 1. Оцениваем надежность питания потребителя по первому варианту.

1.1. Определяем вероятность аварийного простоя энергоблока электростанции Ст1, состоящего из группы последовательно соединенных элементов: котла, турбины, генератора, блочного трансформатора и ячейки распределительного устройства 220 кВ:

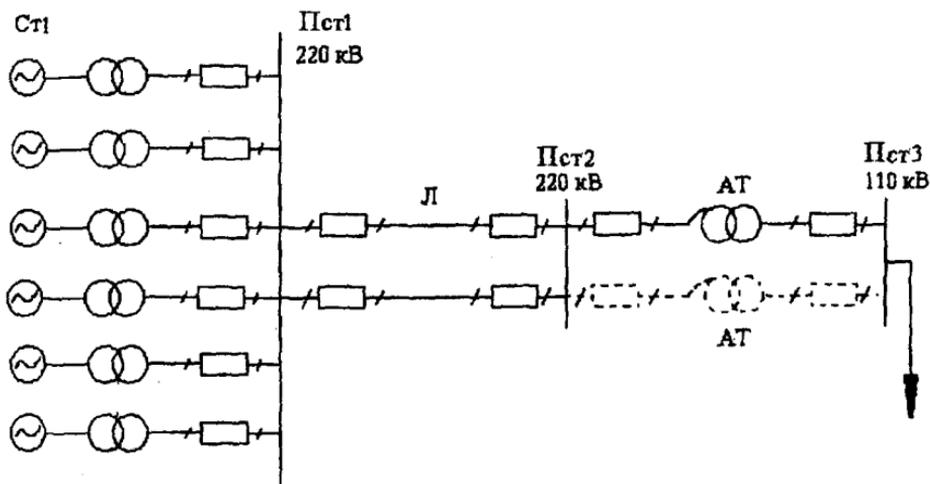
$$q_{бл} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = 1 - (1 - q_k) \times \\ \times (1 - q_r)(1 - q_T)(1 - q_{py220}). \quad (4.1)$$

Вероятность надежной работы блока:

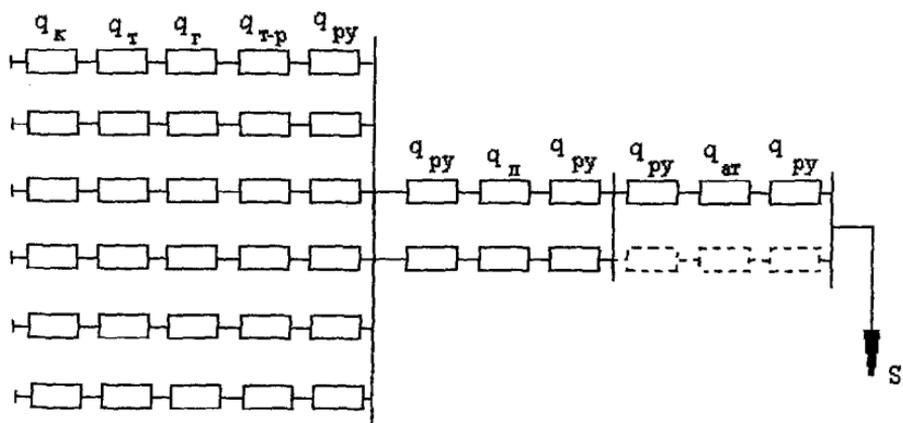
$$P_{бл} = 1 - q_{бл}. \quad (4.2)$$

1.2. Определяем вероятность аварии энергоблоков, работающих параллельно. Вероятность аварии k энергоблоков из n , работающих параллельно, определяется из выражения:

$$q_{k,n} = C_k q_k (1 - q)^{n-k} = k! (n - k)! q^k (1 - q)^{n-k}. \quad (4.3)$$

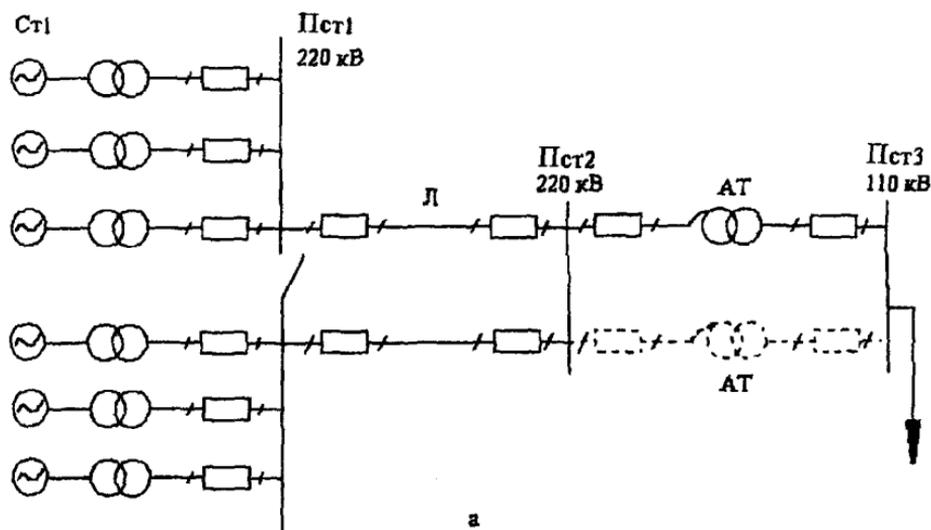


а

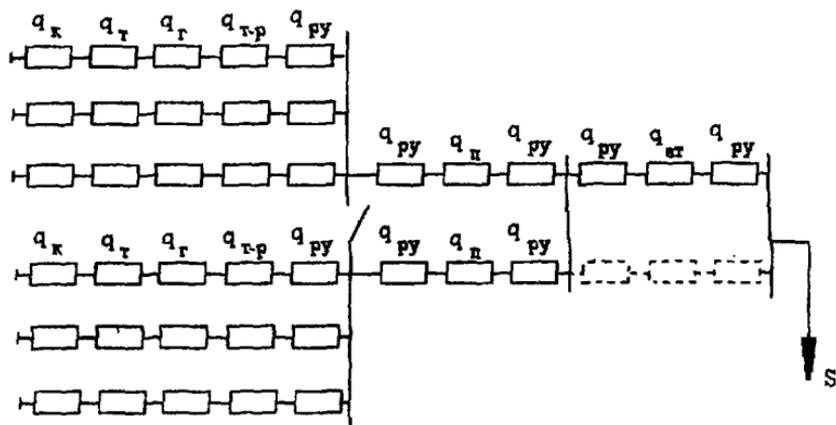


б

Рис. 4.1. Первый вариант питания промышленного потребителя:
 а – схема электроснабжения; б – структурная схема расчета надежности



а



б

Рис. 4.2. Второй вариант питания промышленного потребителя:
 а – схема электроснабжения; б – структурная схема расчета надежности

Результаты расчетов

Номер режима	Количество блоков в аварии	Количество комбинаций C_k^n	Вероятность аварийного отключения k из n блоков q_{kn}
1	0	1	q_1
2	1	6	q_2
...
7	6		q_6

1.3. Определяем вероятность аварии линии 220 кВ между подстанциями 1 и подстанциями 2:

$$q_{л} = 1 - (1 - q_{ру220})(1 - q_{лL})(1 - q_{ру220}); \quad (4.4)$$

$$p_{л} = 1 - q_{л}. \quad (4.5)$$

Величины коэффициентов аварийности, определяющих вероятности режима аварии для двухцепной линии, сводим в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчетов

Номер режима	Число цепей в аварии	Количество комбинаций C_k^n	Вероятность аварийного отключения
1	0	1	q_1
2	1	2	q_2
3	2	1	q_3

1.4. Определяем вероятность аварии последовательно-параллельной группы энергоблоков и двухцепной линии. Результаты сводим в табл. 4.4.

Результаты расчетов

		Блоки электростанции							
		6	5	4	3	2	1	0	
Количество цепей в аварии	Количество блоков	Вероятность отключения цепей	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}
	Цепи линии	2	q_1	$q_1 + q_5 - q_1 \cdot q_5$ (S)*	$q_{\Sigma 1}$ (S)*	$q_{\Sigma 2}$ (S)*	$q_{\Sigma 3}$ (S)*	$q_{\Sigma 4}$ (S)*	$q_{\Sigma 5}$ (S)*
1		q_2	$q_{\Sigma 7}$ (S)*	$q_{\Sigma 8}$ (0)*	$q_{\Sigma 9}$ (0)*	$q_{\Sigma 10}$ (0)*	$q_{\Sigma 11}$ (0)*	$q_{\Sigma 12}$ (0)*	$q_{\Sigma 13}$ (0)*
0		q_3	$q_{\Sigma 14}$ (S)*	$q_{\Sigma 15}$ (0)*	$q_{\Sigma 16}$ (0)*	$q_{\Sigma 17}$ (0)*	$q_{\Sigma 18}$ (0)*	$q_{\Sigma 19}$ (0)*	$q_{\Sigma 20}$ (0)*

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная при аварии потребителю.

Вероятность аварии пути питания до шин 220 кВ подстанции 2 (с учетом генерации мощности) может быть определена как сумма вероятностей полного ограничения пропускной способности схемы. В нашей задаче сумма вероятностей для случая недоставки потребителю мощности S [МВ·А] составит:

$$q_{6л} = q_{Ст1} - q_{Пст2}. \quad (4.6)$$

1.5. Определяем вероятность аварии блока трансформации 220/110 кВ подстанции 2 при работе одного трансформатора:

$$q_{Пст2} = 1 - (1 - q_{py220}) \cdot (1 - q_{ат}) \cdot (1 - q_{py110}) \quad (4.7)$$

1.6. Находим вероятность аварии схемы питания до шин 110 кВ при работе одного автотрансформатора:

$$q_1 = 1 - (1 - q_{\text{бл}}) \cdot (1 - q_{\text{Пст}2}), \quad (4.8)$$

где $q_{\text{бл}}$ – коэффициент аварийности, определяющий вероятность недоставки требуемой мощности потребителю при учете аварийности энергоблоков станции 1 и цепей 220 кВ подстанции 1 и подстанции 2;

$q_{\text{Пст}2}$ – коэффициент аварийности блока трансформации 220/110 кВ подстанции 2.

Из оценки коэффициента аварийности пути питания следует, что при относительно низком уровне аварийности большинства элементов решающее влияние на надежность схемы оказывает аварийность автотрансформатора. Поэтому, несмотря на то, что мощность одного АТ достаточна для потребителя, необходимо с учетом надежности питания установить аналогичный АТ, работающий параллельно либо остающийся в резерве.

1.7. Определяем вероятность аварии схемы трансформации 220/110 кВ на подстанции В при работе двух автотрансформаторов.

Второй автотрансформатор, рекомендуемый для подстанции 2, берется аналогичным первому, поэтому коэффициент аварийности (с учетом распределительных устройств) будет равен $q_{\text{Пст}2}$. Коэффициент аварийности схемы трансформации определяется с учетом параллельной группировки элементов (табл. 4.5).

Т а б л и ц а 4.5

Результаты расчета

Номер режима	Количество автотрансформаторов k в аварии	Вероятность аварии k из n автотрансформаторов, q_{kn}
1	0	q_1
2	1	q_2
3	2	q_3

1.8. Определяем вероятность аварии схемы питания до шин 110 кВ подстанции В при работе двух автотрансформаторов.

Рассмотрим последовательно-параллельное соединение элементов, принимая определенные ранее коэффициенты аварийности схемы до шин 220 кВ подстанции 2 (см.п. 1.6), а также схемы трансформации подстанции 2 (см.п.1.7). Результаты представляем в табл. 4.6 (последовательно-параллельное соединение схемы питания и автотрансформаторов – первый вариант).

Т а б л и ц а 4.6

Результаты расчета

		Количество автотрансформаторов в аварии	Автотрансформаторы Пст2		
			2	1	0
Режим сети		Вероятность аварии	$q_{\Sigma 1}$	$q_{\Sigma 2}$	$q_{\Sigma 3}$
Сеть до шин Пст В	Авария	q_1	$q_{\Sigma 4} (S)^*$	$q_{\Sigma 5} (S)^*$	$q_{\Sigma 6} (S)^*$
	Работа	q_2	$q_{\Sigma 7} (S)^*$	$q_{\Sigma 8} (0)^*$	$q_{\Sigma 9} (0)^*$

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная при аварии потребителю.

Полное ограничение пропускной способности схемы, питающей потребителя, наступит с вероятностью, равной сумме соответствующих вероятностей недоставки требуемой мощности.

2. Оцениваем надежность питания для второго варианта (с секционированием шин).

Схема питания потребителя аналогична первому варианту, шины 220 кВ подстанции 1 секционированы; при этом каждая из шин работает с одной цепью ЛЭП 220 кВ (подстанция 1 – подстанция 2), а также с тремя энергетическими блоками станции Ст1. Для числового анализа схемы используем определенные ранее коэффициенты

аварийности связанных элементов (линия, блок, устройство трансформации 220/110 кВ).

2.1. Определяем вероятность аварии блоков, работающих параллельно на одну секцию шин подстанции А, а также аварии цепи линии.

Каждая из секций шин подстанции 1 работает с тремя одинаковыми энергетическими блоками с коэффициентом аварийности, определенным в п. 1.1. Результаты расчетов сводим в табл. 4.7 (параллельное соединение энергетических блоков – второй вариант).

Т а б л и ц а 4.7

Результаты расчета

Количество блоков в аварии	Количество комбинаций C_k^n	Вероятность аварийного отключения k из n блоков, q_{kn}
0	1	q_1
1	3	q_2
2	3	q_3
3	1	q_4

Полная авария для каждого из путей питания наступит тогда, когда в режиме аварии окажутся все три блока, работающие с одной секцией Пст 1 (без учета режима работы линии) или когда в режиме аварии будет передающая линия (без учета режима работы блоков). Все случаи, вытекающие из комбинации режимов последовательно - параллельной совместной работы элементов с одной секции представляем в табл. 4.8. Вероятность невозможности эксплуатации одного передающего пути равна сумме вероятностей аварийного ограничения пропускной способности схемы.

Результаты расчета

		Количество блоков в аварии	Блоки, работающие с одной секции			
			3	2	1	0
Количество цепей ЛЭП в аварии		Вероятность аварии	q_3	q_6	q_9	p_{12}
			1	0		
Цепь линии 220 кВ	1	q_1	q_4 (S)*	q_7 (S)*	q_{10} (S)*	q_{13} (S)*
	0	p_2	q_5 (S)*	q_8 (0)*	q_{11} (0)*	q_{14} (0)*

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная при аварии потребителю.

2.2. Вероятность аварии схемы питания до шин 220 кВ подстанции 1.

Доставка энергии до шин 220 кВ Пст2 реализована двумя параллельными передающими линиями, связанными с отдельными секциями шин подстанции 1 с одинаковыми коэффициентами аварийности (см. п. 2.1). Авария схемы питания наступит в случае одновременного выхода из строя обеих линий, что задано вероятностью, равной произведению вероятностей аварий одной цепи:

$$q_{Ст1, Пст2} = q_{Ст1, Пст2, С1} \cdot q_{Ст1, Пст2, С2} = q_{Ст1, Пст2В, С1}, \quad (4.9)$$

где С1, С2 – секции 1, 2.

2.3. Определяем вероятность аварии схемы питания до шин 110 кВ подстанции В при работе одного автотрансформатора.

Вероятностный коэффициент аварийности последовательного соединения элементов [схема питания до шин 220 кВ подстанции 2, автотрансформатор 220/110 кВ (вместе с распределительными устройствами), эквивалентный вероятности перерыва в питании потребителя на напряжении 110 кВ во втором варианте при работе первого автотрансформатора] следует из зависимости

$$q_2 = 1 - (1 - q_{Ст1, Пст2}) \cdot (1 - q_{Пст2}). \quad (4.10)$$

Определяем вероятность пригодности к эксплуатации схемы :

$$p_2 = 1 - q_2. \quad (4.11)$$

2.4. Находим вероятность аварии схемы питания до шин 110 кВ подстанции 2 при работе двух автотрансформаторов.

Рассмотрим последовательно-параллельное соединение элементов, принимая ранее определенные коэффициенты аварийности схемы питания до шин 220 кВ подстанции 2 второго варианта (см. п. 2.2.), а также схемы трансформации подстанции 2 (аналогично первому варианту – п. 1.7). Результаты расчетов сводим в табл. 4.9.

Т а б л и ц а 4.9

Результаты расчета

		Количество АТ в аварии	Автотрансформаторы		
			2	1	0
Режим сети		Вероятность режима сети	q_2	q_3	q_4
Схема до шин подстанции В	Авария	q_1	q_5 (S)*	q_6 (S)*	q_7 (S)*
	Способность к работе	p_1	p_8 (S)*	p_9 (0)*	p_{10} (0)*

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная при аварии потребителю.

3. Оценим надежность для третьего варианта.

В третьем варианте в дополнение к соединениям, примененным во втором варианте, вводится еще одна связь с электростанцией 2 (Ст2) на шинах 220 кВ подстанции 2 линиями 220 кВ через подстанции 3 и 4. Для расчетов надежности питания можно использовать коэффициенты надежности, определенные для второго варианта и учитывающие питание со станции Ст1.

Численного определения требует коэффициент аварийности передающего пути станции Ст2 вместе с генерирующими элементами этой станции.

3.1. Находим вероятность аварии блоков станции Ст2, работающих параллельно на шины подстанции 4.

Элементы и схемы энергетических блоков станции Ст2 идентичны случаю станции Ст.1. Случайный коэффициент аварийности до шин 220 кВ подстанции 4 будет равен величине вероятности аварии для случая трех блоков, работающих на одну систему шин в станции Ст1 (см. п. 2.1):

$$Q_{Ст2,Пст4} = Q_{33}.$$

3.2. Определяем вероятность аварии передающих линий 220 кВ подстанций 4 – 2.

Коэффициент аварийности для одной цепи линии 220 кВ от подстанции 4 до подстанции 3 с учетом ее длины, а также распределительных устройств в энергетических подстанциях составит:

$$\begin{aligned} Q_{л,Пст4,Пст3} &= 1 - (1 - q_{py220}) \times \\ &\times (1 - q_{л220} \cdot L_2) \cdot (1 - q_{py220}). \end{aligned} \quad (4.12)$$

Аналогичный коэффициент аварийности для одной цепи линии подстанций 3 – 2 составит:

$$\begin{aligned} Q_{л,Пст3,Пст2СВ} &= 1 - (1 - q_{py220}) \times \\ &\times (1 - q_{л220} L_1) \cdot (1 - q_{py220}). \end{aligned} \quad (4.13)$$

Последовательно-параллельную группу цепей передающих линий (вариант 3) представляем в табл. 4.10.

Т а б л и ц а 4.10

Результаты расчета

		Линия Пст4 – Пст3			
		Число цепей в аварии	2	1	0
		Вероятность	q_4	q_6	p_7
		q_1	q_5 (S)*	0,000149 (S)*	0,001788 (S)*
Линия Пст3 – Пст2	1	q_2	q_8 (S)*	q_9 (0)*	q_{10} (0)*
	0	p_3	q_{11} (S)*	q_{12} (0)*	q_{13} (0)*

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная во время аварии.

Вероятность аварии последовательно соединенных двухцепных линий подстанций 4 – подстанций 3, а также подстанций 3 – подстанций 2 определяется с учетом всех возможных комбинаций полного ограничения пропускной способности схемы. Результаты расчетов заносим в табл. 4.9. Вероятность безаварийной работы составит:

$$P_{\text{Пст4, Пст2}} = 1 - q_{\text{Пст4, Пст2}}. \quad (4.14)$$

3.3. Находим вероятность аварии при питании со Ст2 до шин 220 кВ подстанции 2.

Схему генерации мощности на Ст2 и схему передачи можно рассматривать как последовательное соединение элементов. Вероятность коэффициента составит:

$$q_{\text{Ст2, Пст2}} = 1 - (1 - q_{33}) \cdot (1 - q_{\text{Пст4, Пст3}}). \quad (4.15)$$

3.4. Определяем совместную вероятность аварии питания на шинах 220 кВ подстанции 2.

Пути питания от Ст1 и Ст2 создают параллельную группу. В соответствии с принятыми допущениями полное аварийное ограничение пропускной способности схемы питания наступит в случае одновременного отключения питания от двух станций. Вероятность этого события – произведение вероятностей отдельных путей питания:

$$Q_{Ст1, Пст2} = Q_{Ст1, Пст2} \cdot Q_{Ст2, Пст2}. \quad (4.16)$$

Можно также рассмотреть другие случаи:

– вероятность одновременной возможности эксплуатации обоих путей питания

$$P_{Ст1, Пст2} = P_{Ст1, Пст2} \cdot P_{Ст2, Пст2}; \quad (4.17)$$

– вероятность возможности эксплуатации одного из путей

$$P_{Ст1, Пст2} = P_{Ст1, Пст2} \cdot Q_{Ст2, Пст2}; \quad (4.18)$$

$$P_{Ст1, Пст2} = Q_{Ст1, Пст2} \cdot P_{Ст2, Пст2}. \quad (4.19)$$

Сумма этих вероятностей равна единице, т.к. описываемые события исчерпывают все возможные режимы группы.

3.5. Находим вероятность аварии схемы питания до шин 110 кВ подстанции 2 при работе двух автотрансформаторов.

Аналогичные расчеты (см. п.2.4) представим в табл. 4.11. Случайный коэффициент аварийности схемы питания при работе двух автотрансформаторов или вероятность невозможности эксплуатации цепей питания составит для третьего варианта при работе двух автотрансформаторов q_3 . Вероятность возможности эксплуатации определим по формуле

$$p_3 = 1 - q_3.$$

Результаты расчета

		Количество АТ в аварии	Автотрансформатор		
			1	2	0
Режим схемы		Вероятность режима аварии	q_2	q_3	q_4
Схема до шин подстанции В	Авария	q_1	q_5 (S)*	q_6 (S)*	q_7 (S)*
	Способность к работе	p_1	p_8 (S)*	p_9 (0)*	p_{10} (0)*

Примечание. Звездочкой помечена мощность, не доставленная во время аварии.

4. Выводы. Задача делает возможной количественную оценку степени надежности питания потребителя в зависимости от примененной схемы питания. Результаты для коэффициентов аварийности заносим в табл. 4.12, а ожидаемые в году часовые перерывы в питании потребителя – в табл. 4.13.

Таблица 4.12

Результаты расчетов

Величина коэффициента аварийности	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
До шин 220 кВ подстанции 2	q_1	q_3	q_5
Вместе для схемы питания при работе одного автотрансформатора	q_2	q_4	q_6
Вместе для схемы питания при работе двух автотрансформаторов	q_7	q_8	q_9

Результаты расчетов

Оборудование подстанции 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Один автотрансформатор	t_1	t_3	t_5
Два автотрансформатора	t_2	t_4	t_6

Тема 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ВАРИАНТОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

Исходные данные по теме приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Данные по вариантам

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_m, \text{ч}$	3500	5000	4600	4000	4200	3800	6000	5110	5200	4100
$P_m, \text{МВт}$	30	32	35	35	39	29	33	34	37	38
$\gamma, \text{мин}$	35	25	8	8	27	20	130	250	27	60
$\delta, \text{от.ед}$	1	1	1	1	1	1	1	4,3	1	1,1

Окончание табл. 5.1

Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$T_m, \text{ч}$	3300	5500	4700	4900	5300	5400	5600	4300	4440	4600
$P_m, \text{МВт}$	32	33	30	35	36	37	38	39	34	35
$\gamma, \text{мин}$	40	210	40	70	80	85	120	100	65	60
$\delta, \text{от.ед}$	2	2,1	1	1,5	1,6	1,4	1,8	1,2	1,4	3,5

Примечание.

K_m – коэффициент дефицита мощности при отключении электропередачи;

β_0, β_p – удельные расходы топлива на основной и резервной электростанциях;

$Z_{то} Z_{тр}$ – стоимость единицы топлива на основной и резервной электростанциях;

η – коэффициент, учитывающий дополнительный ущерб, обусловленный браком продукции, порчей оборудования и расстройством технологического процесса;

y_p – удельный ущерб от внеплановых ремонтов и ревизий отказавших элементов энергосистемы;

$y_ч$ – удельный ущерб, обусловленный снижением частоты и напряжения системы;

y_0 – удельный ущерб энергосистемы;

$y_т$ – удельный ущерб энергосистемы, обусловленный перерасходом топлива на резервных электростанциях;

$y_к$ – удельное значение косвенной составляющей системного ущерба;

T_m – время использования максимальной мощности узла нагрузки;

P_m – максимальная мощность узла нагрузки;

γ – постоянная часть времени, необходимая для восстановления узла нагрузки (предприятия);

δ – коэффициент, обусловленный характером технологического процесса.

1. Варианты 1 – 10: $k_m = 0,2$; $\beta_0 = 0,29$; $\beta_p = 0,396$; $Z_{тр} = Z_{то} = 0,002$ руб./кг; $\eta = 1,6$; $y_p + y_ч = 25\%(y_0 + y_т + y_к)$.

2. Варианты 11 – 20: $k_m = 0,1$; $\beta_0 = 0,314$; $\beta_p = 0,389$; $Z_{тр} = Z_{то} = 0,002$ руб./кг; $\eta = 1,9$; $y_p + y_ч = 30\%(y_0 + y_т + y_к)$.

Задача 5.1. Рассмотрим два варианта схемы электроснабжения промышленного узла (рис. 5.1).

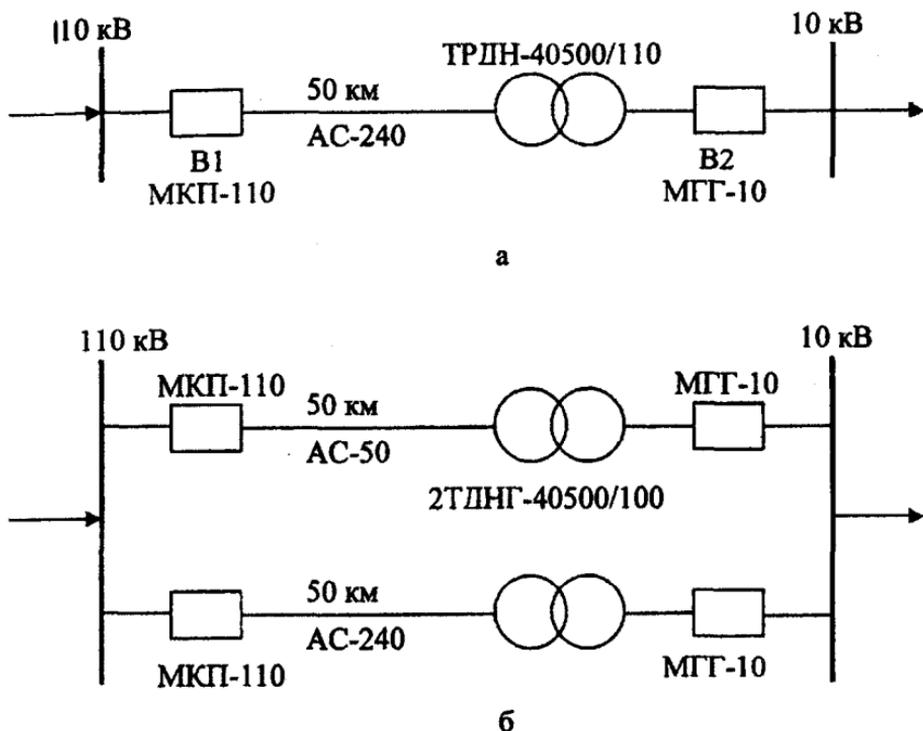


Рис. 5.1. Варианты схемы электроснабжения узла нагрузки:
а – первый вариант; б – второй вариант

Заданы максимальная нагрузка потребителя и время ее использования: P_m , МВт; T_m , ч/год. Потребитель имеет дополнительно источник питания от резервных КЭС системы. Вероятности аварии отдельных элементов схемы составят:

$$q_{B2} = 0,05 \cdot 10^{-3}; \quad q_{л} = 0,006 \text{ (на 100 км)}; \quad q_{т} = 0,004; \quad q_{B1} = 0,03 \cdot 10^{-3}.$$

Стоимость системы электроснабжения по вариантам (в ценах 1989 года) $K_{лЭП1} = 201$ тыс.руб.; $K_{лЭП2} = 337$ тыс.руб. Удельная стоимость питающей электростанции по вариантам одинакова и равна 100 руб./кВт; составляющая заработной платы и себестоимость выработки электроэнергии и ее передачи по обоим вариантам одинакова: $U_{31} = U_{32} = 0,12$ коп./кВт·ч.

В качестве базисной электростанции принимаем конденсационную станцию с агрегатами К-300-240, удельный расход топлива β_0 ; в качестве резервной берется конденсационная станция с агрегатами К-50-90, удельный расход топлива β_p ; обе станции работают на каменном угле с расчетной стоимостью 15 руб./т. у.т.

Количество отключений в год системы электроснабжения и длительность аварийного ремонта : $a_0(B1) = 0,03$, $t_0 = 25$ ч, $a_0(ВЛ) = 0,7$ (первый вариант на 100 км); $a_0(ВЛ) = 0,15$ (второй вариант для двух цепей на 100 км), $t_0 = 10$ ч; $a_0(T) = 0,025$, $t_0 = 90$ ч; $a_0(B2) = 0,006$, $t_0 = 15$ ч. Требуется определить экономичность двух вариантов электроснабжения промышленного узла.

Решение. 1. Определяем вероятность отказа линии электропередачи 110 кВ для первого варианта:

$$q_{лэп1} = q_{в1} + q_{л} + q_{т} + q_{в2} - q_{в1} \cdot q_{л} \cdot q_{т} \cdot q_{в2}. \quad (5.1)$$

2. Находим надежность работы линии электропередачи для первого варианта:

$$p_{лэп1} = 1 - q_{лэп1}; \quad (5.2)$$

$$P_{лэп1} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4. \quad (5.3)$$

3. Рассчитываем надежность системы электроснабжения для второго варианта:

$$p_{лэп2} = 1 - (1 - p_{лэп1})^2. \quad (5.4)$$

4. Определяем удельную стоимость каждого варианта:

$$k_{лэп1} = K_{лэп1}/P_m \quad [\text{руб./кВт}]; \quad (5.5)$$

$$k_{лэп2} = K_{лэп2}/P_m \quad [\text{руб./кВт}]. \quad (5.6)$$

5. Определяем удельный ущерб y_0 по вариантам:

$$y_0 = \frac{1}{k_M} \left(\frac{p_{эс} \sum_{i=1}^n k_{эсi} + p_c \sum_{j=1}^m k_{сj}}{T_M} + U_3 \right), \quad (5.7)$$

где k_M – коэффициент дефицита мощности при отключениях линий электропередач;

$U_{влэп} = 110 \dots 220$ кВ, $k_M = 0,1$; $U_{влэп} = 330$ кВ, $k_M = 0,2$; $U_{влэп} = 500$ кВ, $k_M = 0,3$;

$$k_M = \frac{P_0}{P_{лэп}} = \frac{\Delta \mathcal{E} \cdot 8760}{P_{лэп} \cdot T_M \cdot t_0}, \quad (5.8)$$

где P_0 – средняя мощность потребителей, питание которых прекращается при отказе рассматриваемых элементов;

T_M – число часов использования максимальной мощности (пропускной способности), ч;

$P_{лэп} = P_M$ – максимальная пропускная способность отказавших элементов;

t_0 – продолжительность вынужденного простоя системы электроснабжения, ч;

$k_{эс}$ и k_c – удельные капиталовложения соответственно в отключаемое оборудование питающих электростанций и электрических сетей, $p_{эс} = 0,06$, $p_c = 0,03$.

б. Находим значение удельного ущерба энергосистемы, обусловленного перерасходом топлива на резервных КЭС системы

$$y_T = (\beta_p \cdot Z_{тр} - \beta_0 \cdot Z_{то}) \cdot (k_p/k_M), \quad (5.9)$$

где β_p , β_0 – относительные приросты (частичные удельные расходы) топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии соответственно на резервных и основных электростанциях системы, руб./кВт·ч;

$Z_{тр}$, $Z_{то}$ – стоимость единицы топлива, сжигаемого соответственно на резервных и основных электростанциях системы, руб./кВт·ч;

k_p – коэффициент, характеризующий величину используемого аварийного резерва системы в долях от пропускной способности элемента;

$$k_p = 1 - k_m. \quad (5.10)$$

7. Рассчитываем удельное значение косвенной составляющей системного ущерба по вариантам:

$$y_k = \frac{p_H \sum_{i=1}^n k_{эсi} + p_H \sum_{j=1}^m k_{cj}}{k_M T_{\max}}, \quad (5.11)$$

где p_H – нормативный коэффициент эффективности дополнительных капложений.

8. Вычисляем общее удельное значение системного ущерба по вариантам:

$$\begin{aligned} y_{эс} &= y_0 + y_T + y_p + y_ч = \\ &= \frac{(p_H + p_{эс}) \sum_{i=1}^n k_{эсi} + (p_H + p_c) \sum_{j=1}^m k_{cj}}{k_M T_{\max}} + \frac{U_3}{k_M} + \\ &+ (\beta_p Z_{тр} - \beta_0 Z_{то}) \frac{k_p}{k_H} + y_p + y_ч, \end{aligned} \quad (5.12)$$

где y_p – удельный ущерб, вызываемый внеплановыми ремонтами и ревизиями отказавших элементов или их восстановлением;

$y_ч$ – удельный ущерб, обусловленный снижением частоты и напряжения; в практических расчетах сумму значений составляющих y_p и $y_ч$ принимаем равной 25 ... 40% суммы составляющих y_0 , y_T , y_k .

9. Находим математическое ожидание годового недоотпуска электроэнергии по вариантам:

$$\Delta W = k_m \cdot p_m \cdot T_m \cdot (t_0/8760) = k_m \cdot p_m \cdot T_m \cdot q_c, \quad (5.13)$$

где q_c – вероятность отказа системы электроснабжения.

10. Вычисляем математическое ожидание ущерба энергосистемы в каждом варианте:

$$M(Y)_{эс} = \Delta W \cdot y_{эс}. \quad (5.14)$$

11. Определяем (по вариантам электроснабжения) вероятные числа отключений и продолжительность простоя в год системы электроснабжения (это необходимо для расчета математического ожидания недополученной потребителями энергии):

$$a_{0 \text{ посл}} = \sum_{i=1}^n a_{oi}; \quad (5.15)$$

$$a_{0 \text{ пар}} = \frac{mt_0}{\sum_{i=1}^n a_{oi} \cdot t_{oi}}, \quad (5.16)$$

$$t_0 = q_{эс} \cdot 8760, \quad (5.17)$$

где n , m – число элементов электроснабжения, соединенных последовательно, параллельно;

$a_{0 \text{ посл}}$, $a_{0 \text{ пар}}$ – вероятное число отключений всей системы электроснабжения при последовательном, параллельном соединении элементов; данные о количестве отключений в год берутся из справочных таблиц, $a_0 = 0,04 \dots 8,3$, в зависимости от напряжения;

t_0 – средняя длительность аварийного ремонта; для отдельных элементов при параллельном соединении берется из справочных таблиц, $t_0 = 0,7 \dots 120$ ч.

12. Находим продолжительность аварийного режима потребителей в год по вариантам:

$$t_{\text{пр}j} = a_0 \cdot \gamma_j + \delta_j t_0, \quad (5.18)$$

где a_0 – вероятное число отключений всей системы электроснабжения в год;

γ_1 – постоянная часть времени, необходимая для восстановления работы предприятия (потребителя) и не зависящая от длительности отключения электропередачи, ч;

δ_j – коэффициент, обусловленный характером технологического процесса.

Значения коэффициентов для различных предприятий и технологических процессов приводятся в справочной литературе; $\gamma = 8 \dots 4000$ мин., $\delta = 1 \dots 45$ отн. ед.

13. Определяем математическое ожидание недополученной потребителями электроэнергии в год по вариантам:

а) при полном нарушении электроснабжения потребителей ($k_m = 1,0$)

$$\Delta W_{\text{П}j} = P_{\text{м}j} \frac{T_{\text{П}j} \cdot t_{\text{П}j}}{8760}, \quad (5.19)$$

б) при частичном нарушении электроснабжения потребителей

$$\Delta W_{\text{П}j} = P_{\text{м}j} \cdot k_{\text{м}j} \frac{T_{\text{П}j} \cdot t_{\text{П}j}}{8760}, \quad (5.20)$$

где $k_{\text{м}j}$ – коэффициент дефицита мощности системы для j -го потребителя;

$P_{\text{м}j}$ – максимальная нагрузка j -го потребителя, кВт;

$T_{\text{П}j}$ – время использования максимума нагрузки в год для j -го потребителя, ч;

$t_{\text{П}j}$ – продолжительность аварийного режима j -го потребителя в год, ч.

14. Вычисляем математическое ожидание годового ущерба потребителям по вариантам:

$$M(Y)_{\Pi} = \sum_{j=1}^k \Delta W_{\pi j} \cdot y_{\pi j} \cdot \eta, \quad (5.21)$$

где $y_{\pi j}$ – ущерб j -го потребителя, приходящийся на единицу недополученной электроэнергии (удельный ущерб), руб./кВт·ч; принимается из справочных данных в зависимости от типа предприятия, $y_{\pi j} = 0,04 \dots 1,36$;

η – коэффициент, учитывающий дополнительный ущерб, обусловленный браком продукции, порчей оборудования и расстройством технологического процесса; в практических расчетах принимаем $\eta = 1,4 \dots 2,0$.

15. Находим приведенные затраты по рассматриваемым вариантам электроснабжения, используя тот факт, что приращение ежегодных издержек периода нормальной эксплуатации вызывается главным образом изменением амортизационной составляющей, пропорциональной единовременным затратам:

$$Z = (p_n + p_a) K + M(Y)_{\Pi} + M(Y)_{\text{эс}}. \quad (5.22)$$

16. Результаты расчета сводим в табл. 5.2 и производим сопоставление экономичности двух вариантов электроснабжения промышленного узла нагрузки.

Таблица 5.2

Результаты расчетов и их сопоставление

Варианты	$K_{\text{лэп}}$, руб./кВт	Математические ожидания					3, тыс. руб. без учета ущерба	с учетом ущерба
		ΔW , тыс. кВт·ч	$M(Y)_{\text{эс}}$, тыс. руб.	$\Delta W_{\text{пл}}$, тыс. кВт·ч	$M(Y)_{\text{д}}$, тыс. руб.			
ЛЭП-110, кВ								
ЛЭП-110, кВ (две линии)								

Тема 6

СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Исходные данные к теме приведены в табл. 6.1.

Варианты 1–4: $L_{1,2,6}^{110}$, $L_{3,4,5,7}^{220}$; 5–8: $L_{1,2,6}^{330}$, $L_{3,4,5,7}^{220}$;

9–12: $L_{3,4,5,6}^{330}$, $L_{1,2,7}^{220}$; 13–16: $L_{1,2,6}^{110}$, $L_{3,4,5,7}^{35}$; 17–20: $L_{1,2,6}^{35}$, $L_{3,4,5,7}^{110}$.

Варианты 1–20: $w^{35} = 1,2$; $T_B^{35,110} = 8$; $\mu^{35,220} = 6$;

$T_{II}^{35,110,220,330} = 10$ ч; $\mu^{110} = 5$ 1/год; $\mu^{330} = 8$; $w^{330} = 0,5$;

$w^{110} = 1,0$ 1/год; $w^{220} = 0,7$ 1/год.

Таблица 6.1

Длина линий сети

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_1	40	50	60	35	400	350	380	250	210	240
L_2	60	30	35	50	340	300	280	270	230	250
L_3	120	150	160	170	140	150	160	170	260	210
L_4	190	130	150	180	160	120	130	140	110	120
L_5	145	155	120	130	150	140	160	170	150	140
L_6	150	180	210	170	160	190	200	130	170	180
L_7	140	150	160	170	180	160	150	200	160	130

Окончание табл. 6.1

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L_1	290	190	60	70	50	70	40	30	35	45
L_2	270	280	80	40	60	45	30	25	40	25
L_3	200	240	25	30	40	50	70	60	80	90
L_4	140	150	30	40	25	35	85	70	75	80
L_5	130	120	40	35	30	40	90	75	60	50
L_6	85	90	95	100	70	60	50	60	45	35
L_7	70	40	50	60	50	80	90	45	70	75

Примечание к табл. 6.1.

$L_{1,2}^{110}$ – линии L_1 и L_2 напряжением 110 кВ;

w^{35} – частота отказов линии на 35 кВ на 100 км;

T_B^{35} – время восстановления линий на 35 кВ;

μ^{35} – частота плановых простоев линии на 35 кВ;

$T_{\Pi}^{35,110}$ – время планового ремонта линий на 35 и 110 кВ;

$W = w \cdot L[\text{км}]/100$ [1/год], где L [км] – длина линии в км.

Задача 6.1. Определить математическое ожидание перерывов электроснабжения и их средней длительности для схемы сети (рис. 6.1) относительно потребителя Π .

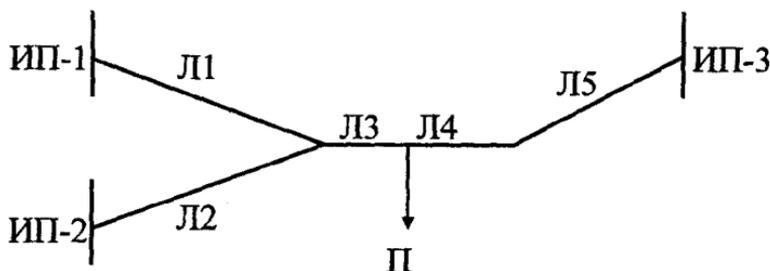


Рис. 6.1. Схема электрической сети:
ИП – источник питания; Л – линия; П – потребитель

Решение. 1. Составляем структурную схему электрической сети, объединив источники питания и заменив линии блоками, связанными между собой, с потребителем и источниками питания (рис. 6.2, а), и преобразуем ее (рис. 6.2, б, в, г) таким образом, чтобы шины ИП и П были связаны эквивалентным блоком.

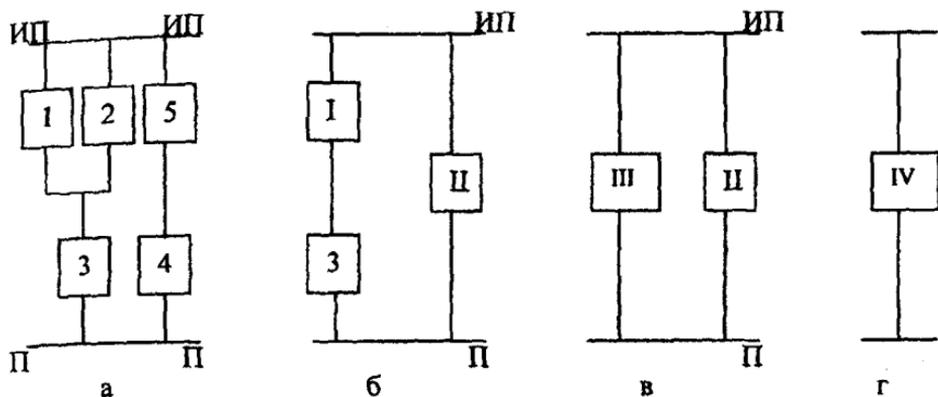


Рис. 6.2. Структурная схема сети и этапы ее преобразования (а – г)

2. Находим показатели надежности блока I, эквивалентного параллельно включенным блокам 1 и 2 (рис. 6.2, б).

$$K_{\text{III}} = K_{\text{II2}} = \frac{\mu_1 T_{\text{III}}}{8760} = \frac{\mu_2 T_{\text{II2}}}{8760}; \quad (6.1)$$

$$K_{\text{в2}} = \frac{w_2 T_{\text{в2}}}{8760}; \quad (6.2)$$

$$K_{\text{в1}} = \frac{w_1 T_{\text{в1}}}{8760}, \quad (6.3)$$

где $K_{\text{в1}}$, $K_{\text{в2}}$, K_{III} , K_{II2} – коэффициенты вынужденного и планового простоев блоков 1 и 2;

$w_1, w_2, \mu_1 = \mu_2$ – частоты отказов и плановых простоев блоков 1 и 2;

$T_{\text{в1}}, T_{\text{в2}}, T_{\text{III}} = T_{\text{II2}}$ – время восстановления и плановых ремонтов блоков 1 и 2.

3. Определяем частоту отказов и время восстановления блока I (блоки 1 и 2 соединены параллельно):

$$W_I = w_1 \cdot (K_{\text{в2}} + K_w K_{\text{II2}}) + w_2 \cdot (K_{\text{в1}} + K_w K_{\text{III}}), \quad (6.4)$$

где K_w – коэффициент, учитывающий возможность проведения плановых ремонтов линий в периоды с благоприятными климатиче-

скими условиями; $K_w = 0,5$. При этом время восстановления блока I находим следующим образом:

$$T_{B1} = \frac{1}{w_1} [T_{B,B} (w_1 K_{B1} + w_2 K_{B2}) + K_w (T_{B1,П2} w_1 K_{П2} + T_{B2,П1} w_2 K_{П1})], \quad (6.5)$$

где $T_{B,B}$ – средняя длительность одновременного вынужденного простоя блоков 1 и 2;

$$T_{B,B} = \frac{T_{B1} T_{B2}}{T_{B1} + T_{B2}}, \quad (6.6)$$

где $T_{B1,П2}$, $T_{B2,П1}$ – средние длительности одновременного простоя ЛЭП при наложении отказа на плановый ремонт.

3.1. Если $T_{B2} \geq T_{П1}$, то независимо от момента отказа блока II в пределах времени $T_{П1}$ планового ремонта блока I одновременный простой заканчивается с окончанием планового ремонта (рис. 6.3). При равномерном распределении отказов в пределах $T_{П1}$ среднее время одновременного простоя блоков равно:

$$T_{П1,B2} = 0,5 \cdot T_{П1}. \quad (6.7)$$

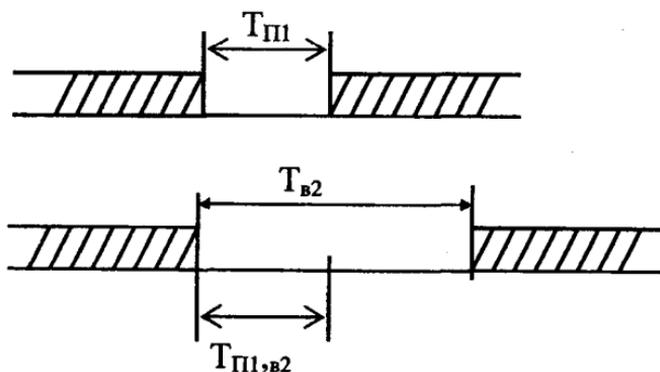


Рис. 6.3. Схема наложения отказа блока I на плановый ремонт блока II при $T_{B2} \geq T_{П1}$

3.2. Если $T_{B2} \leq T_{П1}$, то при отказах в пределах времени $T_{П1} - T_{B2}$, считая от начала планового ремонта, длительность одновременного простоя равна времени восстановления второго блока (рис. 6.4, а), а при отказах в пределах остальной части $T_{П1}$ (равной T_{B2}) одновременный простой заканчивается с окончанием планового ремонта (рис. 6.4, б) и его средняя длительность равна $0,5 \cdot T_{B2}$.

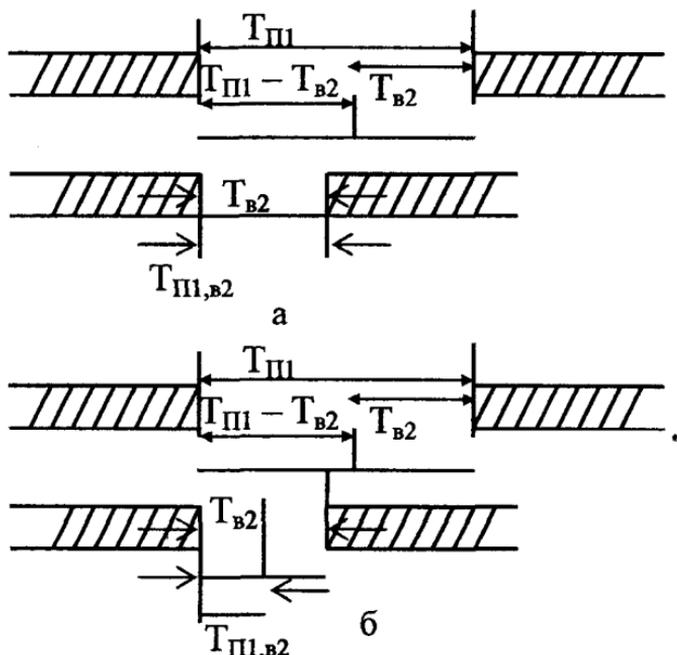


Рис. 6.4. Схема наложения отказа блока I на плановый ремонт блока II при $T_{B2} \leq T_{П1}$

Учитывая вероятность попадания отказа на первую и вторую части $T_{П1}$, равные соответственно $(T_{П1} - T_{B2})/T_{П1}$ и $T_{B2}/T_{П1}$, получаем среднее время одновременного простоя:

$$T_{B1, П2} = \frac{T_{П1} - T_{B2}}{T_{B2} \cdot T_{П1}} + \frac{T_{B2} T_{B2}}{2T_{П1}} = \frac{T_{B2}}{T_{B2} - T_{П1}}. \quad (6.8)$$

Если $T_{B2} \leq T_{П1}$, то из этого выражения имеем: $T_{B2, П1} = T_{B2}$.

4. Рассчитываем показатели надежности и плановых простоев блока II (поток отказов, среднее время восстановления, частоту и среднее время плановых простоев), эквивалентного соединенным блокам 4 и 5:

$$W_{II} = \sum_{i=4}^5 W_i; T_{вII} = \frac{1}{W_I} \sum_{i=4}^5 T_{вi} W_i; \quad (6.9)$$

$$\mu_{II} = \sum_{i=1}^2 \mu_{II}; T_{IIII} = \frac{1}{\mu_{II}} \sum_{i=4}^5 T_{IIi} \mu_i.$$

5. Аналогично определяем показатели надежности блоков III и IV (параметр потока отказов, среднее время восстановления этих блоков)

$$W_{III} = W_I + W_3; T_{вIII} = \frac{1 \cdot (T_{вI} W_I + T_{в3} W_3)}{W_{III}}; \quad (6.10)$$

$$\mu_I = (\mu_I + \mu_3); T_{IIII} = \frac{1(T_{IIII} \mu_I + T_{II3} \mu_3)}{\mu_{III}}$$

$$K_{вII} = \frac{W_{II} T_{вII}}{8760}; K_{вIII} = \frac{W_{III} T_{вIII}}{8760}; \quad (6.11)$$

$$K_{IIII} = \frac{\mu_{II} T_{IIII}}{8760}; K_{IIII} = \frac{\mu_{III} T_{IIII}}{8760}; \quad (6.12)$$

$$W_{IV} = W_{III}(K_{вIII} + K_W K_{IIII}) + W_{II}(K_{вII} + K_W K_{IIII}); \quad (6.13)$$

$$T_{вIV} = \frac{1[T_{в,в}(W_{III} K_{вII} + W_{II} K_{вIII}) + K_W (T_{в,III,IIII} W_{III} K_{IIII} + T_{в,II,IIII} W_{II} K_{IIII})]}{W_I}; \quad (6.14)$$

$$T_{в,в} = \frac{T_{вIII} T_{вII}}{T_{вIII} T_{вII}}; \quad (6.15)$$

где $\mu_I = 0, T_{PI} = 0$, т.к. для двух параллельно включенных элементов эквивалентный блок I характеризуется только показателями надежности, поскольку одновременные плановые простои элементов предполагаются недопустимыми.

6. Результаты решения задачи сводим в табл. 6.2 и проведем их анализ.

Т а б л и ц а 6.2

Результаты расчетов

Блок	$W, 1/\text{год}$	$T_{в}, \text{ч}$	$\mu, 1/\text{год}$	$T_{п}, \text{ч}$
I	w_I	$T_{вI}$	μ_I	$T_{пI}$
II	w_{II}	$T_{вII}$	μ_{II}	$T_{пII}$
III	w_{III}	$T_{вIII}$	μ_{III}	$T_{пIII}$
IV	w_{IV}	$T_{вIV}$	μ_{IV}	$T_{пIV}$

Задача 6.2. Определить показатели надежности схемы сети (рис. 6.5) относительно узла нагрузки П.

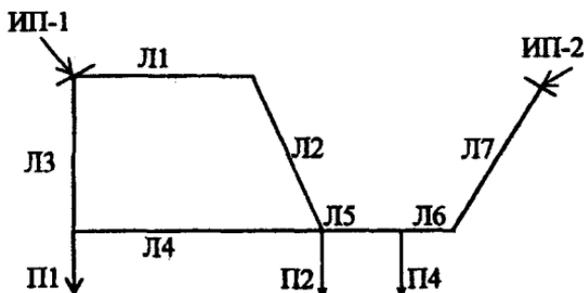


Рис. 6.5. Схема электрической сети

Решение. 1. Составляем структурную схему сети для расчета ее надежности (рис. 6.6).

- Находим показатели надежности блока I: $W_I, T_{вI}, \mu_I, T_{пI}$.
- То же для блоков II, III: $W_{II}, T_{вII}, \mu_{II}, T_{пII}; W_{III}, T_{вIII}, \mu_{III}, T_{пIII}$.
- Определяем $K_{вI}, K_{вII}, K_{пI}, K_{пII}, W_{IV}, T_{вIV}, T_{пIV}$ для блока IV.
- Находим показатели надежности для блока V: $W_V, T_{вV}, \mu_V, T_{пV}$.
- Рассчитываем показатели надежности для блока VI: $K_{вVI}, K_{пVI},$

$K_{пIII}, K_{пIV}, W_{VI}, T_{вVI}, T_{пVI}$

Для расчетов п. 2-6 используем формулы показателей надежности, приведенные в решении задачи 6.1.

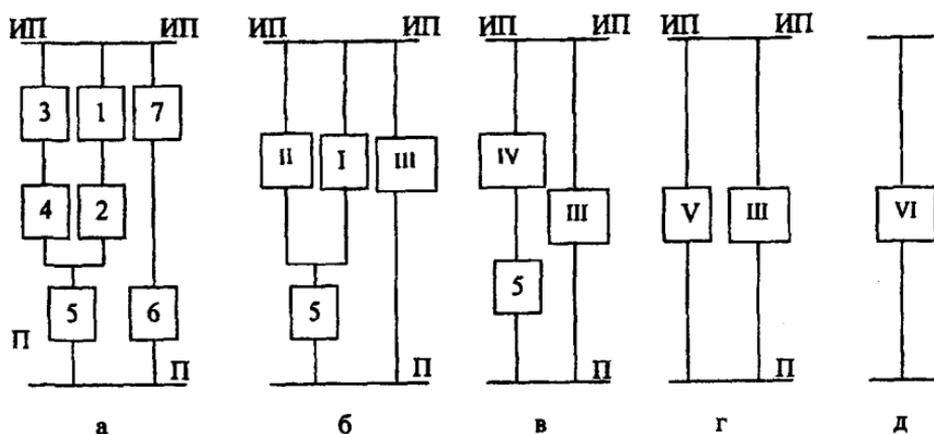


Рис. 6.6. Структурная схема сети и этапы ее преобразования (а – д)

Тема 7

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ ДЛЯ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Исходные данные приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исходные данные к теме

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_1 , км	150	180	230	160	280	200	310	210	130	230
L_2 , км	300	240	310	250	130	190	170	180	160	190
L_3 , км	50	120	90	80	140	70	60	130	40	30
L_4 , км	110	60	70	60	90	110	90	120	60	60
L_5 , км	140	80	150	130	70	140	120	100	80	90

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L_1 , км	140	250	210	300	160	110	150	240	120	140
L_2 , км	160	180	160	250	210	150	130	190	190	130
L_3 , км	120	140	90	60	110	40	50	60	80	140
L_4 , км	90	110	70	90	130	110	90	70	90	70
L_5 , км	80	60	130	90	80	60	70	100	130	80

Примечание.

Варианты 1 – 20: $T_{Вл}^{220} = 16$ ч; $\mu_l^{220} = 6$ 1/год;

$T_{Пл}^{220} = T_{Пл}^{110} = 8$ ч; $\mu_l^{110} = 5$ 1/год; $\omega_l^{220} = 0,7$ 1/год;

$\omega_l^{110} = 1$ 1/год; $\omega_1^{220} = 0,037$ 1/год; $\omega_2^{220} = 0,01$ 1/год;

$\omega_1^{110} = 0,02$ 1/год; $\omega_2^{110} = 0,012$ 1/год; $T_{Вв}^{220} = 150$ ч;

$\mu_v^{220} = 0,3$ 1/год; $\mu_v^{110} = 0,3$ 1/год; $T_{Пв}^{220} = 250$ ч; $T_{Пв}^{110} = 180$ ч;

$\omega_{В,шс}^{220} = 0,025$ 1/год; $\omega_{В,6л}^{220} = 0,025$ 1/год; $T_{В5}^{500} = 5$ ч;

$\omega_t^{500} = 0,03$ 1/год; $T_{Вт}^{500} = 300$ ч; $\mu_t^{500} = 1,0$ 1/год;

$\omega_{В,л}^{220} = 0,035$ 1/год; $\omega_4^{220} = 0,84$ 1/год; $\mu_t^{110} = 1,0$ 1/год;

$T_{Пт}^{500} = 60$ ч; $\omega_t^{110} = 0,02$ 1/год; $T_{Вт}^{110} = 150$ ч; $T_{Пт}^{110} = 30$ ч.

μ – частота (потоков отказа) плановых ремонтов элементов сети;
 $T_{В}$ – среднее время восстановления элемента сети; ω – частота (поток) отказов элемента сети; $T_{П}$ – средняя продолжительность планового ремонта элемента сети; L – длина линии электропередачи.

Индексы: л – линия; в – выключатель; т – трансформатор. Ступени: 110, 220, 500 – напряжения элементов сети.

Задача 7.1. Дана электрическая сеть (рис. 7.1). Рассчитать надежность электроснабжения подстанции 4.

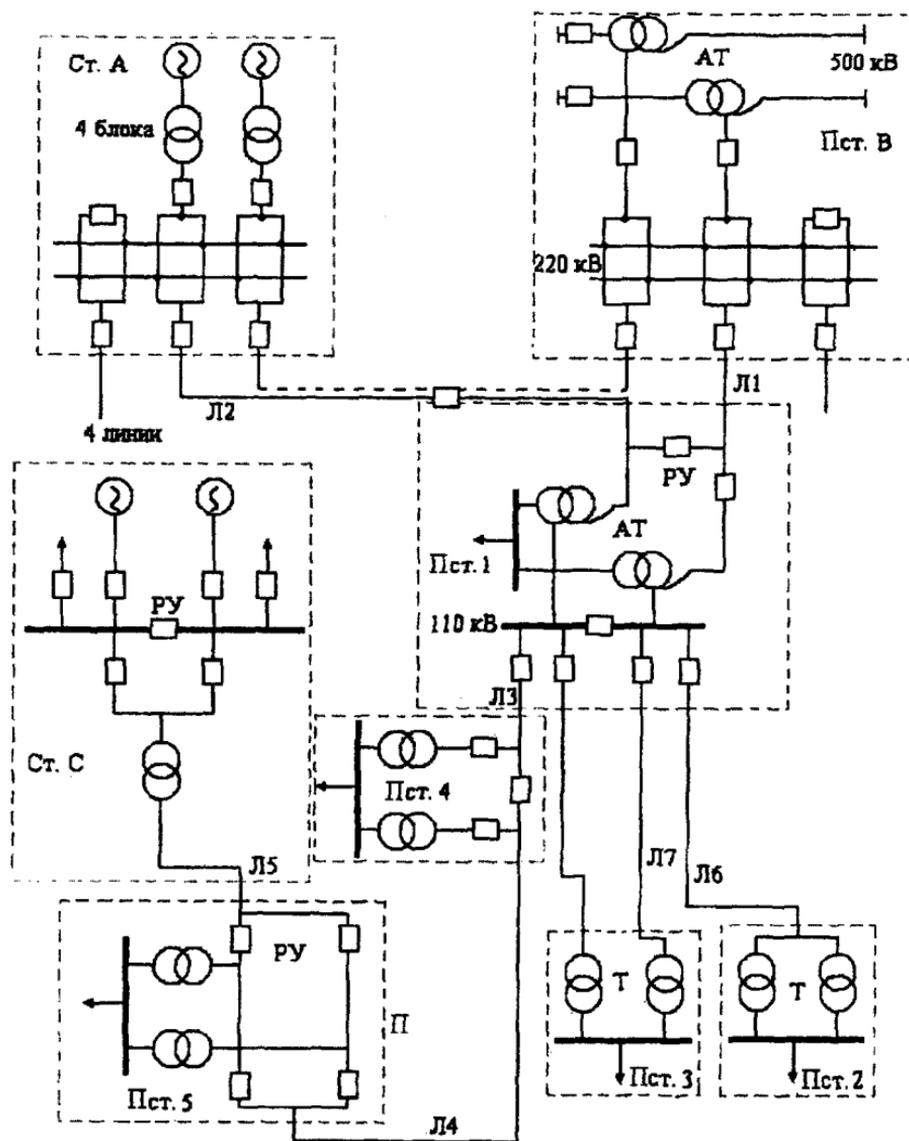


Рис. 7.1. Схема электрической сети

Решение. 1. Составляем принципиальную структурную схему надежности сети (рис. 7.2), соответствующую выделенным пунктиром блокам сети (рис. 7.1). Автотрансформаторы подстанций В и 1, а также трансформаторы подстанции 4 и станции 3 не введены в структурную схему, т.к. число их одновременных простоев, вызванных собственными отказами и плановыми ремонтами, слишком мало. Блоки сети обозначены цифрами I – XIII.

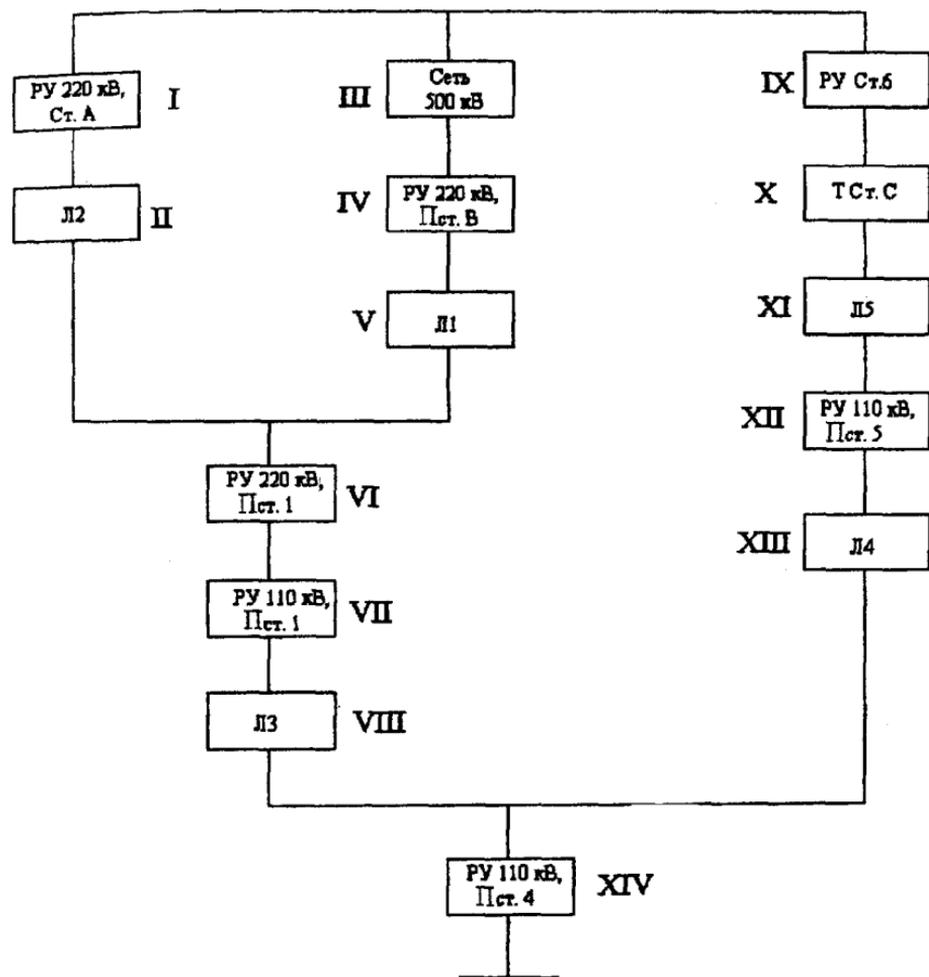


Рис. 7.2. Принципиальная структурная схема сети

2. По принципиальной структурной схеме составляем блочную схему сети (рис. 7.3). Римскими цифрами здесь показаны составные элементы, входящие в более крупные блоки (см. рис. 7.2).

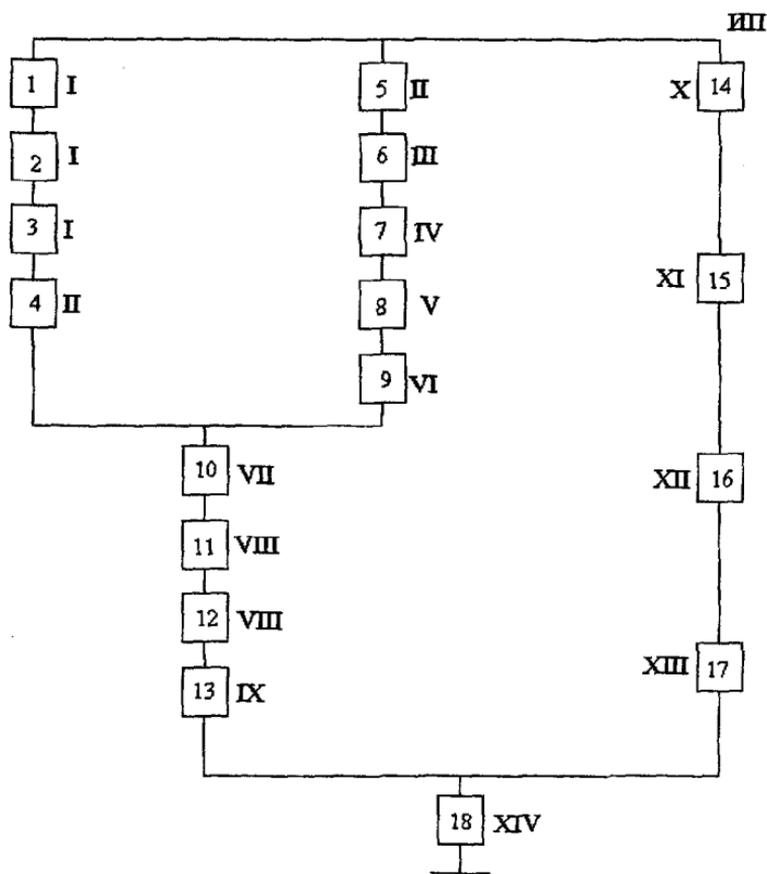


Рис. 7.3. Блочная структурная схема сети

3. Определяем показатели надежности блоков, замещающих РУ (распределительные устройства).

Б л о к I отражает вынужденные и плановые простои линии Л2, вызванные ненадежностью схемы РУ. К простоям Л2 приводят отказы обоих видов и плановый ремонт выключателя (В) линии Л2, внезапные отказы линейных и блочных выключателей (В), присоединенных к той же системе шин, что и линия Л2, внезапный отказ

шиносоединительного выключателя, одновременные отказы двух систем шин (Ш). Учитывая различия во времени простоя линии Л2 при этих отказах, представляем РУ 220 кВ станции А тремя составными блоками (блоки 1 ... 3, см. рис. 7.3).

Для каждого блока (см. рис. 7.3) необходимо определить показатели надежности $T_{\text{Вбл}}$, $\omega_{\text{бл}}$, $\mu_{\text{бл}}$, $T_{\text{Пбл}}$.

Б л о к 1 – отказы и плановые ремонты выключателей линии Л2. Здесь имеем:

$$\omega_1 = \omega_{\text{в,л2}} \text{ 1/ГОД}; T_{\text{В1}} = T_{\text{Вв,л2}}; \mu_{\text{в}} = \mu_{\text{в,л2}}; T_{\text{П1}} = T_{\text{Пв,л2}}.$$

Б л о к 2 – внезапные отказы двух линейных, двух блочных и шиносоединительного выключателей;

$$\omega_2 = k_{\text{вн}} \cdot (2 \cdot \omega_{\text{в,л}} + 2 \cdot \omega_{\text{в,бл}} + \omega_{\text{в,шс}}), \quad (7.1)$$

где $k_{\text{вн}} = 0,6$ – коэффициент, характеризующий долю внезапных отказов от общего числа отказов выключателей;

$\omega_{\text{в,л}}$ – поток отказов линейных выключателей;

$\omega_{\text{в,бл}}$ – поток отказов блочных выключателей;

$\omega_{\text{в,шс}}$ – поток отказов шиносоединительного выключателя.

При отказах выключателей отключившиеся элементы (генерирующие агрегаты, трансформаторы, ЛЭП) могут быть введены в работу раньше, чем будет произведен ремонт выключателей.

Длительность их простоя определяется временем перерыва $T_{\text{пер}}$, необходимого для выполнения переключений в РУ: $T_{\text{В2}} = T_{\text{пер}}$, $\mu_2 = 0$, $T_{\text{П2}} = 0$. Выразим значение времени перерыва для переключений в РУ:

$$T_{\text{пер}} = T_0 + T_p \cdot n_p,$$

где $T_0 = 0,3$ ч – постоянная составляющая, равная времени для посещения РУ и установления характера повреждения;

$T_p = 0,1$ ч – время для отключения (включения) разъединителя;

$n_p = 2$ – число разъединителей, которые должны быть включены (отключены) для отделения поврежденного выключателя и ввода отключившихся элементов в работу.

Б л о к 3 – одновременные отказы двух систем шин. $T_{\text{П3}} = 0$, $\mu_3 = 0$. Находим поток одновременных отказов для двух систем шин:

$$\omega_{2ш} = k_{2ш} \sum_{i=1}^n \omega_{в,i}, \quad (7.2)$$

где $k_{2ш}$ – коэффициент, получаемый на основе обработки статистических данных по подобным отказам; $k_{2ш} \approx 0,1$ для тепловых станций; $k_{2ш} \approx 0,5$ для подстанций и гидростанций;

$\omega_{в,i}$ – параметр потока отказов i -го выключателя;

n – общее число цепей, присоединенных к секции сборных шин.

Для нашего случая имеем:

$$\omega_3 = \omega_{2ш} = k_{2ш} \cdot (4 \cdot \omega_{в,бл} + 6 \cdot \omega_{в,л}).$$

Б л о к 4 – показатели надежности Л2. По исходным данным имеем: $T_{в4}$, μ_4 , $T_{П4}$, ω_4 .

Б л о к 5 – показатели надежности сети 500 кВ:

$$\omega_5 = \omega_{т2}^{500} \text{ 1/ГОД}; T_{в5}, \mu_5 = 0, T_{П5} = 0.$$

Б л о к и 6, 7, 8 – РУ 220 кВ подстанции 500 кВ. Их показатели вычисляются аналогично расчету показателей станции А.

Б л о к 9 замещает Л1. Показатели надежности берутся из исходных данных.

Б л о к 10 замещает РУ 220 кВ подстанции 1 и должен отражать перерывы электроснабжения этой подстанции со стороны сети 220 кВ, а именно, отключения обеих линий 220 кВ или обоих автотрансформаторов из-за ненадежности РУ. Частота отказов этого блока:

$$\omega_{10} = k_{вн} \cdot \omega_{в,пер} + (k_{Пв} + k_{Пат}) \cdot (\omega_{л1} + \omega_{л2}); \quad (7.3)$$

$$T_{в10} = T_{пер} = 0,5 \text{ ч}; T_{П10} = 0, \mu_{10} = 0,$$

где $k_{вн} = 0,6$ – коэффициент, характеризующий долю внезапных отказов от общего числа отказов выключателей;

$\omega_{в,пер}$ – отказ выключателя при оперативных переключениях (типа “разрыв”, типа “КЗ в одну (каждую) сторону”, типа “КЗ в обе стороны”) или в статическом состоянии. Принимается модель выключателя, предложенная П. Г. Грудинским, в которой дифферен-

цируются отказы на типы “КЗ в обе стороны” и “разрыв”, а также учитывается количество КЗ, отключаемых выключателем. Тогда

$$\omega_{в,пер} = \omega_1 + \omega_2 \cdot ((L_1 + L_2)/100), \quad (7.4)$$

где ω_1 и ω_2 берутся из справочных данных в зависимости от напряжения выключателя;

$k_{Пв}$ и $k_{Пат}$ – коэффициенты планового ремонта выключателя и автотрансформатора;

$$k_{Пв} = (\mu_{в} \cdot T_{Пв})/8760; \quad k_{Пат} = (\mu_{ат} \cdot T_{Пат})/8760, \quad (7.5)$$

где $\mu_{в}$, $T_{Пв}$, $\mu_{ат}$, $T_{Пат}$ – частота и продолжительность плановых ремонтов (справочные данные);

$\omega_{л1}$, $\omega_{л2}$ – частоты отказов линий Л1 и Л2:

$$\omega_{л} = \omega_{0л} \cdot L / 100, \quad (7.6)$$

где $\omega_{0л}$ – частота отказов линии данного напряжения на 100 км.

Б л о к 11 – один из двух блоков, замещающих РУ 110 кВ подстанции 1; отражает простой линии ЛЗ из-за ненадежности РУ. Простой имеют место при отказах и плановых ремонтах линейного выключателя линии ЛЗ:

$$\omega_{11} = \omega_{в,л3} = \omega_1 + \omega_2 \cdot L / 100; \quad (7.7)$$

$$T_{В11} = T_{Вв,л3}; \quad \mu_{11} = \mu_{в,л3}; \quad T_{П11} = T_{Пв,л3}.$$

Б л о к 12 – простой линии ЛЗ; могут быть также при внезапных отказах секционного выключателя и выключателя линии Л7, при отказе автотрансформатора и внезапном отказе его выключателя на стороне 220 кВ:

$$\omega_{12} = k_{вн} \cdot (\omega_{в,с} + \omega_{в,л7} + \omega_{в,220}) + \omega_{ат};$$

$$\omega_{вс} = \omega_1^{110}; \quad \omega_{в,л7} = \omega_1 + \omega_2 \cdot L_7 / 100;$$

$$\omega_{в220} = \omega_1^{220} + \omega_2^{220} \cdot ((L_1 + L_2)/(2 \cdot 100));$$

$$T_{B12} = T_{пер} = 0,5 \text{ ч.} \quad (7.8)$$

Б л о к 13 замещает линию Л3:

$$\omega_{13} = \omega_{л3}; T_{B13} = T_{Вл3}; T_{П13} = T_{Пл3}; \mu_{13} = \mu_{л3}$$

Б л о к 14 замещает РУ станции С. РУ генераторного напряжения станции С в расчетной структурной схеме не учитывается, т.к. и количество перерывов электроснабжения, и соответствующие им длительности существенно меньше чисел и длительностей перерывов электроснабжения подстанции 4 при отказах линий Л5 и Л4 и повышающего трансформатора станции С. Поэтому блок 14 замещает повышающий трансформатор станции С:

$$\omega_{14} = \omega_{т}^{110}; T_{B14} = T_{Вт}^{110}; T_{П14} = T_{Пт}^{100}; \mu_{14} = \mu_{т}^{110}$$

Б л о к 15 замещает линию Л5:

$$\omega_{15} = \omega_{л5}; T_{B15} = T_{Вл5}; T_{П15} = T_{Пл5}; \mu_{15} = \mu_{л5}$$

Б л о к 16 замещает РУ 110 кВ подстанции 5; отражает простой линий Л4 и Л5, обусловленные ненадежностью РУ. Внезапный отказ любого из четырех выключателей приводит к отключению одной из линий Л4 или Л5:

$$\omega_{16} = k_{вн} \cdot (2 \cdot \omega_{в,л4} + 2 \cdot \omega_{в,л5}); T_{B16} = T_{пер.} \quad (7.9)$$

Плановые ремонты выключателей не приводят к разрыву транзита и, следовательно,

$$T_{П16} = 0; \mu_{16} = 0.$$

Б л о к 17 замещает линию Л4:

$$\omega_{17} = \omega_{л4}; T_{B17} = T_{Вл4}; T_{П17} = T_{Пл4}; \mu_{17} = \mu_{л4}$$

Блок 18 замещает РУ 110 кВ подстанции 4. Отражает одновременные простои линий Л3 и Л4 или обоих трансформаторов по вине РУ. Схема РУ 110 кВ отличается от схемы РУ 220 кВ подстанции 1 лишь наличием переемычки из двух разъединителей со стороны трансформаторов. Здесь отказы линий на плановых ремонтах каждого из трансформаторов не приводят к перерыву электроснабжения:

$$\omega_{18} = K_{ВН} \cdot \omega_{в,пер} + K_{ПВ} \cdot (\omega_{Л3} + \omega_{Л4}); K_{ПВ} = (\mu_v \cdot T_{ПВ})/8760;$$

$$T_{В18} = T_{ВЛ4}; T_{П18} = 0; \mu_{18} = 0. \quad (7.10)$$

Таким образом, нами получена расчетная структурная схема для определения надежности электроснабжения подстанции 4 с учетом схем РУ всей рассматриваемой сети.

При вычислении параметров блоков, замещающих РУ, не учитывались отказы выключателей в ремонтных режимах.

4. Для расчета надежности электроснабжения подстанции 4 производим свертывание структурной схемы надежности сети (рис. 7.4).

Результаты свертывания схемы сводим в табл. 7.2.

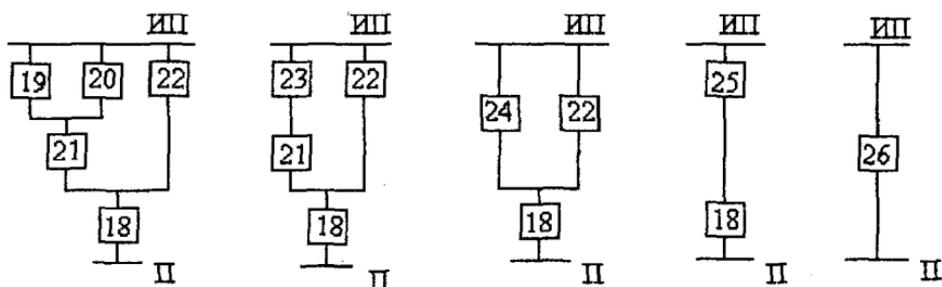


Рис. 7.4. Этапы эквивалентирования схемы подстанции 4

Результаты свертывания схемы

Блок	19	20	21	22	23	24	25	26
Замещаемые блоки	1+2+3+4	5+6+7+8+9	10+11+12+13	14+15+16+17	19//11//20	23+21	24//11//22	25+18

5. Определяем показатели надежности T_B , ω , μ , T_{Π} для блоков 19 – 26.

Для последовательно включенных блоков

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i; T_B = \frac{1}{\omega} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B_i}, \omega_i;$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i; T_{\Pi} = \frac{1}{\mu} \cdot \sum_{i=1}^n T_{\Pi_i}, \mu_i. \quad (7.11)$$

Для двух параллельно включенных блоков i и j

$$\omega = \omega_i \cdot (k_{B_j} + k_{\omega} \cdot k_{\Pi_j}) +$$

$$+ \omega_j \cdot (k_{B_i} + k_{\omega} \cdot k_{\Pi_i}). \quad (7.12)$$

$$T_B = 1/\omega \cdot (T_{B_{B_j}} \cdot (\omega_i \cdot k_{B_j} + \omega_j \cdot k_{B_i}) +$$

$$+ k_{\omega} \cdot (T_{B_i, \Pi_j} \cdot \omega_i \cdot k_{\Pi_j} + T_{B_j, \Pi_i} \cdot \omega_j \cdot k_{\Pi_i})), \quad (7.13)$$

где $k_B = \omega \cdot T_B / 8760$; $k_{\Pi} = \mu \cdot T_{\Pi} / 8760$; $T_{B_{B_j}} = T_{B_i} \cdot T_{B_j} / (T_{B_i} + T_{B_j})$.

Если $T_{B_j} \geq T_{\Pi_i}$, то $T_{B_j, \Pi_i} = T_{B_i, \Pi_j} = 0,5 \cdot T_{\Pi_i}$; если $T_{B_j} \ll T_{\Pi_i}$, то $T_{B_j, \Pi_i} = T_{B_j} - T_{B_j}^2 / 2 \cdot T_{\Pi_i}$, где $T_{B_{B_j}}$ – средняя длительность одновременного вынужденного простоя элементов сети i и j ;

T_{B_j, Π_i} , T_{B_i, Π_j} – средние длительности одновременного простоя при наложении отказа на плановый ремонт;

$k_{\omega} = 0,5$ – коэффициент, учитывающий возможность проведения плановых ремонтов линии в периоды с благоприятными климатическими условиями.

Результаты расчета представлены в табл. 7.3.

Результаты расчета

Блок	ω , 1/год	T_B , ч	μ , 1/год	$T_{П}$, ч
19	ω_{19}	T_{B19}	μ_{19}	$T_{П19}$
20	ω_{20}	T_{B20}	μ_{20}	$T_{П20}$
21	ω_{21}	T_{B21}	μ_{21}	$T_{П21}$
22	ω_{22}	T_{B22}	μ_{22}	$T_{П22}$
23	ω_{23}	T_{B23}	μ_{23}	$T_{П23}$
24	ω_{24}	T_{B24}	μ_{24}	$T_{П24}$
25	ω_{25}	T_{B25}	μ_{25}	$T_{П25}$
26	ω_{26}	T_{B26}	μ_{26}	$T_{П26}$

Тема 8

**РАСЧЕТ СУММАРНОГО УЩЕРБА
ОТ НЕДОПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В СХЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Исходные данные к теме представлены в табл. 8.1 – 8.5.

Таблица 8.1

Параметры сети

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_1 , кВ	500	330	220	110	35	500	330	220	110	35
Структура нагрузки	1	2	3	4	1	2	3	4	3	1
L_1 , км	250	150	100	80	25	500	400	180	110	50
L_2 , км	400	200	120	100	30	450	300	210	100	45
L_3 , км	500	190	140	110	40	400	240	150	90	35
L_4 , км	600	180	150	90	50	300	150	200	60	50
P_2 , МВт	400	250	100	40	6	180	120	80	30	5
P_3 , МВт	350	300	140	35	18	150	100	60	40	7
P_4 , МВт	200	150	90	30	10	100	60	45	20	6

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U ₁ , кВ	500	330	220	110	35	500	330	110	110	35
Структура нагрузки	2	3	4	3	4	2	3	4	2	1
Л1, км	450	300	100	100	60	500	180	160	140	50
Л2, км	400	400	90	130	40	450	140	140	90	40
Л3, км	350	300	80	60	50	400	130	110	80	30
Л4, км	300	200	60	70	30	350	95	80	60	25
P ₂ , МВт	250	140	100	40	10	200	200	25	25	10
P ₃ , МВт	200	90	50	30	8	150	150	20	20	8
P ₄ , МВт	120	50	30	15	5	60	100	10	10	6

Окончание табл. 8.1

Вариант	21	22	23	24
U ₁ , кВ	500	330	220	110
Структура нагрузки	3	2	4	1
Л1, км	600	400	210	90
Л2, км	500	350	190	80
Л3, км	400	300	150	70
Л4, км	300	250	80	60
P ₂ , МВт	180	140	90	40
P ₃ , МВт	160	110	60	30
P ₄ , МВт	80	60	30	20

Таблица 8.2

Параметры потока отказов и средние частоты плановых простоев

Элемент/ напряжение, кВ	ω , отказ/год					ω_n , простой/год			
	500	330	220	110	35	330	220	110	35
Одноцепные ВЛ	0,4	0,5	0,6	1,1	1,4	12	13	15	9
Трансформаторы	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	6	6	6	6
Воздушные выключатели	0,2	0,2	0,15	0,1	0,08	2	2	2	2

Примечание.

ω – на 100 км или на единицу оборудования; ω_n – на ВЛ или единицу оборудования.

Среднее время восстановления элементов электрических сетей
 $T_{\text{в}} \cdot 10^{-3}$, лет/отказ

Элемент/напряжение, кВ	500	330	220	110	35
Одноцепные ВЛ	1,7	1,3	1,1	1,0	1,0
Трансформаторы	300	250	80	60	45
Выключатели	10	7	4,8	2,8	1,3

Таблица 8.4

Коэффициенты плановых простоев на одну цепь ВЛ или единицу
 оборудования $K_{\text{д}} \cdot 10^{-3}$, отн. ед.

Элемент/напряжение, кВ	500	330	220	110	35
Воздушные ВЛ	12	9	7	5	4
Трансформаторы	10	9,5	8,5	7,5	6
Воздушные выключатели	40	30	20	10	5

Таблица 8.5

Структура нагрузки (рис. 8.1)

Структура нагрузки	1	2	3	4
Промышленность, %	15	70	10	35
Быт и сфера обслуживания, %	50	25	25	25
Сельское хозяйство, %	15	—	55	30
Транспорт и строительство, %	20	5	10	10

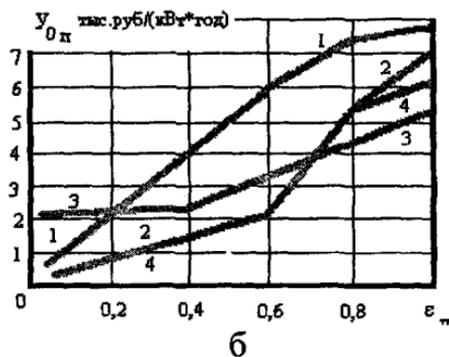
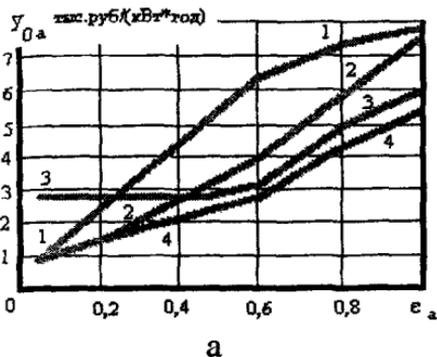


Рис. 8.1. Расчетный годовой удельный ущерб от аварийных Y_{0a} (а) и плановых $Y_{0п}$ (б) ограничений электроснабжения: 1 – 4 – структура нагрузки (см. табл. 8.5)

Задача 8.1. Определить математическое ожидание суммарного ущерба от недоотпуска электроэнергии для схемы электроснабжения потребителей (рис. 8.2). Допущение: линии Л1 – Л3 взаимно резервированы, отключение одной из них не вызывает ограничений нагрузок. В узлах 2,3 трансформаторы способны нести нагрузку подстанции при отключении одного из них.

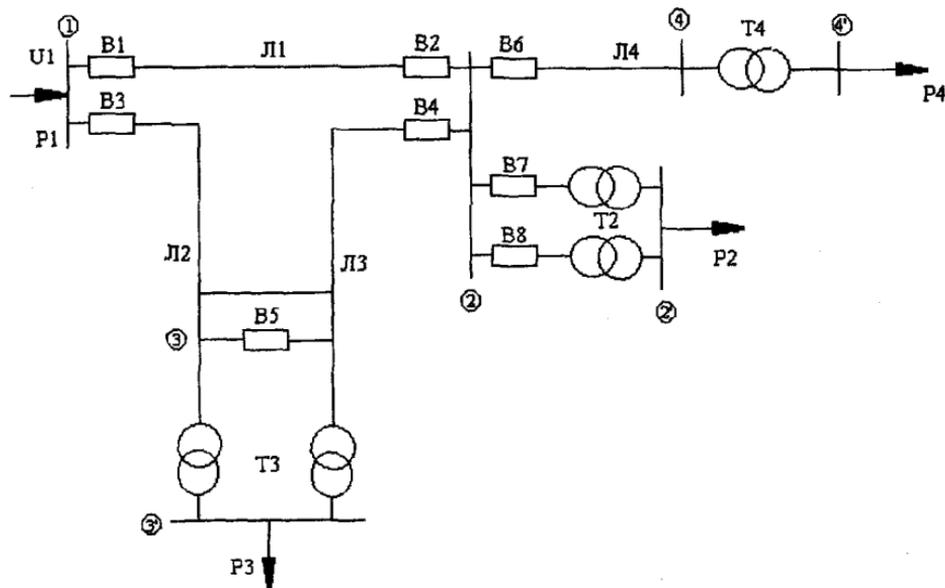
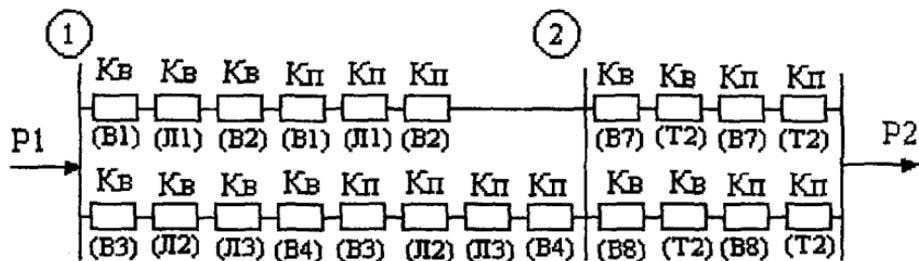


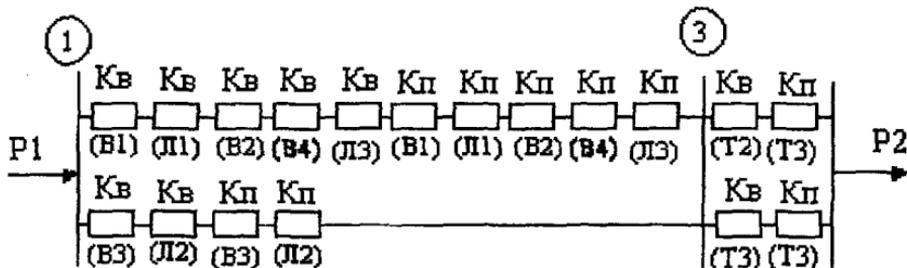
Рис. 8.2. Схема электроснабжения потребителей

Решение. 1. Составляем структурные схемы питания каждого узла нагрузки (потребителя), представляя элементы сети коэффициентами вынужденного и планового простоев, с учетом их последовательного или параллельного соединения (рис. 8.3).

Потребитель 2



Потребитель 3



Потребитель 4

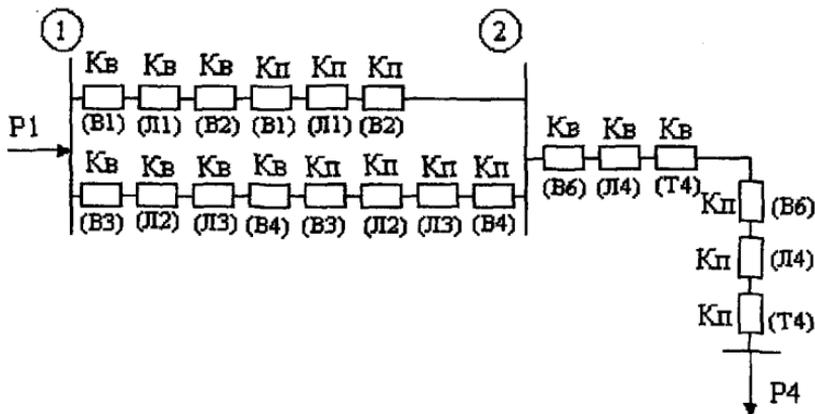


Рис. 8.3. Структурные схемы питания узлов нагрузки

2. Структурные схемы питания (см. рис. 8.3) преобразуем к эквивалентному виду (рис. 8.4). При этом складываем все коэффициенты вынужденных простоев в каждой цепочке последовательно и заменяем все коэффициенты плановых простоев в каждой цепочке одним, соответствующим тому элементу сети, для которого он имеет наибольшее значение. Предполагается, что плановый ремонт каждой последовательной цепи выполняется одновременно. Поэтому если время планового ремонта i -го элемента последовательной цепи укладывается во времени элемента с максимальной продолжительностью планового ремонта, то вынужденного простоя из-за планового ремонта i -го элемента не будет.

На рис. 8.4 $K_{B_n}^m$ – эквивалентный коэффициент вынужденного простоя для последовательной цепочки элементов; n – номер цепочки эквивалентизируемых элементов сети; m – номер узла нагрузки, к которому подключен рассматриваемый потребитель; $K_{\Pi_n}^m$ – эквивалентный коэффициент планового простоя для n -й последовательной цепочки элементов сети, численно равный максимальному K_n данной цепочки элементов.

3. Находим значения $K_{B_n}^m$ и $K_{\Pi_n}^m$ (см. рис. 8.4). При этом используем табл. 8.2 – 8.4.

В качестве примера приведем расчеты для некоторых элементов.

В ы к л ю ч а т е л и $U = 110$ кВ. Параметр потока отказов ω , $\frac{\text{отказ}}{\text{год}}$ для воздушного выключателя в цепи ВЛ $\omega = 0,1$ (табл. 8.2) при $U = 110$ кВ.

Среднее время восстановления выключателя (см. табл. 8.3) и $T_B = 2,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{лет}}{\text{отказ}}$.

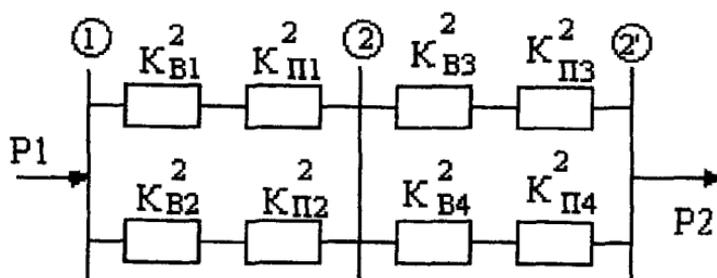
$$K_B = \omega_B \cdot T_B = 0,1 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} = 0,28 \cdot 10^{-3} ;$$

$$K_{B(B1)} = K_{B(B2)} = K_{B(B3)} = K_{B(B4)} =$$

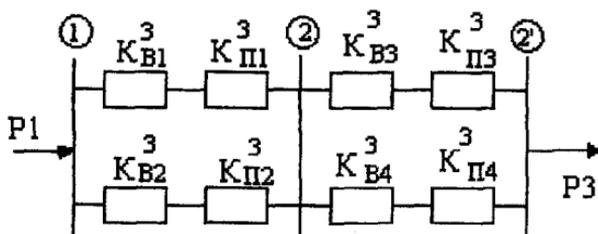
$$= K_{B(B5)} = K_{B(B6)} = K_{B(B7)} = K_{B(B8)} = K_B = 0,28 \cdot 10^{-3}.$$

Для воздушного выключателя 110 кВ $K_{\Pi} = 10 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (см. табл. 8.4);

Потребитель 2



Потребитель 3



Потребитель 4

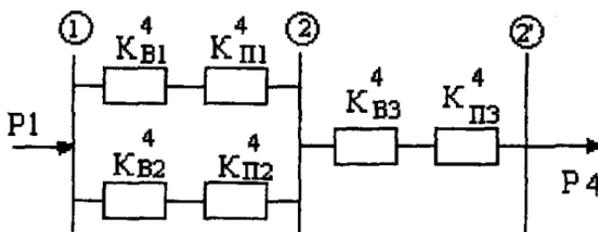


Рис. 8.4. Преобразование потребителей к эквивалентному виду

$$\begin{aligned}
 K_{П(в1)} &= K_{П(в2)} = K_{П(в3)} = K_{П(в4)} = \\
 &= K_{П(в5)} = K_{П(в6)} = K_{П(в7)} = K_{П(в8)} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.}
 \end{aligned}$$

Воздушные линии. $U = 110 \text{ кВ}$; $L1 = 50 \text{ км}$; $L2 = 60 \text{ км}$; $L3 = 70 \text{ км}$; $L4 = 30 \text{ км}$.

Величина потока отказов линии $\omega_{л} = \omega \cdot \ell / 100$, где ω — параметр потока отказов линии напряжением U , кВ, на 100 км (см. табл. 8.2).

При $U = 110$ кВ: $\omega = 1,1$ отказ/год; $T_{в} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ лет/отказ (см. табл. 8.3);

$$K_{п(л)} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед. (см. табл. 8.4); } K_{в(л)} = \omega \cdot \ell / 100 \cdot T_{в} ;$$

$$K_{в(л1)} = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.; } K_{в(л2)} = \\ = 0,66 \cdot 10^{-3} \text{ тон. ед.; } K_{в(л3)} = 0,77 \cdot 10^{-3} \text{ тон. ед.;}$$

$$K_{в(л4)} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.;}$$

$$K_{п(л)} = K_{п(л1)} = K_{п(л2)} = K_{п(л3)} = K_{п(л4)} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.}$$

Трансформаторы (см. табл. 8.3, 8.4).

$$U = 110 \text{ кВ; } \omega = 0,02 \text{ отказ/год; } T_{в} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ лет/отказ;}$$

$$K_{в} = \omega \cdot T_{в} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.;}$$

$$K_{п} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.;}$$

$$K_{в(т1)} = K_{в(т2)} = K_{в(т3)} = K_{в(т4)} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.;}$$

$$K_{п(т1)} = K_{п(т2)} = K_{п(т3)} = K_{п(т4)} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.}$$

С учетом выключателей, ВЛ, трансформаторов имеем для потребителей (см. рис. 8.4):

$$\text{Потребитель 2 (отн. ед.): } K_{в1}^2 = 0,83 \cdot 10^{-3}; K_{в2}^2 = 1,99 \cdot 10^{-3}; K_{в3}^2 = \\ = K_{в4}^2 = 1,48 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{п1}^2 = K_{п2}^2 = K_{п3}^2 = K_{п4}^2 = 10 \cdot 10^{-3}.$$

$$\text{Потребитель 3 (отн. ед.): } K_{в1}^3 = 2,16 \cdot 10^{-3}; K_{в2}^3 = 0,94 \cdot 10^{-3}; \\ K_{в3}^3 = K_{в4}^3 = 1,2 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{п3}^3 = K_{п4}^3 = 10 \cdot 10^{-3}; \quad K_{п3}^3 = K_{п4}^3 = 7,5 \cdot 10^{-3}.$$

Потребитель 4 (отн. ед.): $K_{в1}^4 = 0,83 \cdot 10^{-3}; \quad K_{в2}^4 = 1,99 \cdot 10^{-3};$

$$K_{п1}^4 = K_{п2}^4 = K_{п3}^4 = 10 \cdot 10^{-3}.$$

4. Находим эквивалентные коэффициенты вынужденных и плановых простоев потребителей на основании параллельно-последовательных структурных схем (см. рис. 8.4). Эти схемы представляем в виде (рис. 8.5):

Потребитель 2

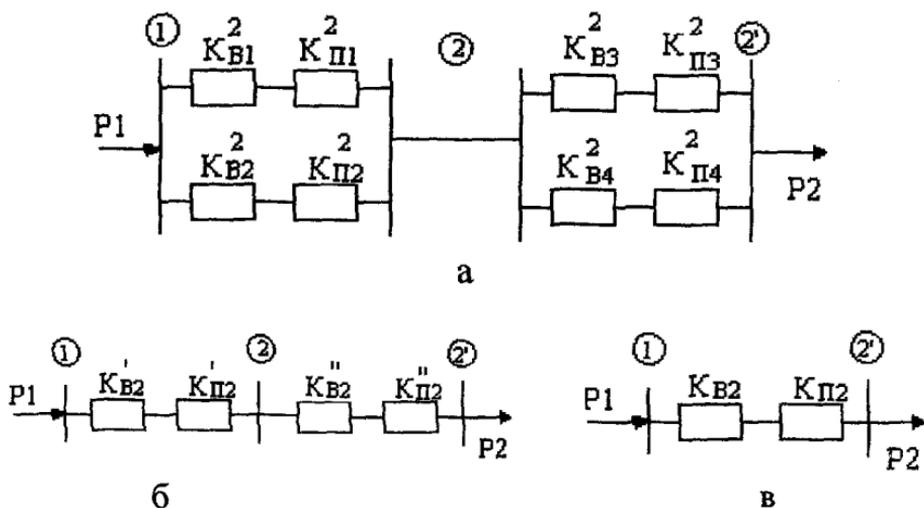


Рис. 8.5. Этапы определения эквивалентных коэффициентов потребителя 2

На рис. 8.5 имеем: $K_{в2}'$, $K_{п2}'$, $K_{в2}''$, $K_{п2}''$ — эквивалентные коэффициенты вынужденного и планового простоев параллельных соединений элементов сети;

$K_{в2}$ и $K_{п2}$ — эквивалентные коэффициенты вынужденного и планового простоев потребителя 2.

$$K_{в2}' = 2K_{в1}^2 \cdot K_{в2}^2 + K_{в1}^2 \cdot K_{п2}^2 + K_{в2}^2 \cdot K_{п1}^2. \quad (8.1)$$

При отсутствии ограничений по пропускной способности в параллельных цепях ($P_{\text{доп}}$ каждой из цепей больше P_{max} нагрузки) запишем:

$$K'_{\Pi 2} = 0; \delta_{\Pi 2} = P_{\Pi, \text{откл}} / P_{\text{max}} = 0,$$

где $P_{\Pi, \text{откл}}$ — отключаемая часть нагрузки на время планового ремонта элементов сети;

P_{max} — максимальная нагрузка потребителя;

$\delta_{\Pi 2}$ — отключаемая нагрузка потребителя при плановом ремонте в долях от номинальной, отн. ед.

$$K''_{B2} = 2K_{B3}^2 \cdot K_{B4}^2 + K_{B3}^2 \cdot K_{\Pi 4}^2 + K_{B4}^2 \cdot K_{\Pi 3}^2; \quad K''_{\Pi 2} = 0; \quad (8.2)$$

$$K_{B2} = 2K_{B1}^2 \cdot K_{B2}^2 + K_{B1}^2 \cdot K_{\Pi 2}^2 + K_{B2}^2 \cdot K_{\Pi 1}^2 + 2K_{B3}^2 \cdot K_{B4}^2 + K_{B3}^2 \cdot K_{\Pi 4}^2 + K_{B4}^2 \cdot K_{\Pi 3}^2; \quad (8.3)$$

$$K_{\Pi 2} = 0; \delta_{\Pi 2} = 0; \delta_{a2} = \frac{P_{a \text{откл}}}{P_{\text{max}}} = 1 \text{ э.}$$

Потребитель 3 (рис. 8.6)

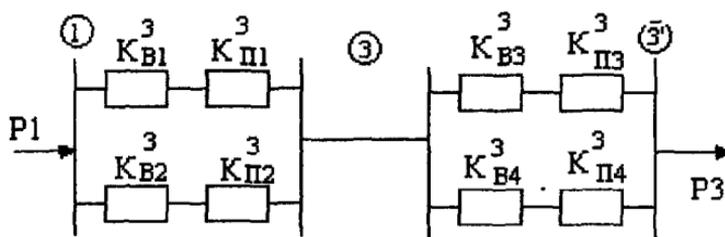


Рис. 8.6. Схема расчета эквивалентных коэффициентов потребителя 3

Производим эквивалентные преобразования аналогично узлу 2.

Потребитель 4 (рис. 8.7)

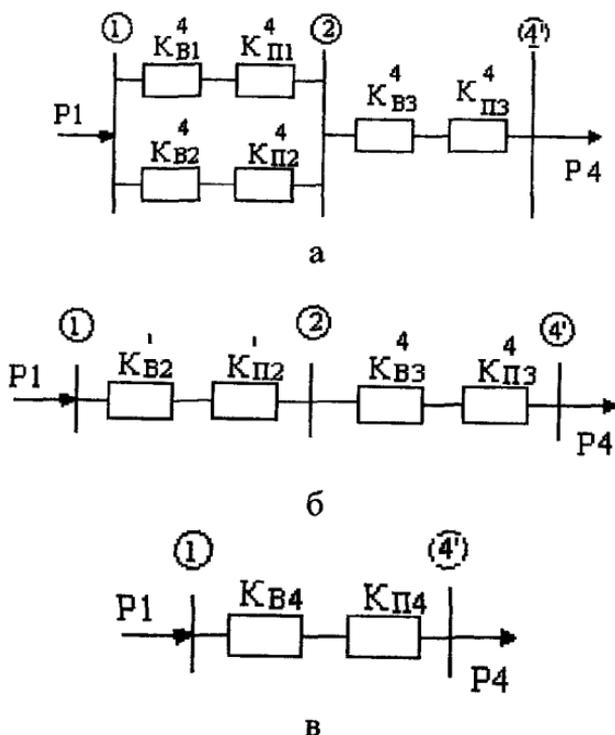


Рис. 8.7. Схема расчета эквивалентных коэффициентов потребителя 4

$$K_{B4} = (2K_{B1}^4 \cdot K_{B2}^4 + K_{B1}^4 \cdot K_{П2}^4 + K_{B3}^4 \cdot K_{П3}^4) + K_{B3}^4; \quad (8.4)$$

$$K_{П4} = \max\{K_{П3}\}; \delta_{П4} = 1; \delta_{a4} = 1.$$

5. Определяем согласно заданной структуре нагрузки 1 – 4 (табл. 8.5) расчетные годовые удельные ущербы от аварийных и плановых ограничений электроснабжения для узлов нагрузки (потребителей) 2, 3, 4.

В качестве примера предположим, что структура нагрузки в узлах соответствует кривой 1. В этом случае имеем:

$$Y_{a0} = \alpha = 7,5 \text{ тыс.руб. /кВт} ; Y_{п0} = \beta = 7,5 \text{ тыс.руб. /кВт} .$$

6. Определяем математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям в узлах нагрузки 2, 3, 4:

$$Y_2 = Y_{a2} + Y_{п2} = K_{в2} \cdot P_{\max 2} \cdot \delta_{a2} \cdot \alpha_2 + \\ + K_{п2} \cdot P_{\max 2} \cdot \delta_{п2} \cdot \beta_2; \quad (8.5)$$

$$Y_3 = Y_{a3} + Y_{п3} = K_{в3} \cdot P_{\max 3} \cdot \delta_{a3} \cdot \alpha_3 + K_{п3} \cdot P_{\max 3} \cdot \delta_{п3} \cdot \beta_3; \quad (8.6)$$

$$Y_4 = Y_{a4} + Y_{п4} = K_{в4} \cdot P_{\max 4} \cdot \delta_{a4} \cdot \alpha_4 + \\ + K_{п4} \cdot P_{\max 4} \cdot \delta_{п4} \cdot \beta_4, \quad (8.7)$$

где Y_{an} – ущерб от вынужденного простоя в результате аварии за время восстановления питания n -го потребителя;

$Y_{пn}$ – ущерб от вынужденного простоя в результате проведения планового ремонта за время восстановления питания n -го потребителя;

$K_{вn} = \omega_{вn} \cdot T_{вn}$ – коэффициент вынужденного простоя при аварии n -го потребителя;

$K_{пn}$ – то же при плановом ремонте;

$\omega_{вn}$ – параметр потока отказов оборудования n -го потребителя;

$T_{вn}$ – время восстановления повреждения n -го потребителя;

$P_{\max n}$ – максимальная нагрузка n -го потребителя;

δ_{an} и $\delta_{пn}$ – отключаемая нагрузка потребителя n при аварийном и плановых ремонтах соответственно в долях от номинальной, отн. ед;

α_n и β_n – удельный ущерб потребителя n от аварийных и плановых ограничений электроснабжения, $\alpha_n = f(\delta_{an})$; $\beta_n = f(\delta_{пn})$.

7. Определяем суммарный ущерб:

$$Y_c = Y_2 + Y_3 + Y_4. \quad (8.8)$$

Тема 9

РАСЧЕТ ПОТОКА ОТКАЗОВ И СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Параметры надёжности системы электроснабжения приведены в табл. 9.1

Таблица 9.1

Исходные данные для расчета

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ℓ_1 , км	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
ℓ_2 , км	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
λ_0 , 1/км·год	0,018	0,019	0,020	0,025	0,021	0,022	0,024	0,017	0,019	0,020
$\lambda_{Г1}$, 1/год	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	1,9	1,85	1,75	2,05	2,1
$\lambda_{Г11}$, 1/год	0,018	0,017	0,015	0,19	0,02	0,021	0,019	0,022	0,023	0,022
$\lambda_{Г2}$, 1/год	0,024	0,021	0,025	0,021	0,023	0,019	0,024	0,023	0,025	0,024
$\lambda_{В1}$, 1/год	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,049	0,065	0,055	0,075	0,08
$\lambda_{В3}$, 1/год	0,124	0,125	0,110	0,130	0,140	0,125	0,129	0,131	0,132	0,133
$T_{ВГ}$, ч	180	190	200	210	220	230	240	235	238	300
$T_{ВГ1}$, ч	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440
$T_{Д1}$, ч	20	25	30	15	30	25	20	31	28	32
$T_{Д2}$, ч	25	30	31	32	25	27	31	25	20	31
$T_{ВГ2}$, ч	330	400	410	420	430	440	450	470	480	450
$T_{В1}$, ч	11	12	13	14	15	10	10	16	14	13
$T_{В3}$, ч	15	14	15	16	17	14	15	12	13	15
$T_{Д11}$, ч	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$T_{Д12}$, ч	35	40	45	30	50	50	65	70	80	45
$\omega_{Д11}$, 1/год	0,41	0,39	0,35	0,27	0,34	0,35	0,43	0,45	0,44	0,37
$\omega_{Д12}$, 1/год	0,39	0,32	0,42	0,35	0,43	0,42	0,35	0,37	0,38	0,43
ℓ_1 , км	40	45	50	55	60	65	70	80	85	90
ℓ_2 , км	35	30	40	35	50	45	60	65	70	75
λ_0 , 1/км·год	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026
$\lambda_{Г1}$, 1/год	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,1
$\lambda_{Г11}$, 1/год	0,015	0,016	0,017	0,018	0,02	0,021	0,022	0,023	0,024	0,025
$\lambda_{Г2}$, 1/год	0,02	0,019	0,021	0,022	0,023	0,024	0,025	0,021	0,023	0,019
$\lambda_{В1}$, 1/год	0,09	0,05	0,06	0,049	0,051	0,07	0,08	0,04	0,03	0,08
$\lambda_{В3}$, 1/год	0,115	0,120	0,131	0,125	0,127	0,116	0,132	0,135	0,136	0,129

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$T_{вг}$, ч	190	200	210	220	230	240	250	270	280	290
$T_{вт1}$, ч	410	380	450	460	470	490	475	490	510	520
$T_{л1}$, ч	25	28	19	20	21	22	24	25	28	29
$T_{л2}$, ч	25	28	19	22	24	25	30	26	30	25
$T_{вт2}$, ч	500	410	430	440	450	500	480	470	460	480
$T_{вл1}$, ч	12	13	14	15	14	10	11	12	13	14
$T_{вл2}$, ч	15	14	16	12	13	11	13	14	15	13
$T_{пл1}$, ч	30	35	40	45	60	55	70	80	30	35
$T_{пл2}$, ч	45	40	50	30	80	40	35	90	45	55
$\omega_{пл1}$, 1/год	0,31	0,32	0,35	0,39	0,29	0,34	0,35	0,43	0,41	0,35
$\omega_{пл2}$, 1/год	0,42	0,29	0,31	0,35	0,34	0,31	0,41	0,45	0,36	0,34

Примечание.

ℓ_1 — длина линии;

λ_0 — удельный параметр потока отказов линии;

λ — параметр потока отказов элемента сети;

$T_{в}$ — среднее время восстановления элемента сети;

$T_{п}$ — среднее время преднамеренного простоя элемента сети;

$\omega_{п}$ — параметр потока преднамеренных отключений элемента сети.

Индексы: г — генератор; т — трансформатор; л — линия; в — выключатель.

Задача 9.1. Система передачи электроэнергии (рис. 9.1) состоит из элементов, отказы которых независимы. Длина линии — ℓ_1 , км. Параметры потоков отказов элементов схемы:

$$\lambda_{т1}, \lambda_{т2}, \frac{1}{\text{ГОД}}; \lambda_0, \frac{1}{\text{КМ} \cdot \text{ГОД}};$$

средние времена их восстановления: $T_{вт1}; T_{вл1}; T_{вт2}$.

Определить параметр потока отказов системы передачи электроэнергии (λ_c) и среднее время ее восстановления ($T_{в,c}$). Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.1.

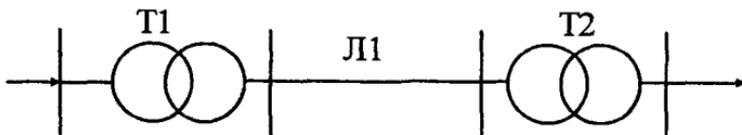


Рис. 9.1. Схема системы передачи электроэнергии

Задача 9.2. Для системы передачи электроэнергии (рис. 9.2) при длине линии l заданы следующие параметры надёжности: $\lambda_{\Gamma}; \lambda_{T1}; \lambda_{T2}; \lambda_0; T_{ВГ}; T_{ВТ1}; T_{ВЛ1}; T_{ВТ2}$.

Определить параметр потока отказов системы ($\lambda_{\text{С}}$) и среднее время её восстановления. Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.1.

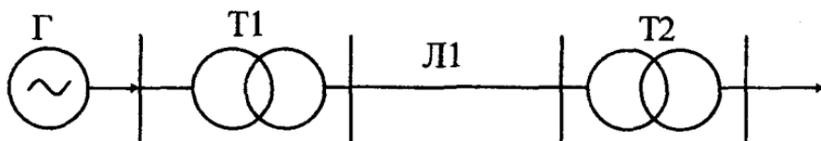


Рис. 9.2. Схема системы передачи электроэнергии

Задача 9.3. Потребитель получает электроэнергию по линиям электропередачи Л1 и Л2 (рис. 9.3), отказы которых независимы. Каждая линия пропускает всю необходимую потребителю мощность; длина линий: l_1 и l_2 . Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.1: $T_{ВЛ1}, T_{ВЛ2}, r$. Определить для системы параметр потока отказов $\lambda_{\text{С}}$, среднюю вероятность отказа $q_{\text{С}}$ и среднее время её восстановления $T_{\text{Вс}}$.

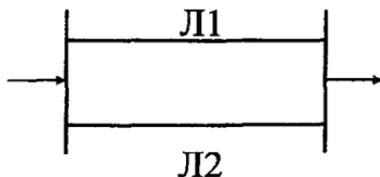


Рис. 9.3. Схема системы передачи электроэнергии

Задача 9.4. В системе передачи электроэнергии (рис. 9.4) каждый генератор выдаёт 50% мощности потребителя. Остальные элементы имеют пропускную способность 100% нагрузки потребителя. Параметры потоков отказов генераторов Г1 и Г2 одинаковы.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.1:

$$\lambda_{Г1} = \lambda_{Г2} = \lambda_{Г}; \lambda_{Т1}; \lambda_{Т2}; \lambda_{Л1} \quad T_{ВТ1};$$

$$T_{ВЛ1}; T_{ВТ2}; T_{ВГ} = T_{ВГ2} = T_{ВГ}$$

Определить параметр потока отказов $\lambda_{С}$, среднюю вероятность отказа $q_{С}$ системы и среднее время восстановления системы $T_{Вс}$.

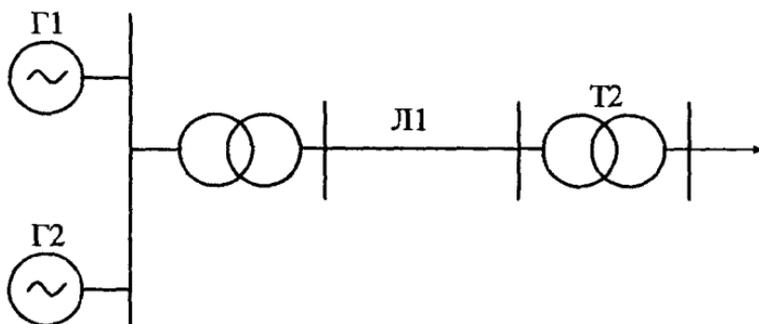


Рис. 9.4. Схема системы передачи электроэнергии

Задача 9.5. Решить предыдущую задачу при условии, что каждая линия пропускает только 50% мощности, требуемой потребителю. Дополнительно определить вероятность получения потребителем лишь 50% мощности. Допущения: 1) отказ системы при передаче линией потребителю 100% мощности – исчезновение напряжения в узле нагрузки; 2) отказ системы при передаче по линии 50% мощности потребителя – получение потребителем 50% мощности.

Задача 9.6. Решить задачу 9.4 с учетом преднамеренных отключений линий. Дополнительные данные: параметры потоков преднамеренных отключений линий $\omega_{ПП1}$, $\omega_{ПП2}$ и средние времена их преднамеренного простоя $T_{ПП1}$, $T_{ПП2}$. Числовые значения величин – в табл. 9.1.

Задача 9.7. Потребитель получает электроэнергию по линиям Л1 и Л2, отказы которых независимы. Пропускная способность каждой линии – 50% мощности, требуемой потребителю. Известны длины линий: ℓ_1 и ℓ_2 ; $T_{ВП1}$, $T_{ВП2}$; $\omega_{ПП1}$, $\omega_{ПП2}$; $T_{ПП1}$, $T_{ПП2}$ (табл. 9.1).

Определить параметр потока отказов λ_C'' , вероятность получения потребителем 50% мощности q_C'' и среднее время восстановления системы, способной передать потребителю 50% требуемой мощности.

Допущение: отказ системы при передаче по линии 50% мощности потребителя – получение потребителем 50% требуемой мощности.

Задача 9.8. Завод получает электроэнергию от двух источников питания (рис. 9.5). Каждая цепь может пропустить всю необходимую потребителю мощность.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 9.1: λ_0 , 1/км · год;

$$\ell_1, \ell_2; T_{ВП1}, T_{ВП2}; \lambda_{В1} = \lambda_{В2}, \lambda_{В3} = \lambda_{В4};$$

$$T_{В1} = T_{В2}, T_{В3}; \omega_{ПВ1} = \omega_{ПВ2} = 1,1\omega_{ПВ1},$$

$$\omega_{ПВ3} = \omega_{ПВ4} = 1,1\omega_{ПВ2};$$

$$T_{ПВ1} = T_{ПВ2} = 1,1T_{ПВ1}; T_{ПВ3} = T_{ПВ4} = 1,2T_{ПВ2}.$$

Определить параметр потока отказов системы электроснабжения, среднее время безотказной работы, среднюю вероятность отказа, среднее время восстановления электроснабжения за год, считая, что среднегодовая мощность завода 35 МВт. При расчете принять, что преднамеренные отключения последовательно включенных элементов цепей совмещаются во времени. Надёжность источников не учитывать.

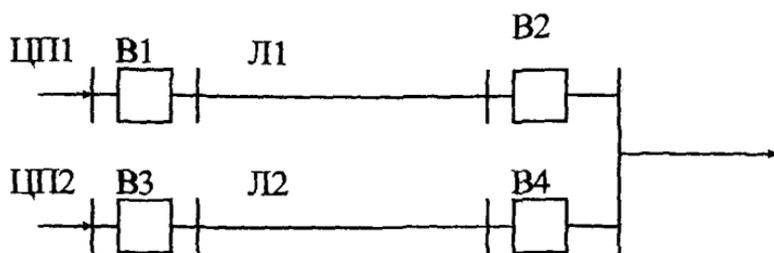


Рис. 9.5 Схема системы электроснабжения завода

Решение. 1. λ_1, λ_2 – параметры потоков отказов восстанавливаемых элементов, 1/год; T_{B1}, T_{B2} – средние времена восстановления элементов схемы, ч; q_1, q_2 – средние вероятности отказов элементов схемы.

$$q_{CX} = q_1 q_2; \quad (9.1)$$

$$\lambda_{CX} = \lambda_1 q_2 + \lambda_2 q_1; \quad (9.2)$$

$$q_1 = \lambda_1 T_{B1}; \quad (9.3)$$

$$q_2 = \lambda_2 T_{B2}; \quad (9.4)$$

$$T_{BCX} = \frac{q_{CX}}{\lambda_{CX}}. \quad (9.5)$$

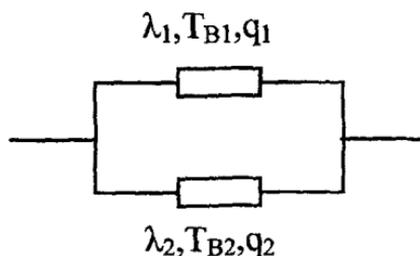


Рис. 9.6. Параллельное соединение двух элементов системы

2. $\omega_{П1}, \omega_{П2}$ – потоки преднамеренных отключений элементов схемы;

$T_{П1}, T_{П2}$ – средние времена преднамеренного простоя.

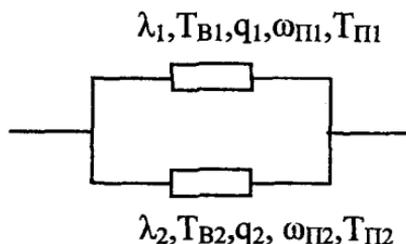


Рис. 9.7. Параллельное соединение двух элементов системы

$$\lambda_{СХ} = \lambda_1 q_2 + \lambda_2 q_1 + \omega_{П1} q_2 + \omega_{П2} q_1 =$$

$$= \lambda_1 \lambda_2 T_{В2} + \lambda_1 \lambda_2 T_{В1} + \omega_{П1} \lambda_2 T_{В2} + \omega_{П2} \lambda_1 T_{В1}; \quad (9.6)$$

$$q_{СХ} = q_1 q_2 + k_{П1} q_{П1} q_2 + k_{П2} q_{П2} q_1; \quad (9.7)$$

$$q_{П1} = \omega_{П1} T_{П1}; \quad q_{П2} = \omega_{П2} T_{П2};$$

$$K_{П1} = 1 - e^{-T_{П1}/T_{В2}}; \quad (9.8)$$

$$K_{П2} = 1 - e^{-T_{П2}/T_{В1}}, \quad (9.9)$$

где $K_{П1}, K_{П2}$ – коэффициенты, учитывающие снижения вероятности преднамеренных отключений за счет возможного наложения аварийного состояния элементов схемы на плановое состояние данного элемента.

3.

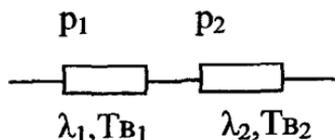


Рис. 9.8. Последовательное соединение двух элементов системы

$$P_{CX} = \prod_{i=1}^2 p_i(t) = p_1 p_2, \quad (9.10)$$

где p_1, p_2 — средние вероятности безотказной работы элементов схемы.

$$q_{CX}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 P_i t = 1 - p_1 p_2; \quad (9.11)$$

$$q_1 + q_2 = \sum_{i=1}^2 \lambda_i T_{B_i} = \lambda_1 T_{B_1} + \lambda_2 T_{B_2}; \quad (9.12)$$

$$\lambda_{CX} = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (9.13)$$

$$T_{B_{CX}} = \frac{q_{CX}}{\lambda_{CX}}. \quad (9.14)$$

4.

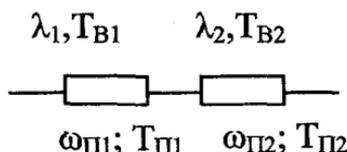


Рис. 9.9. Последовательное соединение двух элементов системы

Если учитываются преднамеренные отключения элементов, то

$$\lambda_{CX} = \lambda_1 + \lambda_2 + \omega_{\Pi i \text{ нб}}; \quad (9.15)$$

$$q_{CX} = \lambda_1 T_{B_1} + \lambda_2 T_{B_2} + (\omega_{\Pi i} T_{\Pi i})_{\text{нб}}, \quad (9.16)$$

где $\omega_{\Pi i \text{ нб}}$ и $(\omega_{\Pi i} T_{\Pi i})_{\text{нб}}$ — наибольшее значение параметра потока преднамеренных отключений элементов и их вероятности, так как в цепях с последовательным соединением элементов преднамеренные отключения совмещаются.

5. Определим недоотпуск энергии потребителю за год:

$$\Delta \mathcal{E}_H = \mathcal{E}_{\text{срх}}, \quad (9.17)$$

где \mathcal{E} – энергия, передаваемая потребителю за год;
 $q_{\text{срх}}$ – средняя вероятность отказа системы электроснабжения.

Т е м а 10

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ, ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАКОНЫ ВЕРОЯТНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ НАДЕЖНОСТИ

Задача 10.1. Функция распределения непрерывной случайной величины X задана выражением

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0; \\ ax^3 & \text{при } 0 < x \leq 1; \\ 1 & \text{при } x > 1. \end{cases}$$

Найти коэффициент a и плотность распределения $f(x)$.

Решение. $F(x) = P(X < x)$. Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины (СВ) существует вероятность, что СВ X не превышает значения x . $F(x)$ – функция распределения – универсальная характеристика для непрерывных и случайных величин. Значение x монотонно возрастает при непрерывных процессах и ступенчато возрастает при дискретных процессах. В пределах изменения СВ X эта функция изменяется от 0 до 1.

$$F(-\infty) = 0; \quad F(\infty) = 1.$$

$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ – плотность распределения (вероятности) СВ X ;

$$f(x) \geq 0; \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1.$$

Задача 10.2. Плотность распределения случайной величины X описывается выражением

$$f(x) = \begin{cases} ax & \text{при } 0 \leq x \leq 1; \\ 1 & \text{при } x < 0 \text{ или } x > 1. \end{cases}$$

Найти математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Решение. В ряде случаев в качестве характеристик СВ используют числовые величины, в частности математическое ожидание M_x , дисперсию D_x , среднее квадратическое отклонение σ_x . Определим M_x , D_x , σ_x для непрерывной СВ:

$$M_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx; D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_x)^2 f(x)dx; \sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (10.1)$$

Задача 10.3. При проведении одного опыта может появиться или не появиться некоторое событие A . Вероятность появления события A равна P , а вероятность не появления этого события равна $1 - P = q$.

Определить математическое ожидание, дисперсию и среднее квадратическое отклонение случайной величины X (число появлений события A).

Решение. Для дискретной СВ имеем: математическое ожидание M_x , дисперсия D_x , среднее квадратическое отклонение σ_x .

$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i$ (т.е. сумме произведений возможных значений СВ X на вероятности этих значений) – числовая характеристика СВ X ;

$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i$ – математическое ожидание квадрата отклонения СВ X от ее математического ожидания; дисперсия – характеристика рассеянности (разбросанности) значений СВ около ее M_x ;

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}.$$

Задача 10.4. Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту. В результате проведения 500 выстрелов число попаданий оказалось равным 450. Найти вероятность попадания по щиту при одном выстреле.

Решение. Определим относительную частоту появления события A (статистическая оценка):

$$p^* = \frac{m_1}{n_1},$$

где n_1 – число проведенных испытаний (экспериментов);

m_1 – количество раз, когда событие A имело место; $0 \leq P(A) \leq 1$.

Задача 10.5. Пусть проводится стрельба из артиллерийского орудия по щиту с двумя зонами попадания. Вероятность попадания в первую зону при одном выстреле равна 0,40; во вторую – 0,35. Найти вероятность промаха.

Решение. Вероятность суммы нескольких несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n). \quad (10.2)$$

или

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (10.3)$$

Два события – несовместные, если в результате опыта они не могут появиться одновременно.

Задача 10.6. Техническое устройство состоит из трех элементов: A_1 , A_2 и B . Элементы A_1 и A_2 дублируют друг друга. Это означает, что при отказе одного из них происходит автоматическое переключение на второй. Элемент B не дублирован.

Устройство прекращает работу в том случае, если отказывают оба элемента (A_1 и A_2) либо отказывает элемент B . Таким образом, отказ устройства можно представить в виде события $C = A_1 \cdot A_2 + B$, где событие A_1 является отказом элемента A_1 ; A_2 – отказом элемента A_2 и B – отказом элемента B . Требуется выразить вероятность события C через вероятности событий, содержащих только суммы.

Решение. Вероятность суммы двух совместных событий A и B выражается формулой

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(AB). \quad (10.4)$$

События называются совместными, если в результате опыта они появляются одновременно. Произведение двух совместных событий определим по формуле

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A + B). \quad (10.5)$$

Произведение трех совместных событий – по формуле

$$P(ABC) = P(A) + P(B) + P(C) - \\ - P(A+B) - P(A+C) - P(B+C) + P(A+B+C). \quad (10.6)$$

Задача 10.7. Устройство состоит из пяти приборов, каждый из которых независимо от других может в течение времени t отказать. Отказ хотя бы одного прибора приводит к отказу устройства. За время t вероятность безотказной работы каждого из приборов соответственно равна:

$$P_1(t) = 0,95; P_2(t) = 0,99; P_3(t) = 0,98; P_4(t) = 0,90; P_5(t) = 0,93.$$

Найти надежность устройства за время работы t .

Решение. Воспользуемся формулами (10.2) и (10.3) для определения вероятности произведения нескольких независимых событий.

Событие А называют независимым от события В, если вероятность события А не зависит от того, произошло событие В или нет.

Задача 10.8. Производят три выстрела по одной и той же мишени. Вероятность попадания при выстрелах соответственно равна: $P_1 = 0,8; P_2 = 0,6; P_3 = 0,3$. Найти вероятность того, что в результате трех выстрелов в мишени будет хотя бы одна пробоина.

Решение. Вероятность суммы любого числа совместных событий определим по формуле

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i \cdot A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i \cdot A_j \cdot A_k) + \dots + (-1)^{n-1} \cdot P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) \quad (10.7)$$

Формула выражает вероятность суммы любого числа событий через вероятности произведений этих событий, взятых по одному, по два, по три и т. д.

Вероятность произведения произвольного числа событий, выраженная через вероятности сумм этих событий, взятых по одному, по два, по три и т.д., имеет вид

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = \sum_{i,j} P(A_i + A_j) - \sum_{i,j,k} P(A_i + A_j + A_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) \quad (10.8)$$

Задача 10.9. По движущемуся танку производят три выстрела из артиллерийского орудия. Вероятность попадания при первом выстреле равна 0,5; при втором – 0,7; при третьем – 0,8. Для вывода танка из строя заведомо достаточно трех попаданий. При одном попадании танк выходит из строя с вероятностью 0,3; при двух поа-

данных – с вероятностью 0,9. Определить вероятность того, что в результате трех выстрелов танк выйдет из строя.

Решение. Формула полной вероятности имеет вид

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(A/H_i), \quad (10.9)$$

где $P(A)$ – вероятность события A ;

H_1, H_2, \dots, H_n – гипотезы, образующие полную группу несовместных событий.

Задача 10.10. При проведении стрельб из орудия по щиту было зафиксировано десять промахов ($m = 10$) из 500 выстрелов ($n = 500$).

Определить вероятность того, что при ста выстрелах будут ровно четыре промаха, если считать, что все выстрелы независимы и вероятность промаха в каждом выстреле одинакова.

Решение. Если проводят n независимых опытов, в каждом из которых событие A появляется с вероятностью P , то вероятность того, что событие появится ровно m раз, выражается формулой Бернулли:

$$P_m = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (10.10)$$

где $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$;

$$p = 1 - q;$$

q – вероятность отказа элемента.

Тема 11

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Задача 11.1. На испытания поставлено $N = 100$ элементов. Испытания проводились в течение $t = 200$ ч. В процессе проведения испытаний отказало $n = 5$ элементов, при этом отказы зафиксированы в следующие моменты: $\tau_1 = 50$ ч; $\tau_2 = 80$ ч; $\tau_3 = 90$ ч; $\tau_4 = 100$ ч; $\tau_5 = 150$ ч; остальные элементы не отказали. Определить среднюю наработку до отказа T_0 .

Решение. Средняя наработка до отказа составит:

$$T_0 \approx \frac{\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n + (N - n) \cdot t}{N}, \quad (11.1)$$

где n – число отказавших элементов;

N – число элементов, поставленных на испытания;

τ – время наработки до отказа (жизни) каждого элемента.

Задача 11.2. Построить кривую интенсивности отказов по данным табл. 11.1. На испытания поставлено N элементов ($N = 200$), испытания проводились в течение $t = 100$ ч.

Таблица 11.1

Исходные данные

№ п/п	δ_t , ч	δ_n	$n(t)$	№ п/п	δ_t , ч	δ_n	$n(t)$
1	0 – 10	10	190	6	50 – 60	2	168
2	10 – 20	8	182	7	60 – 70	2	166
3	20 – 30	6	176	8	70 – 80	4	162
4	30 – 40	4	172	9	80 – 90	5	157
5	40 – 50	2	170	10	90 – 100	8	149

Примечание. δ_t – интервал испытаний; δ_n – число отказов; $n(t)$ – число неотказавших элементов.

Решение. Интенсивность отказов по статистической оценке составит:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot n(t)}. \quad (11.2)$$

где δ_n – число отказов на интервале δ_t ;

$n(t)$ – число элементов, не отказавших к моменту t из N элементов на испытании.

Задача 11.3. Найти вероятность восстановления системы при следующих исходных данных:

$$\lambda_B = 0,5;$$

$$m = 1; 2; 3; 4; 5;$$

$$t_B = 2.$$

Построить функцию восстановления.

Решение. Вероятность восстановления работоспособного состояния объекта представляет собой значение функции распределения времени восстановления t_B за заданное время. Вероятность восстановления объекта, если этот процесс представляет пуассоновский поток, определяют по формуле

$$P_m(t) = \frac{(\lambda_B \cdot t_B)^m}{m!} e^{-\lambda_B t_B}, \quad (11.3)$$

где m – число восстановлений (число отказов);

λ_B – интенсивность восстановления;

t_B – время восстановления объекта.

Задача 11.4. Определить коэффициент готовности системы, если известно, что среднее время восстановления одного отказа $t_B = 5$ ч, а среднее значение наработки на отказ $T_C = 500$ ч.

Решение. Коэффициент готовности характеризует готовность элемента к применению по назначению в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов обслуживания. Показатель является комплексным, т.к. характеризует безотказность и ремонтно-пригодность:

$$K_G = \frac{T_C}{T_C + t_B}, \quad (11.4)$$

где T_C – средняя наработка на отказ;

t_B – среднее время восстановления одного отказа.

Задача 11.5. Определить коэффициент технического использования машин, если известно, что машину эксплуатируют в течение года ($T_Э = 8760$ ч), а затем проводят регламент. Время проведения регламента составляет 20 суток, $T_P = 20 \cdot 24 = 480$ ч. Суммарное время, затраченное на ремонтные работы за период эксплуатации, $T_{PM} = 20$ ч.

Решение. Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемого периода эксплуатации. Этот период должен содержать все виды технического обслуживания и ремонта. Коэффициент учитывает затраты времени на плановые и неплановые ремонты, а также на регламенты и определяется по формуле

$$K_{ТИ} = 1 - \frac{T_{PM} + T_P}{T_Э},$$

где $T_Э$ – период эксплуатации;

T_{PM} – время, затраченное на ремонтные работы в период эксплуатации;

T_P – время проведения регламента (планового ремонта).

Задача 11.6. Определить коэффициент оперативной готовности системы за период времени $t = 10$ ч, если известно, что система состоит из пяти элементов с соответствующими интенсивностями отказов, ч/1: $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_3 = 6 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_4 = 20 \cdot 10^{-5}$, $\lambda_5 = 50 \cdot 10^{-5}$, а среднее время восстановления при отказе одного элемента $T_B = 10$ ч.

Решение. В частном случае, когда функции надежности системы из независимых элементов имеют экспоненциальное распределение с постоянными интенсивностями отказов, функцию надежности системы определяют по формуле

$$P(t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \cdot t] = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right]. \quad (11.5)$$

Среднее время жизни системы в этом случае составит:

$$T_C = \int_0^{\infty} \exp\left[-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right] dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}. \quad (11.6)$$

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ характеризует надежность системы, необходимость применения которой возникает в произвольный момент (кроме планируемых периодов ремонта и обслуживания), начиная с которого система будет работать безотказно в течение заданного времени t .

$$K_{ог} = K_{г} \cdot P(t) = P(t) \cdot \frac{T_C}{T_C + T_B}, \quad (11.7)$$

где T_C – среднее время жизни системы;

T_B – среднее время восстановления системы.

Задача 11.7. При эксплуатации в течение одного года ($T_{\Sigma} = 1 \text{ год} = 8760 \text{ ч}$) изделий специального назначения было зафиксировано пять отказов ($m = 5$). На восстановление каждого отказа в среднем затрачено двадцать часов ($T_{\text{В}} = 20 \text{ ч}$). За указанный период эксплуатации был проведен один регламент (техническое обслуживание). Время регламента составило десять суток ($T_{\text{Р}} = 240 \text{ ч}$). Определить коэффициенты: готовности (K_{Γ}) и технического использования ($K_{\text{ТИ}}$).

Решение. Коэффициент готовности (K_{Γ}) характеризует готовность элемента к применению по назначению в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов обслуживания.

$$K_{\Gamma} = 1 - \left(\frac{m \cdot T_{\text{В}}}{T_{\Sigma}} \right), \quad (11.8)$$

где m – число отказов в интервале суммарной наработки;

$T_{\text{В}}$ – время восстановления элемента (системы);

T_{Σ} – период эксплуатации.

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации:

$$K_{\text{ТИ}} = 1 - \left(\frac{m \cdot T_{\text{В}} + T_{\text{Р}}}{T_{\Sigma}} \right), \quad (11.9)$$

где $T_{\text{Р}}$ – суммарное время, затраченное на проведение всех видов обслуживания за период эксплуатации.

Задача 11.8. В процессе эксплуатации электронной аппаратуры учитывалось число выходящих из строя ламп в течение каждой тысячи часов их работы. При этом наблюдение велось за 1000 однотипных ламп ($N_0 = 1000$). В результате подсчета отказавших ламп получены данные, сведенные в табл. 11.2. Определить вероятность безотказной работы за 1500 и 3000 ч работы ламп.

Решение. Для определения вероятности безотказной работы используется следующая статистическая оценка:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (11.10)$$

где N_0 – число образцов производственной системы (элемента) в начале испытаний (эксплуатации);

$n(t)$ – число образцов, отказавших за время t ; $n(t) = \sum p_i$;

t – время, в течение которого необходимо определить вероятность безотказной работы системы;

p_i – число вышедших из строя образцов в интервале времени Δt ;

Δt – принятая продолжительность интервала времени.

Т а б л и ц а 11.2

Исходные данные

Интервал времени Δt , ч	Число отказов p_i	Интервал времени Δt , ч	Число отказов p_i
0 – 1000	20	7000 – 8000	40
1000 – 2000	25	8000 – 9000	50
2000 – 3000	35	9000 – 10000	30
3000 – 4000	50	10000 – 11000	40
4000 – 5000	30	11000 – 12000	40
5000 – 6000	50	12000 – 13000	50
6000 – 7000	40	13000 – 14000	40

Задача 11.9. Требуется определить вероятность отказа ламп в электронной аппаратуре за 3000 и 5000 ч работы. Исходные данные приведены в табл. 11.2.

Решение. Для статистического определения вероятности отказа изделия пользуются следующей формулой:

$$Q(t) = \frac{\sum n_i}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (11.11)$$

где N_0 – число образцов производственной системы в начале испытаний;

n_i – число вышедших из строя образцов в интервале времени Δt_i ;
 t – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы;

Δt – продолжительность интервала времени;

$n(t)$ – число образцов, отказавших за время t .

Задача 11.10. Определить среднее время безотказной работы ламп электронного устройства по данным табл. 11.2.

Решение. Для определения среднего времени безотказной работы используют следующую формулу:

$$T = \frac{\sum n_i \cdot t_i}{N_0}, \quad (11.12)$$

где n_i – число образцов, отказавших в i -м интервале;

t_i – среднее время i -го интервала;

t_k – время, в течение которого отказали все N_0 образцов;

Δt – выбранная величина интервала времени;

$t_i = t_{i-1} + \Delta t$ (t_{i-1} – время начала i -го интервала; t_i – время конца i -го интервала).

Задача 11.11. Определить среднее время между соседними отказами технического устройства, если в результате испытаний 36 его образцов была зафиксирована 231 неисправность. При этом каждый из испытываемых образцов исправно проработал в течение 19 ч.

Решение. Среднее время работы ремонтируемой производственной системы (элемента) между двумя соседними отказами называется наработкой на отказ, обозначается t_{cp} и определяется из статистических данных об отказах по формуле

$$t_{\text{cp}} = \frac{\sum t_i}{n}, \quad (11.13)$$

где n – число отказов производственной системы (элемента) за время испытания t ;

t_i – время безотказной работы системы между $(i-1)$ -м и i -м отказами.

Задача 11.12. Определить зависимость частоты отказов от времени для ламп, установленных в электронном устройстве, по данным табл. 11.2.

Решение. Под частотой отказов понимается плотность вероятности времени работы производственной системы до первого отказа. Статистически она определяется как отношение числа отказавших систем в единицу времени к первоначальному числу испытываемых систем при условии, что все вышедшие из строя системы не восстанавливаются, т.е. число испытываемых систем во время испытания уменьшается.

Если обозначить частоту отказов $a(t)$, то согласно определению

$$a(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (11.14)$$

где $n(t)$ – число отказавших систем (элементов) в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

N_0 – первоначальное число испытываемых систем;

Δt – интервал времени.

Задача 11.13. Определить интенсивность отказов ламп электронного устройства по данным табл. 11.2.

Решение. Интенсивностью отказов называется отношение частоты отказов к вероятности безотказной работы невозстанавливаемой при испытании системы, взятое для одного и того же момента. Интенсивность обозначается $\lambda(t)$ и определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \quad (11.15)$$

где $n(t)$ – число отказавших образцов за промежуток времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

Δt – интервал времени;

$$N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2};$$

где N_{i-1} – число исправно работающих образцов в начале интервала Δt ;
 N_i – число исправно работающих образцов в конце интервала Δt .

Задача 11.14. В процессе эксплуатации электронного устройства учитывалось число выходящих из строя ламп в течение каждой тысячи часов их работы. Наблюдение велось за 1000 ламп, среди которых было 600 приемных и 400 передающих. При этом отказавшие лампы заменялись новыми в процессе всего периода испытания. В результате подсчета отказавших ламп получены данные, сведенные в табл. 11.3. Определить среднюю частоту отказов электронного устройства, каждого типа ламп в отдельности и суммарную частоту отказов.

Т а б л и ц а 11.3

Исходные данные

Интервал времени Δt_i , ч	Число отказов электронных ламп n		
	суммарное	в том числе	
		передающих	приемных
1	2	3	4
0 – 1000	20	10	10
1000 – 2000	30	20	10
2000 – 3000	45	30	15
3000 – 4000	60	40	20
4000 – 5000	40	20	20
5000 – 6000	60	35	25

1	2	3	4
6000 – 7000	60	30	30
7000 – 8000	50	30	20
8000 – 9000	60	40	20
9000 – 10000	40	20	20
10000 – 11000	50	30	20
11000 – 12000	60	30	30
12000 – 13000	70	40	30
13000 – 14000	60	30	30

Решение. Средней частотой отказов называется отношение числа отказавших образцов в единицу времени к числу испытываемых образцов при условии, что все вышедшие из строя образцы заменяются исправными.

Средняя частота отказов обозначается $\omega(t)$ и определяется по формуле

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (11.16)$$

где $n(t)$ – число вышедших из строя образцов в интервале времени от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

N – число испытываемых образцов; поскольку все элементы заменяются исправными, то $N = N_0$;

Δt – интервал времени.

Суммарной частотой отказов называется число отказов системы в единицу времени, приходящееся на один ее экземпляр. Обозначим эту характеристику через $\omega_C(t)$. Согласно определению, для данного образца запишем:

$$\omega_C(t) = \frac{n(t)}{1 \cdot \Delta t}, \quad (11.17)$$

где $n(t)$ – число отказов системы за время от $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$;

Δt – интервал времени.

Суммарная частота отказов сложной системы в момент t равна сумме частот отказов элементов:

$$\omega_c(t) = \sum N_i \cdot \omega_i(t), \quad (11.18)$$

где N_i – число элементов i -го типа;

ω_i – средняя частота отказов элементов i -го типа.

Задача 11.15. В результате испытания двух образцов производственной системы получены следующие данные : для первого образца $t_{\pi 1} = t_{\pi 1,1} + t_{\pi 1,2} = 12 + 18 = 30$ ч; $t_{p1} = t_{p1,1} + t_{p1,2} + t_{p1,3} = 15 + 20 + 25 = 60$ ч; для второго образца $t_{\pi 2} = t_{\pi 2,1} = 30$ ч ; $t_{p2} = t_{p2,1} = 60$ ч.

Решение. Под коэффициентом готовности понимается вероятность того, что производственная система будет работоспособна в произвольно выбранный момент. Коэффициент готовности обозначается через k_r и рассчитывается по формуле

$$k_r = \frac{t_p}{t_p + t_{\pi}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{\pi i}}, \quad (11.19)$$

где t_p – время безотказной работы системы;

t_{π} – время вынужденного простоя;

n – число перерывов в работе за выбранный календарный срок, включая отказы и остановки для проведения профилактики;

m – число перерывов вынужденного простоя.

Под коэффициентом вынужденного простоя понимают вероятность того, что система будет неработоспособна в произвольно выбранный момент. Коэффициент простоя обозначается k_{π} и определяется по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{t_{P} + t_{\Pi}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\Pi i}}{\sum_{i=1}^n t_{P i} + \sum_{i=1}^m t_{\Pi i}}. \quad (11.20)$$

Коэффициентом (нормой) профилактики называется отношение времени, затраченного на профилактику и ремонт производственной системы, ко времени ее безотказной работы, взятых за один и тот же календарный срок. Коэффициент профилактики обозначается k_{Π} и определяется по формуле

$$k_{\Pi} = \frac{t_{\Pi}}{t_{P}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\Pi i}}{\sum_{i=1}^n t_{P i}}. \quad (11.21)$$

Задача 11.16. На испытании находилось 100 образцов автоматических систем, предназначенных для длительной эксплуатации. При этом было зафиксировано в течение 1000 ч работы 254 отказа. Состав системы каждого образца, число отказов элементов во всех 100 образцах, а также число элементов, изъятых в процессе ремонтов, приведены в табл. 11.4. Необходимо дать заключение о надежности элементов автоматических систем и установить число запасных элементов, необходимых для их нормальной эксплуатации.

Таблица 11.4

Исходные данные

Элементы	Число элементов в одном образце	Число отказов	Число изъятых элементов
1	2	3	4
Электровакуумные приборы	220	100	220
Полупроводниковые приборы	40	2	12
Сопротивления	2140	46	-
Конденсаторы	1800	38	-

1	2	3	4
Реле	24	3	8
Трансформаторы	12	1	1
Электрические вращающиеся устройства	20	4	12
Магнитные усилители	8	-	1
Дроссели	40	-	-
Разъемы	25	3	-
Выключатели	26	2	3
Плавкие вставки	14	3	-
Пайка и провода	3000	48	-
Прочие детали	86	4	6

Решение. Коэффициентом отказов элементов называется отношение числа отказов системы из-за выхода из строя данного типа элементов к общему числу отказов системы. Коэффициент отказов k_o определим по формуле

$$k_o = \frac{n_i}{n}, \quad (11.22)$$

где n_i – число отказов системы из-за элементов i -го типа за определенный календарный срок;

n – общее число отказов системы за тот же календарный срок.

Под относительным коэффициентом отказов понимают отношение процента отказов производственной системы вследствие выхода из строя элементов в системе. Относительный коэффициент отказов $k_{o.o}$ определяется по формуле

$$k_{o.o} = \frac{\frac{n_i}{n}}{\frac{N_i}{N}} = \frac{n_i \cdot N}{n \cdot N_i}, \quad (11.23)$$

где n_i – число отказов системы, вызываемых элементами i -го типа;
 n – общее число отказов системы;
 N_i – число элементов i -го типа в системе;
 N – общее число элементов в системе.

Коэффициентом расхода элементов называется отношение числа отказавших и изъятых в процессе профилактических осмотров и ремонтов элементов в единицу времени к общему числу данных элементов в производственной системе. Коэффициент расхода элементов k_3 определяется по формуле

$$k_3 = \frac{n_i + m_i}{N_i \cdot \Delta t}, \quad (11.24)$$

где n_i – число вышедших из строя элементов i -го типа;
 m_i – число элементов i -го типа, изъятых в процессе профилактических осмотров и ремонта системы;
 N_i – общее число i -х элементов в системе;
 Δt – время, в течение которого проводится испытание аппаратуры.

Т е м а 12

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО РАСЧЕТУ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Задача 12.1. Определить надежность линии электропередачи 110 кВ длиной 50 км, принципиальная схема которой приведена на рис. 12.1, если известно, что вероятность отказа линейной ячейки 110 кВ с масляным выключателем $q_1 = 0,085 \cdot 10^{-3}$, воздушной линии $q_2 = 0,40 \cdot 10^{-3}$, трансформатора ТДНГ – 40500/110 – $q_3 = 0,26 \cdot 10^{-3}$ и линейной ячейки 10 кВ с выключателем МГТ-10 – $q_4 = 3,4 \cdot 10^{-6}$.

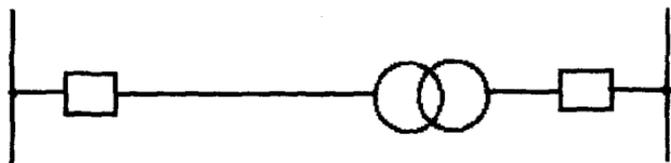


Рис. 12.1. Принципиальная схема электроснабжения по одноцепной ЛЭП

Задача 12.2. На электростанции работают на общие шины четыре генератора со следующими данными:

$$S_1 = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad q_1 = 0,04; \quad P_1 = 0,96;$$

$$S_2 = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad q_2 = 0,04; \quad P_2 = 0,96;$$

$$S_3 = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad q_3 = 0,02; \quad P_3 = 0,98;$$

$$S_4 = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}; \quad q_4 = 0,02; \quad P_4 = 0,98.$$

Определить вероятность недоставки разных величин мощности, а также длительность времени аварии при заложенном времени работы генераторов 8000 ч/год.

Задача 12.3. Определить вероятность отключений разных значений мощности на подстанции 220/110, имеющей два одинаковых трансформатора по 160 МВА. Вероятность аварийного отключения трансформатора $q_{T1} = q_{T2} = 0,002$.

Задача 12.4. Определить экономический ущерб при аварийном отключении одноцепной линии с $U_n = 110 \text{ кВ}$, $L = 80 \text{ км}$; сооружение на металлических опорах. По линии в течение года передается потребителям электроэнергия $12 \cdot 10^4 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Удельная стоимость 1 МВт·ч недоотпущенной электроэнергии для данного района $0,8 \cdot 10^9 \text{ руб/МВт} \cdot \text{ч}$ в ценах 1985 года. Планово-предупредительные ремонты линии производятся под напряжением без отключения линии.

Задача 12.5. Электроустановка с $P_{\max} = 20 \text{ МВт}$ расположена на расстоянии 70 км от районной подстанции. Требуется сопоставить два варианта электроснабжения по нерезервированной сети (т.е. одноцепной линии) и по резервированной сети (двухцепной линии). Плановый ремонт линии производится при снятом напряжении, и длительность его составляет 175 ч в год.

Задача 12.6. Коэффициенты аварийности основных элементов энергетического блока 235 МВА составляют соответственно: для

котла $q_k = 0,08$; для турбины $q_T = 0,02$; для генератора $q_G = 0,05$; для трансформатора $q_{TP} = 0,01$.

Определить вероятность аварии и безотказной работы блока, а также ожидаемое время аварийного простоя в течение года при заложенном годовом времени работы $T = 8300$ ч.

Задача 12.7. Определить вероятность аварийного ограничения транспорта электроэнергии, а также часы продолжительности аварийных режимов для схемы питания энергии, имеющей 4 цепи воздушной линии с пропускной способностью 220 МВА каждая, длина линии 120 км, коэффициент аварийности на 100 км заложен на уровне среднего многолетнего для рассматриваемого района ($q_l = 0,025$).

Задача 12.8. Определить показатели надежности паротурбинного блока, состоящего из котла, турбогенератора с конденсационным устройством и питательного насоса. Выход из строя одного из указанных элементов приводит к остановке всего блока. Соответствующие интенсивности отказов и восстановлений равны:

$$\lambda_K = 4 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; \quad \mu_K = 1 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}; \quad \lambda_T = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

$$\mu_T = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}; \quad \lambda_H = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}; \quad \mu_H = 2 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}.$$

Задача 12.9. Проводятся ресурсные испытания. Установлено 400 электродвигателей. Через 3000 ч работы отказало 200 двигателей. Испытания продолжались, и через 100 ч отказало еще 100 двигателей. Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы $P^*(3000)$, $q^*(3000)$, $P^*(3100)$, $q^*(3100)$, $P^*(3050)$, $\lambda^*(3050)$, частоту отказов $a^*(3050)$.

Задача 12.10. Имеется батарея аккумуляторов. Время безотказной работы батареи подчиняется закону Гаусса (нормальному распределению) с параметрами $m_X = 30$ ч, $\sigma_X = 4$ ч. Какова вероятность безотказной работы в течение 35 ч и как обеспечить вероятность безотказной работы $P_C = 0,35$?

Задача 12.11. Рассчитать коэффициенты различных состояний двухтрансформаторной подстанции в общем случае группы элементов, исходя из заданных коэффициентов готовности $K_T = 0,99943$ и вынужденного простоя $K_B = 0,00057$.

Задача 12.12. Сетевой трансформатор в городской электросети работает в течение времени T , которое является случайной величиной и распределено по показательному закону:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0 & t < 0; \\ \lambda e^{-\lambda t} & t > 0. \end{cases}$$

По истечении времени T вследствие роста нагрузки, повреждения или других причин трансформатор заменяют новым. Найти вероятность того, что за время τ :

- 1) трансформатор не придется заменять;
- 2) трансформатор придется заменять два раза;
- 3) трансформатор придется заменять не менее двух раз.

Задача 12.13. Предполагается, что случайные повреждения оборудования трансформаторной подстанции распределены по закону Пуассона. Найти среднее число повреждений в год, если вероятность того, что в течение года произойдет хоть один отказ, равна 0,95.

Задача 12.14. Рассчитать надежность батареи, включающей 6 последовательно соединенных конденсаторов с $U_{НОМ} = 6$ кВ, работающих на 35 кВ. Интенсивность отказа конденсаторов $\lambda = 0,01$ 1/год.

Задача 12.15. Имеем схему электроснабжения животноводческого комплекса, состоящую из ВЛ 35 кВ $L = 10$ км ($\lambda_1 = 0,002$), масляного выключателя ($\lambda_2 = 0,02$) в начале линии, и разъединителя ($\lambda_3 = 0,015$), предохранителя ($\lambda_4 = 0,26$), трансформатора ($\lambda_5 = 0,01$) на приемном конце. Определить вероятность безотказной работы схемы в течение месяца, года.

Задача 12.16. Рассмотрим два параллельно работающих трансформатора с параметром потока отказов $\lambda = 0,051$ 1/год. Вероятность безотказной работы каждого трансформатора в течение года работы $P(t) = e^{-0,05} = 0,951$. На сколько повысится надежность при постоянном параллельном подсоединении второго такого же трансформатора?

Задача 12.17. Рассчитать количество недоставленной ежегодно электрической энергии вследствие аварийных перерывов в питании двухлинейной схемы со 100% резервом. Максимальная нагрузка 6000 кВА, $\cos \varphi_{\text{ср}} = 0,95$, $T_{\text{max}} = 4500$ ч/год. Надежностные параметры линии длиной 10 км:

$t_A = 12$ ч – среднее время ремонта элемента;

$t_P = 0,5$ ч – время переключения вручную;

$q_S = 0,07$ – коэффициент несрабатывания автоматики резерва;

$\lambda = 1$ 1/год – скорость изменения вероятной безотказной работы (интенсивность повреждения в единицу времени).

Задача 12.18. Рассчитать количество аварийно недоставленной электрической энергии в течение года для трех вариантов трансформаторной подстанции 110 кВ, нагруженной в максимум нагрузки мощностью $S_{\text{max}} = 40$ МВА.

Годовое время использования максимума нагрузки $T_{\text{max}} = 5000$ ч, $\cos \varphi_{\text{ср}} = 0,93$.

Вариант 1 – однострансформаторная подстанция.

Вариант 2 – двухтрансформаторная подстанция со 100 % резервом мощности.

Вариант 3 – трехтрансформаторная подстанция с резервом в виде одного трансформатора.

Задача 12.19. Потребители электроэнергии, питающиеся по радиальной сети (рис. 12.2), отключаются при повреждениях соответствующих отходящих от источника питания (ИП) радиальных линий. Недоотпуск электроэнергии потребителям (ΔW) и затраты времени на ремонт повреждений (T), а также длины линий приведены в табл. 12.1.

Исходные данные

Номер линии	1	2	3	4	5	6
ΔW , кВт·ч	460	450	410	520	580	615
T , ч	0,94	0,87	0,74	0,63	0,82	0,97
L , км	0,2	0,4	0,5	0,3	0,45	0,15

Найти математическое ожидание недоотпуска электроэнергии потребителям и затраты времени на процесс поиска повреждений. Определить дисперсию и среднеквадратичные отклонения для указанных потребителей.

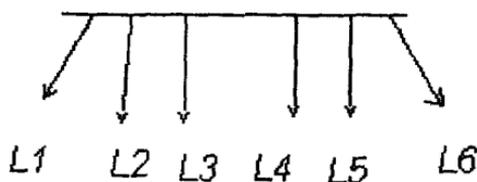


Рис. 12.2. Схема сети

Задача 12.20. Рассчитать вероятность безотказной работы в течение трех месяцев для схемы сети, состоящей из равнонадежных элементов. Исходные данные: интенсивность отказов элементов $\lambda = 0,05$ 1/год, $t = 0,25$ года (рис. 12.3).

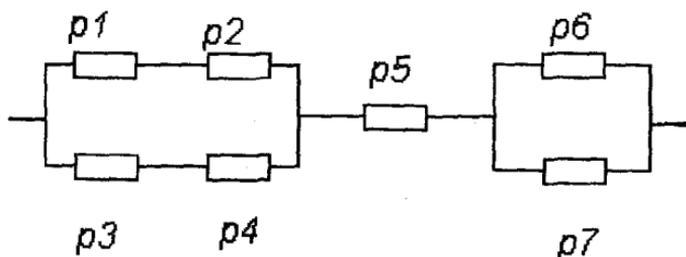


Рис. 12.3. Схема сети

Задача 12.21. Система состоит из 10 равнонадежных элементов. Надежность работы каждого элемента $p = 0,9$. Сколько необходимо резервных элементов при общем и отдельном резервировании для того, чтобы надежность системы составляла $p_1 = 0,95$.

Задача 12.22. Линия электропередачи длиной 50 км имеет удельную повреждаемость $\omega_0 = \lambda_0 = 0,02$ 1/км·год. Среднее время восстановления 10 ч. Поток отказов простейший, закон распределения случайной величины времени восстановления экспоненциальный. Требуется определить коэффициент готовности линии и вероятность безотказной работы к концу первого месяца начала года.

Задача 12.23. По результатам испытаний элементов электрического оборудования получена следующая таблица:

t_i	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$N(t_i)$	1000	905	818	741	670	606	549	497	449	407	368

Определить закон распространения надежности, время наработки до отказа $p(t)$ и $q(t)$ за 30 и 100 ч.

Задача 12.24. Из большой партии асинхронных двигателей, содержащей 2% неисправных машин, берется для контроля выборка из 5 двигателей ($n = 5$). Оценить вероятность появления в выборках 0, 1, 2, 3, 4, 5 неисправных машин.

Задача 12.25. Данные, полученные по результатам эксплуатации трансформатора: $\lambda = 0,002$ ч⁻¹; $\mu = 2$ ч. Вычислить вероятность улучшения ремонтируемости трансформатора за $t = 5$ ч при эксплуатации 100 ч.

Задача 12.26. По результатам восстановления изделий в процессе обслуживания имеем стационарный поток восстановлений в часах. Найти вероятность 2, 5 и 10 восстановлений за время $t = 3$ ч.

Задача 12.27. Энергосистема состоит из 2 генераторных блоков по 200 МВт, двух – по 100 МВт и 4 генераторных блоков по 50 МВт ($n_1 = 2$; $n_2 = 2$; $n_3 = 4$). Вероятности аварийного простоя блоков:

$q_1 = q_{200} = 0,02$; $q_2 = q_{100} = 0,015$; $q_3 = q_{50} = 0,01$. Определить вероятность аварийного снижения мощности энергосистемы на 50 и 100 МВт.

Задача 12.28. Определить вероятности снижения генерирующей мощности узла энергосистемы, имеющего 8 генераторных блоков по 300 МВт с относительной длительностью аварийного простоя $q = 0,055$.

Задача 12.29. Энергосистема состоит из 10 генераторов мощностью $P_A = 100$ МВт. Вероятность отказа одного блока равна 0,1. Какова должна быть нагрузка энергосистемы для недопустимости дефицита мощности?

Задача 12.30. Сравнить вероятности исправного состояния ГРЭС (рис. 12.4) и ТЭЦ (рис. 12.5), представляющих собой соединение парового котла, паровой турбины, генератора и трансформатора. Вероятности повреждения котла, турбины, генератора и трансформатора: $q_k = 0,019$; $q_T = 0,014$; $q_G = 0,002$; $q_{TP} = 0,002$.

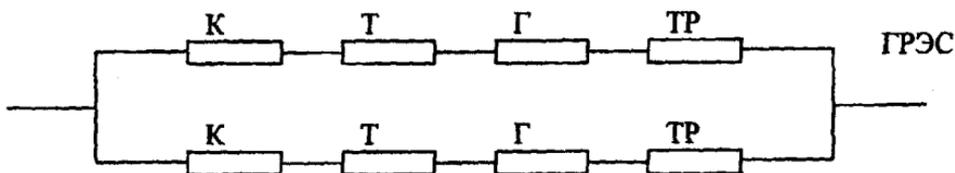


Рис. 12.4. Схема ГРЭС

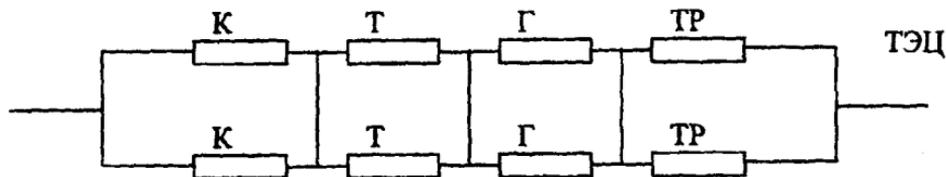


Рис. 12.5. Схема ТЭЦ

Аварийный выход каждого элемента считать независимым и совместимым случайным событием.

Задача 12.31. Определить параметры надёжности цепи 35 кВ, состоящей из двух последовательно соединенных ячеек с выключателями, кабельной линии длиной 2 км и силового трансформатора 6300 кВА.

Дано:

1) $\lambda_1 = 0,02$ 1/год, $t_{B1} = 20$ ч – параметр потока отказов и время восстановления ячейки с линейным выключателем;

2) $\lambda_2 = 0,007$ 1/год, $t_{B2} = 20$ ч – время восстановления ячейки с выключателем трансформатора;

3) $\lambda_3 = 0,0015$ 1/год, $t_{B3} = 4$ ч – время восстановления кабельной линии на 1 км;

4) $\lambda_4 = 0,0015$ 1/год, $t_{B4} = 90$ ч – время восстановления силового трансформатора.

Задача 12.32. В электрической цепи (рис. 12.6) пропускная способность повышающих трансформаторов T1 и линии составляет 100% требуемой мощности, а трансформаторов T2 – 50%. Каждый из генераторов отдает 50% требуемой мощности. Определить процентную вероятность доставки электроэнергии потребителям:

1) 100%; 2) 50%; 3) 0%.

Дано: $q_G = 0,05$, $q_{T1} = 0,04$, $q_L = 0,03$; $q_{T2} = 0,015$.

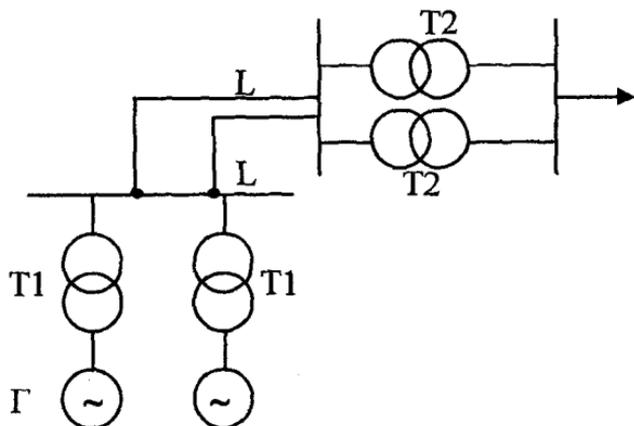


Рис. 12.6. Схема электроснабжения

Задача 12.33. Промышленное предприятие может быть запитано электроэнергией по трем схемам.

Рассчитать вероятность аварии каждой схемы. Допущение: каждая цепь покрывает потребности предприятия.

Дано: $q_B = 0,005$; $q_{Л1} = q_{Л2} = 0,002$; $q_{Ш} = 0,0001$.

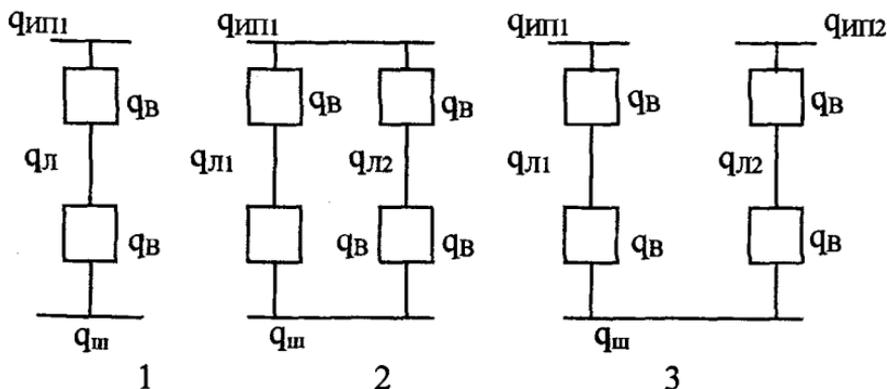


Рис. 12.7. Варианты 1–3 схем электроснабжения: ИП – источник питания; В – выключатель; Л – линия; Ш – сборные шины

Л и т е р а т у р а

1. Фокин, Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. – М.: Высшая школа, 1989. – 149 с.
2. Цыганков, В.М. Надежность электрических систем и сетей: конспект лекций. – Мн.: БГПА, 2001. – 151 с.
3. Анисимова, Н.Д. [и др.] Расчет и анализ режимов работы сетей. – М.: Энергия, 1974. – 333 с.
4. Розанов, М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 195 с.
5. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Под ред. С.С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 449 с.

СОДЕРЖАНИЕ

В в е д е н и е	3
Тема 1. Расчет вероятности аварийного отключения и надежной работы электрической сети для разных вариантов системы передачи энергии.	4
Тема 2. Расчет надежности схем питания потребителей.	13
Тема 3. Расчет надежности передачи энергии и определение продолжительности аварии электрооборудования электрических станций и сетей.	27
Тема 4. Количественная вероятностная оценка надежности электроснабжения потребителя.	39
Тема 5. Определение экономичности вариантов электроснабжения промышленного узла с учетом надежности.	55
Тема 6. Составление структурных схем электрической сети и определение показателей надежности.	65
Тема 7. Расчет надежности электроснабжения подстанций для схемы электрической сети с учетом распределительных устройств.	72
Тема 8. Расчет суммарного ущерба от недоотпуска электроэнергии в схемах электроснабжения.	84
Тема 9. Расчет потока отказов и среднего времени восстановления при анализе надежности электрических систем и сетей.	96
Тема 10. Функциональные зависимости, числовые характеристики и законы вероятности, используемые при расчете надежности.	104
Тема 11. Статистические показатели эксплуатационной надежности элементов энергосистемы.	110
Тема 12. Задачи для самостоятельной работы по расчету надежности электрических систем и сетей.	123
Л и т е р а т у р а	132

Учебное издание

**НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И СЕТЕЙ**

Сборник задач

для студентов дневного и заочного отделений
специальностей 1-43 01 02 “Электроэнергетические системы и сети”
и 1-53 01 04 “Автоматизация и управление энергетическими
процессами”

Составитель

ЦЫГАНКОВ Валерий Михайлович

Редактор Е.И. Кортель

Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

Подписано в печать 13.02.2006.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,8. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 100. Заказ 75.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.