

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Электроснабжение»**

# **НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК**

**ПРАКТИКУМ**

**по одноименной дисциплине**

**для студентов специальности 1-43 01 03**

**«Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05**

**«Электроснабжение предприятий  
агропромышленного комплекса»**

**дневной формы обучения**

**Гомель 2015**

УДК 621.31.019.3:631.371(075.8)  
ББК 31.27-02я73  
Н17

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 8 от 27.05.2014 г.)*

Составитель: Т. В. Алферова, О. Ю. Пухальская, А. А. Алферов  
Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. А. Савельев*

**Надежность** электроснабжения потребителей АПК : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05 «Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса» дневной формы обучения / сост.: Т. В. Алферова, О. Ю. Пухальская, А. А. Алферов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 51 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Практикум содержит шесть тем практических занятий, в которых изложены краткие теоретические сведения, приведены примеры решения задач и задания для самостоятельной работы, позволяющие студентам закрепить теоретические знания и получить практические навыки по расчету и анализу надежности схем электроснабжения.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05 «Электроснабжение предприятий агропромышленного комплекса» дневной формы обучения.

УДК 621.31.019.3:631.371(075.8)  
ББК 31.27-01я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2015

## ВВЕДЕНИЕ

В практической деятельности инженеру-энергетику приходится постоянно принимать различные решения: выбирать проектный вариант схемы электроснабжения; определять режимы её функционирования и т. д. На эти решения оказывает влияние большое количество факторов. Среди всех факторов надёжность занимает особое место, т. к. при принятии практически любого решения требуются знания теоретических основ и практических расчётов надёжности.

В данном пособии рассмотрен ряд задач, связанных с расчётами и анализом надёжности электроснабжения потребителей, включая расчёты вероятности безотказной работы, вероятности отказа и других показателей надёжности схем электроснабжения потребителей, расчёт статистических показателей эксплуатационной надёжности элементов схем электроснабжения, определение экономичности вариантов схем электроснабжения с учётом надёжности.

# 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

## Теоретические сведения

Данная тема посвящена оценке надёжности технических систем при заданных показателях надёжности элементов в зависимости от способа их соединения. Техническая система рассматривается как некая абстрактная структура вне зависимости от её физической природы, но обладающая общими закономерностями [3]:

- структура имеет вход и выход;
- показатели надёжности структуры определяются на выходе;
- элементы находятся только в двух состояниях – работоспособном и неработоспособном;
- отказы элементов рассматриваются как независимые события;
- потоки отказов и восстановления элементов есть простейшие потоки событий;
- пропускная способность элементов не ограничена.

Для анализа надёжности схемы электроснабжения представляются в виде структурной схемы или блок-схемы, в которой реальные связи заменяются условными с учётом влияния каждого элемента на надёжность сети в целом.

Соединение блоков в схеме может быть последовательным и параллельным. Наличие последовательных и параллельных связей в различных сочетаниях определяет многообразие блок-схем, применяемых при расчёте надёжности электроснабжения.

Приведём определения двух показателей надёжности, необходимых для дальнейшего рассмотрения данной темы.

**Вероятность безотказной работы  $P(t)$**  – вероятность того, что в заданном интервале времени в системе или элементе не произойдет отказ.

**Вероятность отказа  $Q(t)$**  – вероятность того, что в заданном интервале времени произойдет хотя бы один отказ.

Безотказная работа и отказ – несовместные и противоположные события. Таким образом, всегда имеет место соотношение

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (1.1)$$

## Надёжность структур с последовательным соединением элементов

**Последовательным соединением** называется такая структура, отказ которой наступает при выходе из строя хотя бы одного элемента, т. е. последовательная структура работоспособна, если все её элементы работоспособны.

Пусть событие  $X_i$  означает, что  $i$ -й элемент последовательной структуры работоспособен, а  $\bar{X}_i$  – обратное событие. Тогда структура, состоящая из  $n$  последовательно соединённых элементов, работоспособна, если  $X_1, X_2, \dots, X_n$  работоспособны.

Показатели надёжности структуры, состоящей из  $n$  последовательно соединённых элементов определяются по выражениям, приведённым ниже.

1. Поскольку события  $X_i$  являются независимыми, по закону произведения вероятностей, вероятность безотказной работы последовательной структуры:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (1.2)$$

2. Вероятность отказа последовательной структуры:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)). \quad (1.3)$$

## Надёжность структур с параллельным соединением элементов

**Параллельным соединением** называется структура, отказ которой наступает при отказе всех элементов, входящих в структуру.

Параллельную структуру называют ещё избыточной или резервированной структурой, поскольку она содержит элементов больше, чем это необходимо для ее нормального функционирования. При отказе одного или нескольких элементов функция структуры выполняется оставшимися в работе элементами.

Отказ параллельной структуры предполагает, что все  $m$  элементов находятся в состоянии простоя, т. е.:

1) вероятность отказа параллельной структуры:

$$Q_c(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod_{j=1}^n Q_j(t). \quad (1.4)$$

2) вероятность безотказной работы параллельной структуры:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^n Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_j(t)). \quad (1.5)$$

### Надёжность структур со смешанным соединением элементов

Структуры представляют собой сочетание последовательно и параллельно соединённых элементов. Определение показателей надёжности таких структур производится поэтапным объединением (эквивалентированием) элементов по формулам для последовательно и параллельно соединённых элементов.

Выполнение расчётов будет рассмотрено в примерах.

### Теорема сложения вероятностей

События называются **несовместными**, если никакие два из них не могут появиться вместе, и, наоборот, события называются **совместными**, если они могут произойти одновременно.

Теорема сложения вероятностей для совместных событий  $(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ :

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{ij} P(A_i \cdot A_j) + \sum_{ijk} P(A_i \cdot A_j \cdot A_k) + \dots + (-1)^{n-1} \sum_n P(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots \cdot A_n), \quad (1.6)$$

где  $P(A_i)$  – вероятность события  $A_i$ ;

$i, j, k$  – индексы изменения событий.

### Задача № 1.1

Схема электроснабжения представлена на рис. 1.1 и состоит из последовательно соединённых элементов. Определить вероятность отказа сети и вероятность её безотказной работы, если вероятности отказа отдельных элементов сети составляют: генератора  $Q_{\text{г}} = 0,05$ , трансформатора  $Q_{\text{т}} = 0,1$ , линии  $Q_{\text{л}} = 2 \cdot 10^{-3}$ .

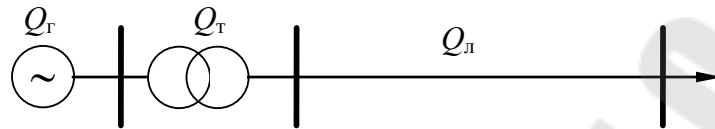


Рис. 1.1. Схема электроснабжения

#### Решение

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{сх}} = P_{\text{г}} \cdot P_{\text{т}} \cdot P_{\text{л}} = (1 - Q_{\text{г}})(1 - Q_{\text{т}})(1 - Q_{\text{л}}) = \\ = (1 - 0,05)(1 - 0,1)(1 - 2 \cdot 10^{-3}) = 0,8533.$$

Вероятность отказа схемы:

$$Q_{\text{сх}} = 1 - P_{\text{сх}} = 1 - 0,8533 = 0,1467.$$

### Задача № 1.2

Определить вероятность отказа схемы передачи электроэнергии (см. задачу № 1.1, рис. 1.1), применяя теорему сложения вероятностей для совместных событий.

#### Решение

По формуле (1.6):

$$Q_{\text{н\o}} = Q_{\text{г}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{л}} - (Q_{\text{г}} \cdot Q_{\text{т}} + Q_{\text{г}} \cdot Q_{\text{л}} + Q_{\text{т}} \cdot Q_{\text{л}}) + Q_{\text{г}} \cdot Q_{\text{т}} \cdot Q_{\text{л}}; \\ Q_{\text{сх}} = 0,05 + 0,1 + 2 \cdot 10^{-3} - (0,05 \cdot 0,1 + 0,05 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) + \\ + 0,05 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,1467.$$

### Задача № 1.3

Определить вероятность отказа схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.2, применяя теорему сложения вероятностей для совместных событий. Вероятности отказа отдельных элементов схемы составляют: генератора  $Q_G = 0,05$ , трансформатора Т1  $Q_{T1} = 0,1$ , линии  $Q_L = 2 \cdot 10^{-3}$ , трансформатора Т2  $Q_{T2} = 0,12$ .

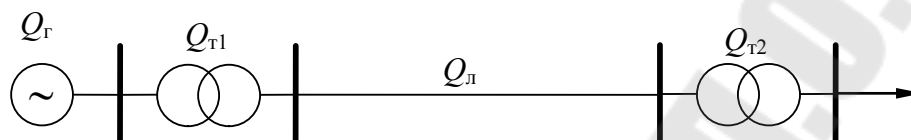


Рис. 1.2. Схема передачи электроэнергии

### Решение

Применяем теорему сложения вероятностей для совместных событий (см. задачу № 1.2):

$$\begin{aligned} Q_{\text{сх}} &= Q_G + Q_{T1} + Q_L + Q_{T2} - (Q_G \cdot Q_{T1} + Q_G \cdot Q_L + Q_G \cdot Q_{T2} + Q_{T1} \cdot Q_{T2} + \\ &+ Q_{T1} \cdot Q_L + Q_L \cdot Q_{T2}) + (Q_G \cdot Q_{T1} \cdot Q_L + Q_G \cdot Q_{T1} \cdot Q_{T2} + Q_L \cdot Q_{T2} \cdot Q_G + \\ &+ Q_L \cdot Q_{T2} \cdot Q_{T1}) - Q_G \cdot Q_{T1} \cdot Q_L \cdot Q_{T2} = \\ &= 0,05 + 0,1 + 2 \cdot 10^{-3} + 0,12 - (0,05 \cdot 0,1 + 0,05 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,05 \cdot 0,12 + \\ &+ 0,1 \cdot 0,12 + 0,12 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12) + (0,05 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,12 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 \cdot 0,05 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 \cdot 0,1) - \\ &- 0,05 \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 = 0,2491. \end{aligned}$$

### Задача № 1.4

Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.3, если  $Q_{L1} = 15 \cdot 10^{-3}$ ,  $Q_{L2} = 6 \cdot 10^{-3}$ .



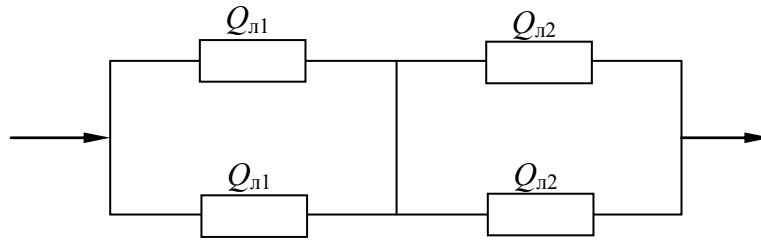


Рис. 1.3. Схема передачи электроэнергии

### Решение

Т. к. для групп из  $n$  параллельных элементов вероятность отказа:

$$Q_{\text{гр}} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i,$$

то в нашем случае:

$$Q_{\text{гр1}} = Q_{\text{л1}}^2 = (15 \cdot 10^{-3})^2 = 2,25 \cdot 10^{-4};$$

$$Q_{\text{гр2}} = Q_{\text{л2}}^2 = (6 \cdot 10^{-3})^2 = 3,6 \cdot 10^{-5}.$$

Вероятность безотказной работы группы:

$$P_{\text{гр1}} = 1 - Q_{\text{гр1}} = 1 - 2,25 \cdot 10^{-4} = 0,99977;$$

$$P_{\text{гр2}} = 1 - Q_{\text{гр2}} = 1 - 3,6 \cdot 10^{-5} = 0,99996.$$

На рис. 1.4 представлена исходная схема после преобразования.

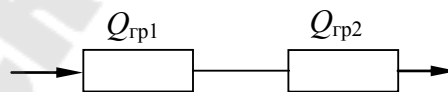


Рис. 1.4. Эквивалентная схема

По формуле (1.2):

$$P_{\text{сх}} = P_{\text{гр1}} \cdot P_{\text{гр2}} = 0,99977 \cdot 0,99996 = 0,99973.$$

Вероятность отказа схемы:

$$Q_{\text{сх}} = 1 - P_{\text{сх}} = 1 - 0,99973 = 2,7 \cdot 10^{-4}.$$

### Задача № 1.5

Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы для схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.5, если  $P_1 = 0,99$ ;  $P_2 = 0,96$ .

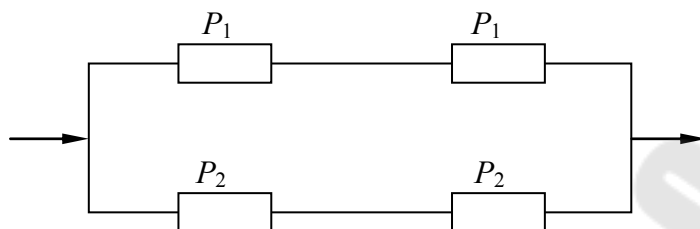


Рис. 1.5. Схема передачи электроэнергии

### Решение

В данном случае имеем сеть, состоящую из 2-х параллельных ветвей с двумя последовательными элементами, характеризующимися одинаковыми вероятностями безотказной работы  $P$ .

Вероятность безотказной работы ветви сети с двумя одинаковыми последовательными элементами:

$$P_{\hat{a}} = P^2, \text{ следовательно } P_{B1} = P_1^2 = 0,99^2 = 0,9801;$$

$$P_{B2} = P_2^2 = 0,96^2 = 0,9216.$$

На рис. 1.6 представлена исходная схема после преобразования.

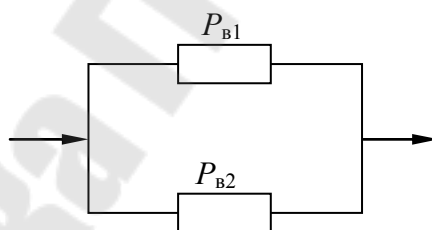


Рис. 1.6. Эквивалентная схема

Вероятность отказа ветви сети:

$$Q_{\hat{a}} = 1 - P_{\hat{a}};$$

$$Q_{B1} = 1 - 0,9801 = 0,0199;$$

$$Q_{B2} = 1 - 0,9216 = 0,0784.$$

Вероятность отказа схемы из двух параллельных ветвей:

$$Q_{\text{сх}} = \prod_{i=1}^2 Q_{\text{В}i} = \prod_{i=1}^2 Q_{\text{В}i} = Q_{\text{В}1} \cdot Q_{\text{В}2} = 0,0199 \cdot 0,0784 = 1,56 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{сх}} = 1 - Q_{\text{сх}} = 1 - 1,56 \cdot 10^{-3} = 0,9984.$$

### Задача № 1.6

Рассчитать параметры надёжности ( $Q_{\text{н}0}, P_{\text{н}0}$ ) для схемы, представленной на рис. 1.7. Вероятности безотказной работы элементов схемы  $P_1 = 0,97$ ;  $P_2 = 0,95$ .

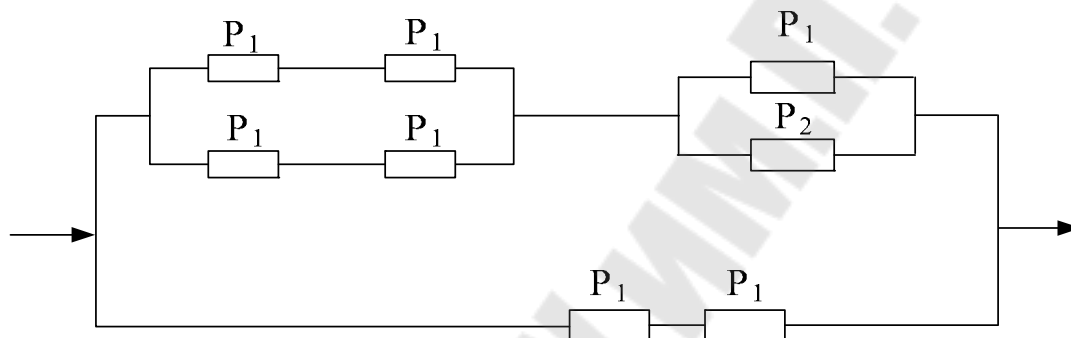


Рис. 1.7. Система передачи электроэнергии

### Решение

1. Схема сети для расчёта надёжности имеет смешанную последовательно-параллельную группировку. На рис. 1.8 дано деление этой сети на две подгруппы с выделением в первой из них двух блоков элементов (*а*, *б*). Подсхемы I и II соединены параллельно.

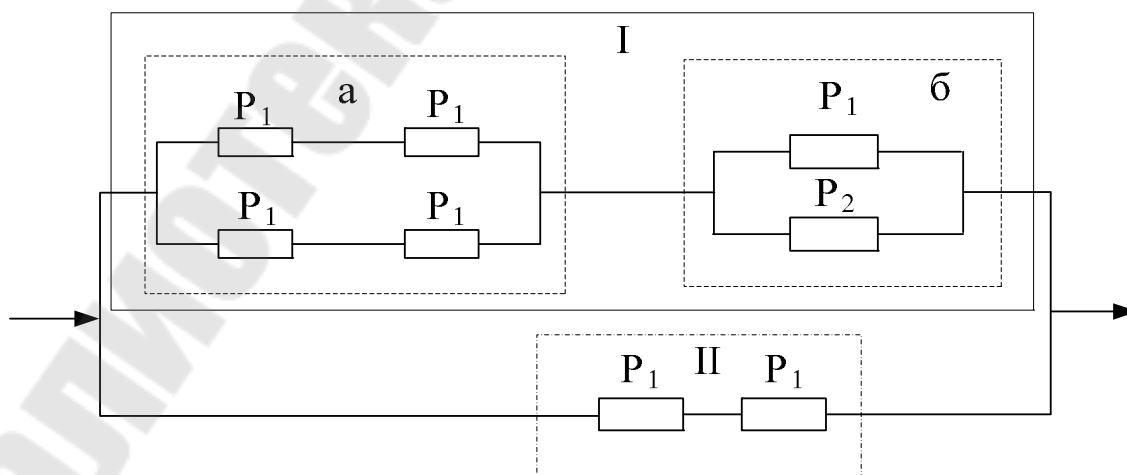


Рис. 1.8. Преобразование исходной схемы

2. Вероятность безотказной работы схемы составляет:

$$P_{\text{нб}} = 1 - (1 - P_I)(1 - P_{II}),$$

где  $P_I, P_{II}$  – вероятности безотказной работы подсхем I, II.

3. Рассмотрим режимы работы подсхем.

Вероятность безотказной работы подсхемы I:

$$P_I = P_a \cdot P_b.$$

Для блока "а":

$$P_a = 1 - (1 - P_1^2)^2 = 1 - (1 - 0,97^2)^2 = 0,9965;$$

для блока "б":

$$\begin{aligned} P_b &= 1 - Q_a = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) = \\ &= 1 - (1 - 0,97)(1 - 0,95) = 0,9985. \end{aligned}$$

Для подсхемы II вероятность безотказной работы:

$$P_{II} = P_1^2 = 0,97^2 = 0,9409.$$

Тогда

$$P_I = 0,9965 \cdot 0,9985 = 0,9950.$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{сх}} = 1 - (1 - 0,995)(1 - 0,9409) = 0,9997.$$

Вероятность отказа схемы:

$$Q_{\text{сх}} = 1 - P_{\text{сх}} = 1 - 0,9997 = 3 \cdot 10^{-4}.$$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 1.1-1.6 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Исходные данные для расчёта вероятности безотказной работы и вероятности отказа**

Вариант	$Q_a$	$Q_{\delta 1} = Q_{\delta}$	$Q_{\delta 2}$	$Q_{\epsilon 1} = Q_{\epsilon},$ $\times 10^{-3}$	$Q_{\epsilon 2},$ $\times 10^{-3}$	$P_1$	$P_2$
1	0,04	0,18	0,08	2,0	1,4	0,988	0,955
2	0,043	0,145	0,06	7,0	9,2	0,945	0,964

Вариант	$Q_{\bar{a}}$	$Q_{\delta 1} = Q_{\delta}$	$Q_{\delta 2}$	$Q_{\bar{e}1} = Q_{\bar{e}},$ $\times 10^{-3}$	$Q_{\bar{e}2},$ $\times 10^{-3}$	$P_1$	$P_2$
3	0,045	0,1	0,09	2,9	1,9	0,99	0,946
4	0,047	0,155	0,07	11,0	9,5	0,955	0,985
5	0,029	0,16	0,03	0,95	1,5	0,936	0,988
6	0,03	0,14	0,1	5,2	6,0	0,956	0,945
7	0,032	0,09	0,16	1,8	3,0	0,977	0,982
8	0,063	0,15	0,01	14,0	10,5	0,93	0,947
9	0,036	0,08	0,11	1,7	2,3	0,926	0,991
10	0,038	0,175	0,02	0,7	1,6	0,965	0,951
11	0,02	0,07	0,07	4,9	3,8	0,951	0,979
12	0,023	0,085	0,17	9,2	8,7	0,96	0,95
13	0,025	0,115	0,12	6,4	5,2	0,946	0,984
14	0,027	0,185	0,01	1,1	2,0	0,935	0,943
15	0,05	0,115	0,13	13,0	12,4	0,98	0,96
16	0,051	0,11	0,02	8,1	7,3	0,92	0,956
17	0,053	0,075	0,11	2,4	2,1	0,97	0,965
18	0,058	0,13	0,15	10,0	11,9	0,925	0,977
19	0,059	0,19	0,04	1,5	2,7	0,938	0,966
20	0,06	0,065	0,18	4,0	3,4	0,966	0,97
21	0,061	0,125	0,03	0,8	1,0	0,94	0,968
22	0,036	0,12	0,1	7,6	5,6	0,928	0,99
23	0,065	0,135	0,05	12,0	10,4	0,975	0,957
24	0,067	0,095	0,12	3,5	4,2	0,985	0,98
25	0,069	0,17	0,14	15,0	13,3	0,95	0,975

## 2 КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

### Теоретические сведения

В системах электроснабжения для нормального функционирования, повышения надёжности эксплуатации и создания оптимального резерва стремятся по возможности использовать однотипное оборудование [6]. Это оборудование может находиться в исключаящем друг друга состоянии (исправно или неисправно, включено или выключено и т. д.). Если система состоит из  $n$  элементов и вероятность отказа каждого элемента  $Q_i = Q$ , то система может находиться в следующих состояниях: нулевое состояние – все элементы в работе, первое состояние – один элемент не работает, второе – два и т.д. Попадание системы в одно из состояний соответствует схеме Бернулли и отвечает биномиальному распределению. Т. е. вероятность аварии  $k$  среди  $n$  элементов схемы

$$Q_{k,n} = C_n^k Q^k (1 - Q)^{n-k}, \quad (2.1)$$

где  $Q_{k,n}$  – вероятность снижения мощности, при выходе из строя  $k$  элементов;

$n$  – общее количество работающих элементов;

$k$  – количество элементов, вышедших из строя;

$Q$  – вероятность отказа элемента;

$C_n^k$  – число сочетаний из  $n$  элементов по  $k$ :

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (2.2)$$

### Задача № 2.1

Определить вероятность отключения различных значений мощности на подстанции, имеющей два одинаковых трансформатора (рис. 2.1). Вероятности отказа трансформаторов  $Q_{T1} = Q_{T2} = Q = 0,1$ .

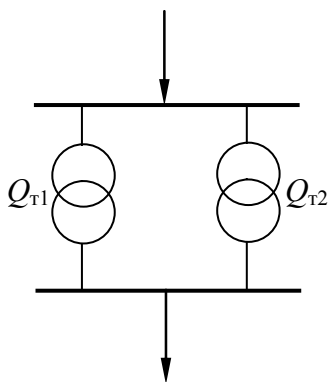


Рис. 2.1. Схема подстанции

### Решение

Общее число возможных комбинаций для  $n$  параллельных элементов составляет  $2^n$ . При величинах  $k = 0, 1, 2$  и  $n = 2$  необходимо рассмотреть следующие сочетания:

1) одновременная работа двух трансформаторов; вероятность этого события

$$P_{T1} \cdot P_{T2} = (1 - Q_{T1}) \cdot (1 - Q_{T2}) = (1 - Q)^2 = (1 - 0,1)^2 = 0,81$$

или по биномиальному закону

$$C_2^0 = \frac{2!}{0!(2-0)!} = 1;$$

$$Q_{0,2} = C_2^0 \cdot (1 - Q)^{2-0} \cdot Q^0 = 1 \cdot (1 - 0,15)^{2-0} \cdot 0,1^0 = 0,81;$$

2) отказ одного из двух трансформаторов (отключение T1 при работе T2 или отключение T2 при работе T1); вероятность такого события

$$\begin{aligned} Q_{T1} \cdot P_T + P_{T1} \cdot Q_{T2} &= Q_{T1} \cdot (1 - Q_{T2}) + (1 - Q_{T1}) \cdot Q_{T2} = 2 \cdot Q \cdot (1 - Q) = \\ &= 2 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,1) = 0,18 \end{aligned}$$

или по формулам (2.1), (2.2)

$$C_2^1 = \frac{2!}{1!(2-1)!} = 2;$$

$$Q_{1,2} = C_2^1 \cdot (1 - Q)^{2-1} \cdot Q^1 = 2 \cdot (1 - 0,1)^{2-1} \cdot 0,1^1 = 0,18;$$

3) одновременный отказ T1 и T2; вероятность этого события

$$Q_{\tau 1} \cdot Q_{\tau 2} = Q^2 = 0,1^2 = 0,01$$

или

$$C_2^2 = \frac{2!}{2!(2-2)!} = 1;$$

$$Q_{2,2} = C_2^2 \cdot (1-Q)^{2-2} \cdot Q^2 = 1 \cdot (1-0,1)^{2-2} \cdot 0,1^2 = 0,01.$$

### Задача № 2.2

Определить вероятность отключения различного количества электрических двигателей в системе, состоящей из 6 однотипных двигателей, подключенных к шинам через пускатель и предохранитель. Вероятность отказа двигателя  $Q_{ЭД} = 0,07$ , пускателя  $Q_{КМ} = 0,08$ , предохранителя  $Q_{FU} = 0,4 \cdot 10^{-2}$ .

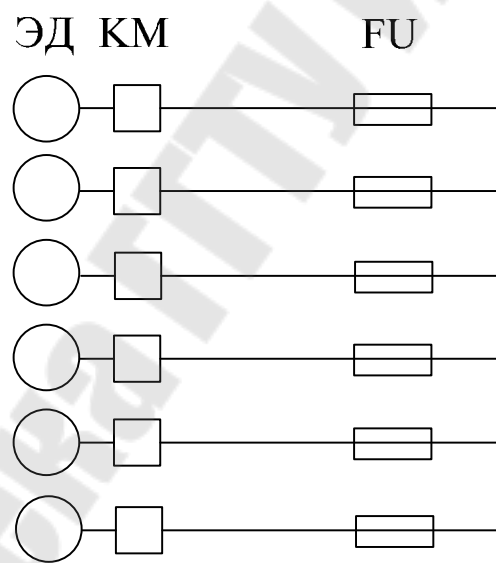


Рис. 2.2. Схема электроснабжения

### Решение

1. Определяем вероятность отказа блока, состоящего из группы последовательно соединенных элементов (рис. 2.3): двигателя, пускателя, предохранителя:



$$Q_{\text{бл}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) = 1 - (1 - Q_{\text{ЭД}})(1 - Q_{\text{КМ}})(1 - Q_{\text{FU}}) =$$

$$= 1 - (1 - 0,07)(1 - 0,08) (1 - 0,4 \cdot 10^{-2}) = 0,1478.$$

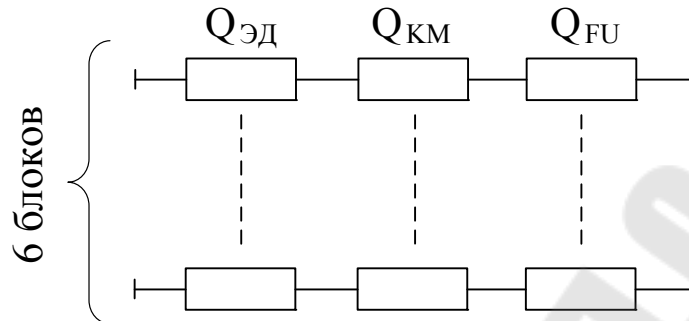


Рис. 2.3. Схема для расчёта надёжности

2. Вероятность безотказной работы блока:

$$P_{\text{бл}} = 1 - Q_{\text{бл}} = 1 - 0,1478 = 0,8522.$$

3. Определяем вероятность отключения блоков, работающих параллельно. Вероятность аварии  $k$  блоков из  $n$ , работающих параллельно определяем по формуле (2.1):

$$Q_{k,n} = C_n^k Q^k (1 - Q)^{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot Q^k (1 - Q)^{n-k}.$$

Расчёты сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

### Результаты расчёта

№ режима	Количество блоков в аварии	Количество комбинаций $C_n^k$	Вероятность аварии $k$ энергоблоков из $n$ $Q_{k,n}$
1	0	$C_6^0 = \frac{6!}{0!(6-0)!} = 1$	$Q_{0,6} = 1 \cdot Q^0 (1 - Q)^{6-0} =$ $= (1 - 0,1478)^6 = 0,3830$
2	1	$C_6^1 = \frac{6!}{1!(6-1)!} = 6$	$Q_{1,6} = 6 \cdot Q^1 (1 - Q)^{6-1} =$ $= 6 \cdot 0,1478 \cdot (1 - 0,1478)^5 = 0,3986$
3	2	$C_6^2 = \frac{6!}{2!(6-2)!} = 15$	$Q_{2,6} = 15 \cdot Q^2 (1 - Q)^{6-2} =$ $= 15 \cdot 0,1478^2 \cdot (1 - 0,1478)^4 = 0,1728$
4	3	$C_6^3 = \frac{6!}{3!(6-3)!} = 20$	$Q_{3,6} = 20 \cdot Q^3 (1 - Q)^{6-3} =$ $= 20 \cdot 0,1478^3 \cdot (1 - 0,1478)^3 = 0,0399$

№ режима	Количество блоков в аварии	Количество комбинаций $C_n^k$	Вероятность аварии $k$ энергоблоков из $n$ $Q_{k,n}$
5	4	$C_6^4 = \frac{6!}{4!(6-4)!} = 15$	$Q_{4,6} = 15 \cdot Q^4 (1-Q)^{6-4} =$ $= 15 \cdot 0,1478^4 \cdot (1 - 0,1478)^2 = 0,0052$
6	5	$C_6^5 = \frac{6!}{5!(6-5)!} = 6$	$Q_{5,6} = 6 \cdot Q^5 (1-Q)^{6-5} =$ $= 6 \cdot 0,1478^5 \cdot (1 - 0,1478)^1 = 0,00036$
7	6	$C_6^6 = \frac{6!}{6!(6-6)!} = 1$	$Q_{6,6} = 1 \cdot Q^6 (1-Q)^{6-6} =$ $= 1 \cdot 0,1478^6 \cdot (1 - 0,1478)^0 = 0,00001$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 2.1-2.2 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 2.2. Задачу № 2.2 решить, приняв количество блоков равным 8.

Таблица 2.2

### Исходные данные для расчёта вероятности безотказной работы и вероятности отказа

Вариант	$Q_{ЭД}$	$Q_{КМ}$	$Q_{FU} \cdot$ $\times 10^{-2}$
1	0,09	0,1	0,5
2	0,02	0,03	0,1
3	0,05	0,06	0,6
4	0,04	0,05	0,4
5	0,08	0,09	0,2
6	0,06	0,07	0,7
7	0,07	0,08	0,3
8	0,02	0,03	0,1
9	0,04	0,05	0,6
10	0,05	0,06	0,2
11	0,07	0,08	0,5
12	0,06	0,07	0,4
13	0,02	0,03	0,8
14	0,08	0,09	0,3
15	0,09	0,01	0,9

Вариант	$Q_{ЭД}$	$Q_{КМ}$	$Q_{FU},$ $\times 10^{-2}$
16	0,03	0,04	0,5
17	0,04	0,05	0,1
18	0,02	0,03	0,3
19	0,06	0,07	0,6
20	0,05	0,06	0,7
21	0,03	0,04	0,2
22	0,07	0,08	0,9
23	0,08	0,09	0,8
24	0,04	0,05	0,1
25	0,05	0,06	0,4

### 3 РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

#### Теоретические сведения

#### *Надёжность структур с последовательным соединением элементов*

Параметр потока отказов структуры:

$$\omega_c = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (3.1)$$

где  $\omega_i$  – параметр потока отказов  $i$ -го элемента структуры.

Среднее время восстановления структуры:

$$T_{вс} = \frac{1}{\omega_c} \sum_{i=1}^n \omega_i T_{вi}, \quad (3.2)$$

где  $T_{вi}$  – среднее время восстановления  $i$ -го элемента структуры.

#### *Учёт преднамеренных отключений для структур с последовательным соединением элементов*

Если преднамеренные отключения считать независимыми событиями, то частота преднамеренных отключений, как и частота отказов, соответствует сумме частот преднамеренных отключений [3]

$$\omega_{Пс} = \sum_{i=1}^n \omega_{Пi}, \quad (3.3)$$

при среднем времени обслуживания (преднамеренного отключения)

$$T_{Пс} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{Пi} T_{Пi}}{\omega_{Пс}}, \quad (3.4)$$

где  $\omega_{Пi}$ ,  $T_{Пi}$  – показатели преднамеренных отключений  $i$ -го элемента.

Однако при ремонте электрооборудования обычно отключаются несколько взаимосвязанных элементов (например, ЛЭП и понижающая подстанция, питающаяся по данной линии, трансформатор и шины распределительного устройства). Это означает, что суммарная частота преднамеренных отключений цепочки меньше суммы частот отключений отдельных элементов.

Один из элементов цепочки, который чаще отключается, назовём базовым, а относительную частоту преднамеренных отключений остальных элементов по отношению к базовому – коэффициентом совпадения. Статистически

$$g_{i/\delta} = \frac{m_{i/\delta}(t)}{M_i(t)}, \quad (3.5)$$

где  $m_{i/\delta}(t)$  – число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента, произведенных совместно с преднамеренными отключениями базового элемента за период  $t$ ;

$M_i$  – общее число преднамеренных отключений  $i$ -го элемента.

С учётом коэффициента совпадения формулы для определения показателей преднамеренных отключений цепочки последовательных элементов принимают вид:

для частоты преднамеренных отключений

$$\omega_{\text{Пс}} = \omega_{\text{Пб}} + \sum_{i=1, i \neq \delta}^n \omega_{\text{Пи}} \cdot (1 - g_{i/\delta}), \quad (3.6)$$

среднего времени преднамеренных отключений

$$T_{\text{Пс}} = (\omega_{\text{Пс}})^{-1} \cdot [\omega_{\text{Пб}} \cdot T_{i/\delta} + \omega_{\text{П(max)}} \cdot (T_{\text{П(max)}} - T_{\text{Пб}}) + \sum_{i=1, i \neq \delta}^n \omega_{\text{Пи}} \cdot T_{\text{Пи}} \cdot (1 - g_{i/\delta})], \quad (3.7)$$

где  $\omega_{\text{Пб}}, T_{\text{Пб}}$  – частота преднамеренных отключений и среднее время преднамеренного отключения базового элемента;

$\omega_{\Pi(\max)}, T_{\Pi(\max)}$  – то же для элемента цепочки, у которого максимальное время обслуживания;

$n$  – число элементов в цепочке.

Формулами (3.6) и (3.7) пользуются, когда система не эквивалентирована. После эквивалентирования элементов преднамеренные отключения считаются независимыми событиями и применяются формулы (3.3), (3.4).

### **Надёжность структур с параллельным соединением элементов**

Для  $m$  параллельно соединённых элементов параметр потока отказов цепи:

$$\omega_c^{(m)} = \left( \prod_{j=1}^m \omega_j \cdot T_{Bj} \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^m T_{Bj}^{-1} \right); \quad (3.8)$$

среднее время восстановления структуры:

$$T_{Bc}^{(m)} = \left( \sum_{j=1}^m T_{Bj}^{-1} \right)^{-1}. \quad (3.9)$$

Для структуры, состоящей из двух параллельно соединённых элементов 1 и 2, параметр потока отказов

$$\omega_c^{(2)} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (T_{B1} + T_{B2}) \quad (3.10)$$

или

$$\omega_c^{(2)} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \frac{(T_{B1} + T_{B2})}{8760}, \quad (3.11)$$

среднее время восстановления

$$T_{Bc}^{(2)} = T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot (T_{B1} + T_{B2})^{-1}. \quad (3.12)$$

### **Задача № 3.1**

Система передачи электроэнергии, представленная на рис. 3.1, состоит из следующих элементов: трансформатора Т1, линии элек-

тропередачи Л, длиной 12 км, трансформатора Т2, отказы которых независимы.

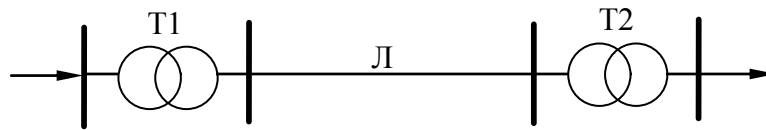


Рис. 3.1. Схема системы передачи электроэнергии

Параметры потока отказов элементов и средние времена их восстановления приведены в табл. 3.1.

Таблица 4.1

**Показатели надёжности элементов сети**

Показатель надёжности	Элемент сети		
	Т1	Л	Т2
$\omega$ , 1/год	0,01	0,1*	0,02
$T_{\hat{a}}$ , ч	150	6	40

\* – удельный параметр потока отказов линии  $\omega_0, 1/(\text{км} \cdot \text{год})$

Определить параметр потока отказов системы, среднее время её восстановления и среднюю вероятность отказа системы.

**Решение**

1. Параметр потока отказов линии электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{\text{л}} = \omega_0 \cdot l = 0,1 \cdot 12 = 1,2 \text{ 1/год.}$$

2. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами

$$\omega_{\text{с}} = \sum_{i=1}^3 \omega_i = \omega_{\text{Т1}} + \omega_{\text{л}} + \omega_{\text{Т2}} = 0,01 + 1,2 + 0,02 = 1,23 \text{ 1/год.}$$

3. Среднее время восстановления системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned} \dot{O}_{\text{Вс}} &= \frac{\omega_{\text{Т1}} \dot{O}_{\text{ВТ1}} + \omega_{\text{л}} \dot{O}_{\text{Вл}} + \omega_{\text{Т2}} \dot{O}_{\text{ВТ2}}}{\omega_{\text{с}}} = \\ &= \frac{(0,01 \cdot 150 + 1,2 \cdot 6 + 0,02 \cdot 40)}{1,23} = 7,72 \text{ ч.} \end{aligned}$$

#### 4. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{\text{вс}}}{8760} = \frac{1,23 \cdot 7,72}{8760} = 1,08 \cdot 10^{-3}.$$

#### Задача № 3.2

Потребитель получает электроэнергию по линиям электропередачи Л1 и Л2, отказы которых независимы. Каждая линия пропускает всю необходимую потребителю мощность. Длина линий составляет  $l_1 = 30$  км,  $l_2 = 28$  км.

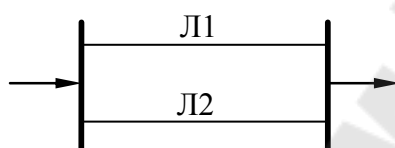


Рис. 3.2. Схема системы передачи электроэнергии

Удельные параметры потока отказов линий и средние времена их восстановления приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

#### Показатели надёжности

Показатель надёжности	Элемент сети	
	Л1	Л2
$\omega_0$ , 1/(км · год)	0,04	0,03
$T_{\hat{a}}$ , ч	12	10

Определить параметр потока отказов системы, среднее время её восстановления и среднюю вероятность отказа системы.



### Решение

1. Параметры потока отказов линий электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{л1} = \omega_{01} \cdot l_1 = 0,04 \cdot 30 = 1,2 \text{ 1/год};$$

$$\omega_{л2} = \omega_{02} \cdot l_2 = 0,03 \cdot 28 = 0,84 \text{ 1/год}.$$

2. Параметр потока отказов системы с двумя параллельно соединенными элементами

$$\omega_c = \omega_{л1} \cdot \omega_{л2} \cdot \left( \frac{\dot{O}_{Вл1} + \dot{O}_{Вл2}}{8760} \right) = 1,2 \cdot 0,84 \cdot \left( \frac{12 + 10}{8760} \right) = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}.$$

3. Среднее время восстановления системы с двумя параллельно соединенными элементами

$$T_{Вс} = \frac{T_{Вл1} \cdot T_{Вл2}}{T_{Вл1} + T_{Вл2}} = \frac{12 \cdot 10}{12 + 10} = 5,45 \text{ ч}.$$

4. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{Вс}}{8760} = \frac{2,53 \cdot 10^{-3} \cdot 5,45}{8760} = 1,57 \cdot 10^{-6}.$$

### Задача № 3.3

Определить показатели надёжности участка электрической сети, представленного на рис. 3.3, с учётом преднамеренных отключений. За базовый элемент принята ВЛ 110 кВ. Показатели надёжности элементов, коэффициенты совпадения приведены в табл. 3.3. Длина ВЛ 110 кВ составляет 32 км.

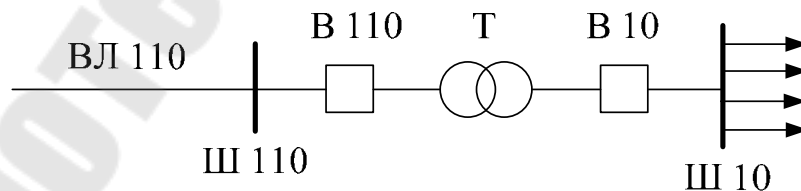


Рис. 3.3. Схема участка электрической сети

## Исходные данные

Элемент	$\omega$ , 1/год	$T_{\text{а}}$ , ч	$\omega_{\text{г}}$ , 1/год	$T_{\text{г}}$ , ч	g
ВЛ 110	0,08*	6	2	6,5	1
Ш 110	0,001**	4	0,1	5	0,6
В 110	0,02	5,5	0,2	5	0,8
Т	0,03	25	0,3	10	0,6
В 10	0,015	5	0,15	4	0,75
Ш 10	0,001**	3,5	0,12	4	0,75

\* – удельный параметр потока отказов линии  $\omega_0$ , 1/(км·год);

\*\* – на одно присоединение.

## Решение

1. Составляем схему замещения для расчёта надёжности – см. рис. 3.4.

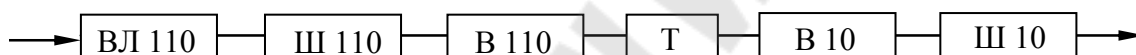


Рис. 3.4. Схема замещения

2. Параметр потока отказов линии электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{\text{вл}}^{110} = \omega_0 \cdot l = 0,08 \cdot 32 = 2,56 \text{ 1/год.}$$

Параметр потока отказов шин 110 кВ с учетом количества присоединений –  $\omega_{\text{ш}}^{110} = 0,001 \cdot 2 = 0,002$ ;

шин 10 кВ –  $\omega_{\text{ш}}^{10} = 0,001 \cdot 5 = 0,005$ .

3. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned} \omega_{\text{с}} &= \omega_{\text{вл}}^{110} + \omega_{\text{ш}}^{110} + \omega_{\text{в}}^{110} + \omega_{\text{т}} + \omega_{\text{в}}^{10} + \omega_{\text{ш}}^{10} = \\ &= 2,56 + 0,002 + 0,02 + 0,03 + 0,015 + 0,005 = 2,632 \text{ 1/год.} \end{aligned}$$

4. Среднее время восстановления системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned}
 T_{\text{Вс}} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \omega_i T_{\text{В}i}}{\omega_c} = \\
 &= \frac{(2,56 \cdot 6 + 0,002 \cdot 4 + 0,02 \cdot 5,5 + 0,03 \cdot 25 + 0,015 \cdot 5 + 0,005 \cdot 3,5)}{2,632} = \\
 &= 6,2 \text{ ч.}
 \end{aligned}$$

5. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{\text{Вс}}}{8760} = \frac{2,632 \cdot 6,2}{8760} = 1,86 \cdot 10^{-3}.$$

6. Частота преднамеренных отключений с учётом коэффициента совпадения и базового элемента ВЛ 110 кВ по формуле (3.6)

$$\begin{aligned}
 \omega_{\text{Пс}} &= \omega_{\text{Пб}} + \sum_{i=1, i \neq 6}^6 \omega_{\text{П}i} \cdot (1 - g_{i/6}) = 2,0 + [0,1 \cdot (1 - 0,6) + 0,2 \cdot (1 - 0,8) + \\
 &+ 0,3 \cdot (1 - 0,6) + 0,15 \cdot (1 - 0,75) + 0,12 \cdot (1 - 0,75)] = 2,268 \text{ 1/год.}
 \end{aligned}$$

7. Среднее время преднамеренных отключений по формуле (3.7)

$$\begin{aligned}
 T_{\text{Пс}} &= (\omega_{\text{Пс}})^{-1} \cdot [\omega_{\text{Пб}} \cdot T_{\text{Пб}} + \omega_{\text{П(max)}} \cdot (T_{\text{П(max)}} - T_{\text{Пб}}) + \sum_{i=1, i \neq 6}^n \omega_{\text{П}i} \cdot T_{\text{П}i} \cdot (1 - g_{i/6})] = \\
 &= \frac{1}{2,268} \cdot [2 \cdot 6,5 + 0,3 \cdot (10 - 6,5) + 0,1 \cdot 5 \cdot (1 - 0,6) + 0,2 \cdot 5 \cdot (1 - 0,8) + \\
 &+ 0,3 \cdot 10 \cdot (1 - 0,6) + 0,15 \cdot 4 \cdot (1 - 0,75) + 0,12 \cdot 4 \cdot (1 - 0,75)] = 7,02 \text{ ч.}
 \end{aligned}$$

Если бы не учитывали взаимного влияния преднамеренных отключений, то по формулам (3.3), (3.4) получили бы следующие показатели надёжности

$$\begin{aligned}
 \omega_{\text{Пс}} &= \sum_{i=1}^6 \omega_{\text{П}i} = 2,0 + 0,1 + 0,2 + 0,3 + 0,15 + 0,12 = 2,87 \text{ 1/год;} \\
 T_{\text{Пс}} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \omega_{\text{П}i} T_{\text{П}i}}{\omega_{\text{Пс}}} = \\
 &= \frac{(2 \cdot 6,5 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 10 + 0,15 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4)}{2,87} = 6,47 \text{ ч.}
 \end{aligned}$$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи № 3.1-3.2 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 3.4. Принять  $l = l_1$ ,  $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_{0l}$ .

Таблица 3.4

## Исходные данные для расчёта показателей надёжности схем электроснабжения

Вариант	$\omega_{Т1},$ 1/ГОД	$\omega_{0Л},$ 1/(КМ · ГОД)	$l_1,$ КМ	$l_2,$ КМ	$\omega_{Т2},$ 1/ГОД	$T_{ВТ1},$ Ч	$T_{ВЛ},$ Ч	$T_{ВТ2},$ Ч	$T_{ВЛ1},$ Ч	$T_{ВЛ2},$ Ч
1	0,019	0,009	25	23	0,020	90	6	45	6	8
2	0,017	0,005	21	20	0,018	130	11	20	11	13
3	0,015	0,013	32	30	0,017	165	9	95	9	11
4	0,021	0,045	13	12	0,023	100	5,5	40	5,5	7
5	0,018	0,020	10	11	0,025	140	7	85	7	6
6	0,025	0,01	27	25	0,026	200	7,5	70	7,5	6,5
7	0,016	0,017	33	34	0,018	170	12	25	12	11,5
8	0,023	0,035	22	20	0,019	115	8	10	8	7
9	0,020	0,006	26	23	0,021	120	9,5	60	9,5	9
10	0,022	0,027	11	12	0,023	135	5	80	5	6
11	0,021	0,012	16	18	0,015	185	6,5	55	6,5	7,5
12	0,015	0,040	29	28	0,023	175	7	35	7	8
13	0,017	0,018	30	31	0,025	120	10	65	10	9
14	0,019	0,025	14	16	0,021	155	11	95	11	12
15	0,022	0,029	28	26	0,019	140	6	15	6	6,5
16	0,016	0,007	23	21	0,017	145	9	75	9	9,5
17	0,018	0,021	12	14	0,022	105	8	30	8	7,5
18	0,021	0,034	18	19	0,016	190	11,5	50	11,5	11

Вари- ант	$\omega_{Т1},$ 1/ГОД	$\omega_{0л},$ 1/(км · ГОД)	$l_1,$ км	$l_2,$ км	$\omega_{Т2},$ 1/ГОД	$T_{ВТ1},$ ч	$T_{Вл},$ ч	$T_{ВТ2},$ ч	$T_{Вл1},$ ч	$T_{Вл2},$ ч
19	0,025	0,016	20	17	0,018	150	10,5	95	10,5	9
20	0,022	0,030	15	16	0,020	110	9	70	9	11
21	0,017	0,036	19	22	0,016	125	10	25	10	8
22	0,019	0,011	31	33	0,018	95	8,5	60	8,5	10
23	0,021	0,008	24	25	0,022	180	5	85	5	6
24	0,023	0,022	9	10	0,015	160	7,5	100	7,5	7
25	0,025	0,015	17	15	0,019	195	11,5	55	11,5	12

## 4 СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ

### Задача № 4.1

На рис. 4.1 представлена схема электрической сети. Определить параметр потока отказов схемы, среднее время её восстановления, среднюю вероятность отказа (без учёта преднамеренных отключений).

Удельный параметр потока отказов для всех линий  $\omega_{0i} = 0,02$  1/(км·год); среднее время восстановления –  $T_{vi} = 18$  ч; длины линий  $l_1 = 400$  км,  $l_2 = 350$  км,  $l_3 = 180$  км,  $l_4 = 210$  км,  $l_5 = 230$  км.

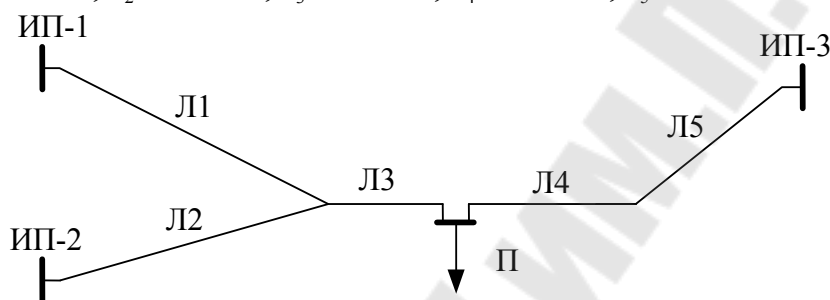


Рис. 4.1. Схема электрической сети  
ИП – источник питания; Л – линия; П – потребитель

### Решение

1. Составляем структурную схему электрической сети, объединив источники питания и заменив линии блоками, связанными между собой (рис. 4.2, а). Последовательность преобразований исходной схемы представлена на рис. 4.2, б, в, г [7, 2].

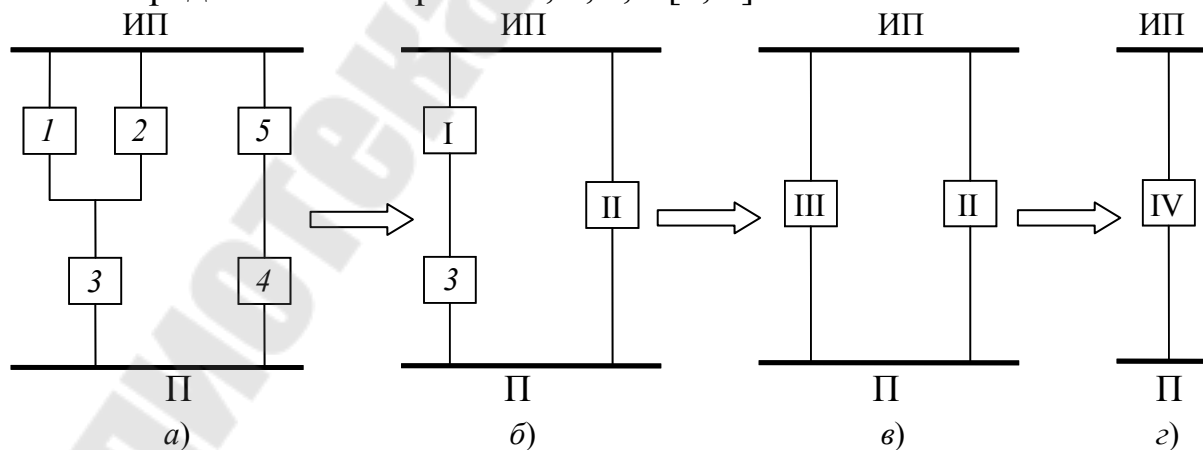


Рис. 4.2. Структурная схема электрической сети (а) и этапы её преобразования (б, в, г)

1. Параметры потока отказов линий электропередачи протяженностью  $l$ :

$$\omega_i = \omega_{0i} \cdot l;$$

$$\omega_1 = 0,02 \cdot 400 = 8 \text{ 1/год};$$

$$\omega_2 = 0,02 \cdot 350 = 7 \text{ 1/год};$$

$$\omega_3 = 0,02 \cdot 180 = 3,6 \text{ 1/год};$$

$$\omega_4 = 0,02 \cdot 210 = 4,2 \text{ 1/год};$$

$$\omega_5 = 0,02 \cdot 230 = 4,6 \text{ 1/год};$$

2. Находим показатели надёжности блока I, эквивалентного параллельно включенным блокам 1 и 2 (рис. 4.2, а, б):

$$\omega_1 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \left( \frac{T_{B1} + T_{B2}}{8760} \right) = 8 \cdot 7 \cdot \left( \frac{18 + 18}{8760} \right) = 0,23 \text{ 1/год}.$$

$$T_{B1} = \frac{T_{B1} \cdot T_{B2}}{T_{B1} + T_{B2}} = \frac{18 \cdot 18}{18 + 18} = 9 \text{ ч};$$

$$Q_1 = \frac{\omega_1 \cdot T_{B1}}{8760} = \frac{0,23 \cdot 9}{8760} = 2,36 \cdot 10^{-4}.$$

3. Находим показатели надёжности блока II (последовательное соединение блоков 5 и 4 – рис. 4.2, а, б):

$$\omega_{II} = \sum_{i=1}^2 \omega_i = \omega_5 + \omega_4 = 4,6 + 4,2 = 8,8 \text{ 1/год},$$

$$T_{BII} = \frac{\omega_5 T_{B5} + \omega_4 T_{B4}}{\omega_{II}} = \frac{(4,6 \cdot 18 + 4,2 \cdot 18)}{8,8} = 18 \text{ ч}.$$

$$Q_{II} = \frac{\omega_{II} \cdot T_{BII}}{8760} = \frac{8,8 \cdot 18}{8760} = 1,81 \cdot 10^{-2}.$$

4. Находим показатели надёжности блока III (последовательное соединение блоков I и 3 – рис. 4.2, б, в):

$$\omega_{III} = \omega_1 + \omega_3 = 0,23 + 3,6 = 3,83 \text{ 1/год}.$$

$$T_{BIII} = \frac{\omega_1 T_{B1} + \omega_3 T_{B3}}{\omega_{III}} = \frac{(0,23 \cdot 9 + 3,6 \cdot 18)}{3,83} = 17,46 \text{ ч}.$$

$$Q_{III} = \frac{\omega_{III} \cdot T_{BIII}}{8760} = \frac{3,83 \cdot 17,46}{8760} = 7,63 \cdot 10^{-3}.$$

5. Находим показатели надёжности схемы, т.е. блока IV (параллельное соединение блоков III и II – рис. 4.2, в, г):



$$\omega_c = \omega_{IV} = \omega_{III} \cdot \omega_{II} \cdot \left( \frac{T_{VIII} + T_{VII}}{8760} \right) = 3,83 \cdot 8,8 \cdot \left( \frac{17,46 + 18}{8760} \right) = 0,136 \text{ 1/год};$$

$$T_{bc} = T_{BIV} = \frac{T_{VIII} \cdot T_{VII}}{T_{VIII} + T_{VII}} = \frac{17,46 \cdot 18}{17,46 + 18} = 8,86 \text{ ч};$$

$$Q_c = Q_{IV} = \frac{\omega_{IV} \cdot T_{BIV}}{8760} = \frac{0,136 \cdot 8,86}{8760} = 1,38 \cdot 10^{-4}.$$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачу № 4.1 самостоятельно. Исходные данные по вариантам: удельный параметр потока отказов для вариантов 1-12  $\omega_{0i} = 0,02 \text{ 1/(км} \cdot \text{год)}$ ; для вариантов 13-25  $\omega_{0i} = 0,03 \text{ 1/(км} \cdot \text{год)}$ ; среднее время восстановления для вариантов 1-12 –  $T_{vi} = 19 \text{ ч}$ ; для вариантов 13-25 –  $T_{vi} = 21 \text{ ч}$ ; длины линий по вариантам представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Длины линий, км

Вариант	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5
1	20	30	15	21	25
2	45	56	38	40	30
3	21	31	17	20	22
4	48	45	35	41	37
5	35	30	25	26	17
6	51	49	40	48	35
7	44	40	37	34	26
8	25	28	20	18	23
9	54	50	44	35	30
10	27	22	25	18	20
11	60	54	58	46	40
12	40	35	41	24	16
13	32	36	30	35	29
14	53	47	50	38	33
15	61	60	55	50	43
16	43	40	33	30	24
17	37	39	36	38	32
18	30	25	27	24	20

<b>Вариант</b>	<b>Л1</b>	<b>Л2</b>	<b>Л3</b>	<b>Л4</b>	<b>Л5</b>
19	47	45	44	40	35
20	50	55	45	48	41
21	22	20	18	15	14
22	38	34	21	35	20
23	62	60	50	45	28
24	33	40	30	25	21
25	55	51	48	50	40

## 5 СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### Теоретические сведения

Статистическая оценка вероятности безотказной работы  $P(t)$

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (5.1)$$

где  $N_0$  – первоначальное количество элементов для испытания или эксплуатируемых;

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

Статистическая оценка вероятности отказа  $Q(t)$ :

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (5.2)$$

Статистическая оценка частоты отказов  $a(t)$ :

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (5.3)$$

где  $N_0$  – общее количество элементов взятых для испытания или эксплуатируемых;

$n(\Delta t)$  – число отказавших элементов в интервале времени от  $t$  до  $(t+\Delta t)$ ;

$\Delta t$  – интервал времени.

Статистическая оценка интенсивности отказов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \quad (5.4)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени;

$n(\Delta t)$  – число элементов отказавших в интервале  $\Delta t$ ;

$N(t)$  – число элементов, исправно работающих к началу промежутка времени.

**Разница между величинами  $a(t)$  и  $\lambda(t)$ :** показатель  $a(t)$  характеризует вероятность отказа за интервал времени  $(t, t+\Delta t)$ , элемента, взятого произвольным образом из группы элементов, причём неизвестно в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится выбранный элемент. Показатель  $\lambda(t)$  характеризует вероятность отказа за интервал  $(t, t+\Delta t)$  элемента, взятого из группы элементов, которые остались работоспособными моменту времени  $t$ .

Статистическая оценка средней наработки до отказа определяется из выражения:

$$T^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (5.5)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го элемента СЭС;

$N_0$  – общее число элементов взятых для испытания.

**Коэффициент готовности  $K_{\Gamma}$**  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение его по назначению не предусмотрено:

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B}. \quad (5.6)$$

Статистическая оценка коэффициента  $\hat{E}_{\bar{a}}$ :

$$K_{\Gamma}^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\hat{a}i}}, \quad (5.7)$$

где  $t_i$  – время безотказной работы объекта (элемента) СЭС;

$t_{\hat{a}i}$  – время восстановления элемента СЭС;

$m$  – число отказов объекта (элемента) СЭС.

**Коэффициент неготовности (вынужденного простоя)  $K_H$**  – вероятность того, что в произвольный момент времени объект окажется в неработоспособном состоянии:

$$K_H = \frac{T_B}{T + T_B}. \quad (5.8)$$

Статистическая оценка  $K_H$ :

$$K_H^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_{Bi}}{\sum_{i=1}^m t_{Bi} + \sum_{i=1}^m t_i}. \quad (5.9)$$

Всегда имеет место равенство:

$$K_G + K_H = 1. \quad (5.10)$$

**Коэффициент оперативной готовности  $K_{OG}(t, \tau)$**  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени  $t$  и, начиная с этого момента времени, безотказно проработает в течение заданного интервала времени  $\tau$  ( $t, t + \tau$ ).

Вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии в произвольный момент времени характеризуется коэффициентом готовности, а работоспособность в течение заданного интервала времени – вероятностью безотказной работы. Следовательно

$$K_{OG}(t, \tau) = K_G(t) \cdot P(\tau). \quad (5.11)$$

**Коэффициент технического использования  $K_{ТИ}$**  характеризует те же свойства, что и коэффициент готовности, но учитывает дополнительно предупредительные ремонты и представляет собой отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспо-

собном состоянии, времени простоев, обусловленном техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T}{T + T_{\text{в}} + T_{\text{о}}}, \quad (5.12)$$

где  $\dot{O}_0$  – среднее время обслуживания, то есть среднее время нахождения элемента в отключенном состоянии для производства планово-предупредительных ремонтов (профилактики).

### Задача № 5.1

На испытания поставлено  $N_0 = 100$  элементов. Испытания проводились в течение  $t = 200$  ч. В процессе проведения испытаний отказало  $n = 5$  элементов, при этом отказы зафиксированы в следующие моменты:  $T_1 = 60$  ч,  $T_2 = 80$  ч,  $T_3 = 90$  ч,  $T_4 = 120$  ч,  $T_5 = 160$  ч. Остальные элементы не отказали. Определить среднюю наработку до отказа.

### Решение

Средняя наработка до отказа составит

$$T = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n + (N_0 - n) \cdot t}{N_0},$$

где  $n$  – число отказавших элементов;

$N_0$  – число элементов, поставленных на испытания;

$T_i$  – время наработки до отказа каждого элемента.

В нашем случае

$$T = \frac{60 + 80 + 90 + 120 + 160 + (100 - 5) \cdot 200}{100} = 194,2 \text{ ч.}$$

### Задача № 5.2

Построить кривую интенсивности отказов по данным табл. 5.1. На испытания поставлено  $N_0 = 200$  элементов, испытания проводились в течение  $t = 100$  ÷.

Таблица 5.1

**Исходные данные**

Интервал времени $\Delta_t$ , ч	Число отказавших элементов $n(t)$	Интервал времени $\Delta_t$ , ч	Число отказавших элементов $n(t)$
0-10	10	50-60	2
10-20	8	60-70	2
20-30	6	70-80	4
30-40	4	80-90	5
40-50	2	90-100	8

**Решение**

Интенсивность отказов со статистической точки зрения по формуле (5.4):

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}.$$

Для первого интервала (0-10) ч число отказавших элементов  $n(\Delta t_1) = 10$ , число элементов, исправно работающих к началу промежутка времени  $N(0) = 200$ , тогда

$$\lambda^*(10) = \frac{10}{200 \cdot 10} = 0,005.$$

Для второго интервала (10-20) ч число отказавших элементов  $n(\Delta t_2) = 8$ , число элементов, исправно работающих к началу промежутка времени  $N(10) = 200 - 10 = 190$ , тогда

$$\lambda^*(20) = \frac{8}{190 \cdot 10} = 0,0042.$$

Результаты расчёта сведены в табл. 5.2.

Результаты расчёта  $\lambda(t)$ 

$\Delta t, \text{ч}$	$\Delta t, \text{ч}$	$n(\Delta t)$	$N(t)$	$\lambda(t), \text{откл./ч}$
0-10	10	10	200	0,0050
10-20	10	8	190	0,0042
20-30	10	6	182	0,0033
30-40	10	4	176	0,0023
40-50	10	2	172	0,0012
50-60	10	2	170	0,0012
60-70	10	2	168	0,0012
70-80	10	4	166	0,0024
80-90	10	5	162	0,0031
90-100	10	8	157	0,0051

Зависимость  $\lambda(t)$  представлена на рис. 5.2

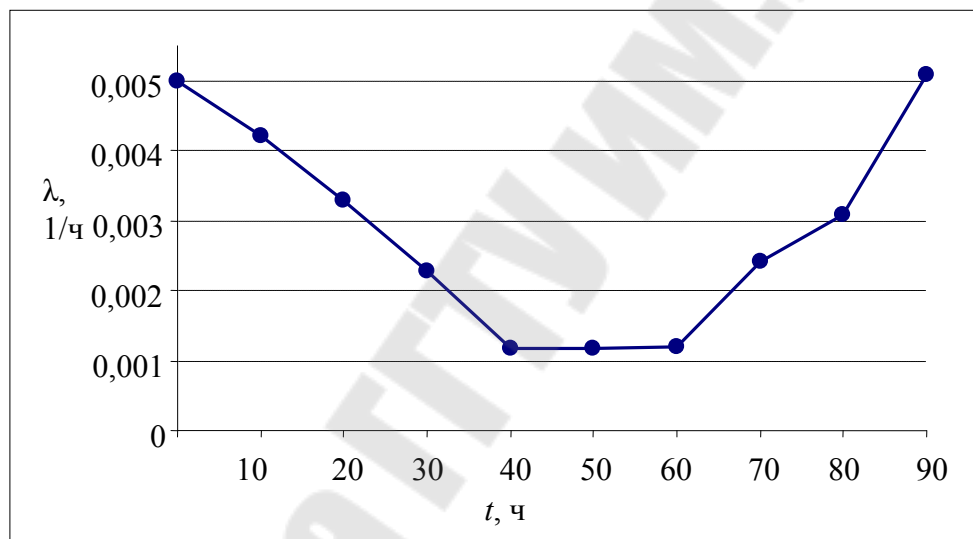


Рис. 5.2. Зависимость  $\lambda(t)$

### Задача № 5.3

Определить коэффициент готовности системы, если известно, что среднее время восстановления одного отказа  $T_{\hat{a}} = 3 \text{ ÷}$ , а среднее время безотказной работы  $T = 200 \text{ ÷}$ .

#### Решение

Коэффициент готовности по формуле (5.6)

$$K_r = \frac{T}{T + T_{\hat{a}}} = \frac{200}{200 + 3} = 0,985.$$



### Задача № 5.4

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 подсчёта отказавших ламп получены данные, сведенные в табл. 5.3. Определить вероятность безотказной работы за 1000, 1500, 4000, 14000 часов работы ламп.

Таблица 5.3

#### Исходные данные

Интервал времени $\Delta_t$ , ч	Число отказавших элементов $n_i$	Интервал времени $\Delta_t$ , ч	Число отказавших элементов $n_i$
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

#### Решение

По формуле (5.1) вероятность безотказной работы ламп за 1000 ч:

$$P^*(1000) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{1000 - 20}{1000} = 0,98;$$

за 1500 ч:

$$P^*(1500) = \frac{1000 - (20 + 25/2)}{1000} = 0,9675;$$

за 4000 ч:

$$P^*(4000) = \frac{1000 - (20 + 25 + 35 + 50)}{1000} = 0,87.$$

Число элементов, отказавших за 14000 ч

$$\begin{aligned} n(14000) &= 20 + 25 + 35 + 50 + 30 + 50 + 40 + \\ &+ 40 + 50 + 30 + 40 + 40 + 50 + 40 = 540 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы ламп за 14000 ч:

$$P^*(14000) = \frac{1000 - 540}{1000} = 0,46.$$

### Задача № 5.5

По исходным данным задачи № 5.4 определить вероятность отказа ламп за 1000, 1500, 4000, 14000 ч.

#### Решение

Вероятность отказа ламп за 1000 ч по формуле (5.2):

$$Q^*(1000) = \frac{20}{1000} = 0,02;$$

за 1500 ч:

$$Q^*(1500) = \frac{20 + 25/2}{1000} = 0,0325;$$

за 4000 ч:

$$Q^*(4000) = \frac{20 + 25 + 35 + 50}{1000} = 0,13;$$

за 14000 ч:

$$Q^*(14000) = \frac{540}{1000} = 0,54.$$

### Задача № 5.6

Определить среднее время безотказной работы ламп по данным задачи № 5.4.

#### Решение

Для определения среднего времени безотказной работы используем формулу из задачи № 5.1

$$T = \frac{\sum_i T_i \cdot n_i + \left( N_0 - \sum_i n_i \right) \cdot t}{N_0},$$

где  $T_i$  – середина  $i$ -го интервала.

$$T = \frac{500 \cdot 20 + 1500 \cdot 25 + 2500 \cdot 35 + 3500 \cdot 50 + 4500 \cdot 30 + 5500 \cdot 50 + 6500 \cdot 40}{1000} +$$

$$+ \frac{7500 \cdot 40 + 8500 \cdot 50 + 9500 \cdot 30 + 10500 \cdot 40 + 11500 \cdot 40 + 12500 \cdot 50 + 13500 \cdot 40}{1000} +$$

$$+ \frac{(1000 - 540) \cdot 14000}{1000} = 10475 \div.$$

### Задача № 5.7

Определить зависимость частоты отказов от времени для ламп, установленных в электронном устройстве, по данным задачи № 5.4.

#### Решение

Интервал времени  $\Delta t = 1000 \div$ , общее количество элементов взятых для испытания  $N_0 = 1000$ .

Для первого интервала (0-1000) ч. число отказавших элементов  $n(\Delta t) = 20$ , тогда по формуле (5.3)

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{20}{1000 \cdot 1000} = 2 \cdot 10^{-5}.$$

Для второго интервала (1000-2000) ч число отказавших элементов  $\Delta n(t) = 25$ , тогда

$$a^*(t) = \frac{25}{1000 \cdot 1000} = 2,5 \cdot 10^{-5}.$$

Результаты расчёта сведены в табл. 5.4.

## Результаты расчёта

Интервал времени $\Delta t$ , ч	Число отказавших элементов $n(\Delta t)$	Частота отказов $a(t)$
0-1000	20	$2 \cdot 10^{-5}$
1000-2000	25	$2,5 \cdot 10^{-5}$
2000-3000	35	$3,5 \cdot 10^{-5}$
3000-4000	50	$5 \cdot 10^{-5}$
4000-5000	30	$3 \cdot 10^{-5}$
5000-6000	50	$5 \cdot 10^{-5}$
6000-7000	40	$4 \cdot 10^{-5}$
7000-8000	40	$4 \cdot 10^{-5}$
8000-9000	50	$5 \cdot 10^{-5}$
9000-10000	30	$3 \cdot 10^{-5}$
10000-11000	40	$4 \cdot 10^{-5}$
11000-12000	40	$4 \cdot 10^{-5}$
12000-13000	50	$5 \cdot 10^{-5}$
13000-14000	40	$4 \cdot 10^{-5}$

Зависимость частоты отказов от времени представлена на рис. 5.3.

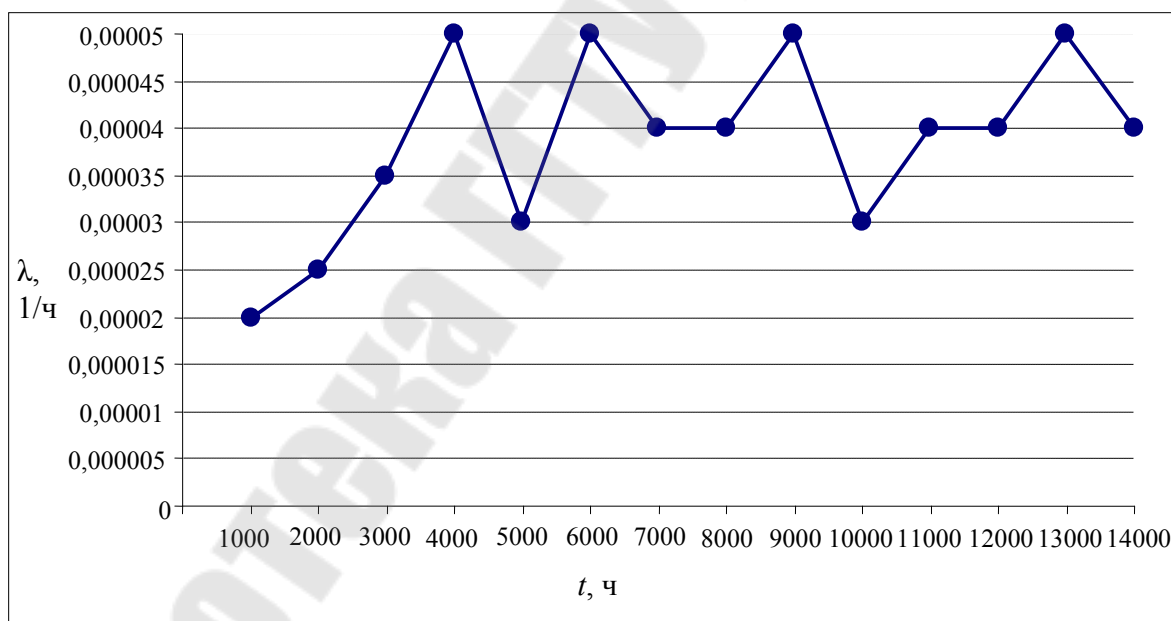


Рис. 5.3. Зависимость  $a(t)$

### Задача № 5.8

При эксплуатации электрических распределительных сетей района их суммарная наработка за год составила 7610 ч, суммарное время ремонта 350 ч и суммарное время технического обслуживания

800 ч. Определить коэффициенты готовности, неготовности и технического использования.

### **Решение**

Введем следующие обозначения: суммарная наработка за год  $T = 7610$  ч, суммарное время ремонта  $T_B = 350$  ч и суммарное время технического обслуживания  $T_O = 800$  ч.

Тогда коэффициент готовности по формуле (5.6):

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B} = \frac{7610}{7610 + 350} = 0,956;$$

коэффициент неготовности по формуле (5.8):

$$K_{\text{H}} = \frac{T_B}{T + T_B} = \frac{350}{7610 + 350} = 0,044;$$

коэффициент технического использования по формуле (5.12)

$$K_{\text{ти}} = \frac{T}{T + T_B + T_O} = \frac{7610}{7610 + 350 + 800} = 0,869.$$

### **Задание для самостоятельной работы**

На испытания поставлено  $N_0$  элементов (см. табл. 5.6). Испытания проводились в течение  $t = 12000$  ч. В результате подсчёта отказавших элементов получены данные, сведенные в табл. 5.5.

1. Определить вероятность безотказной работы элементов за 1000, 3500, 6000, 8000, 12000 ч.
2. Определить вероятность отказа элементов за 1000, 3500, 6000, 8000, 12000 ч.
3. Определить среднее время безотказной работы элементов.
4. Определить зависимость частоты отказов элементов от времени.
5. Определить зависимость интенсивности отказов элементов от времени.

Таблица 5.5

**Исходные данные**

Интервал времени $\Delta t$ , ч	Число отказавших элементов $n(\Delta t)$ , в % от $N_0$
0-1000	7
1000-2000	6
2000-3000	5
3000-4000	4
4000-5000	3
5000-6000	2,5
6000-7000	2
7000-8000	2
8000-9000	3
9000-10000	4,5
10000-11000	5
11000-12000	6

Таблица 5.6

Количество элементов, поставленных на испытания  $N_0$ , шт

Вариант	$N_0$ , шт	Вариант	$N_0$ , шт
1	1000	11	6000
2	1500	12	6500
3	2000	13	7000
4	2500	14	8000
5	3000	15	8500
6	3500	16	9000
7	4000	17	9500
8	4500	18	2800
9	5000	19	3200
10	5500	20	4200

## 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ВАРИАНТОВ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЁТОМ НАДЁЖНОСТИ

### Задача № 6.1

Система передачи электроэнергии потребителю, представленная на рисунке, состоит из следующих элементов: трансформатора Т1, линии электропередачи Л1 длиной 10 км, трансформатора Т2.

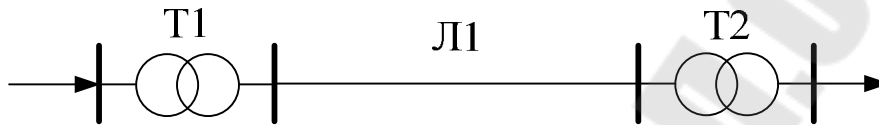


Рис. 6.1

Параметры потока отказов элементов и средние времена их восстановления приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

#### Показатели надёжности элементов сети

Показатель надёжности	Элемент сети		
	Т1	Л1	Т2
$\omega$ , 1/год	0,01	0,17*	0,012
$T_B$ , ч	190	6	80

\* – удельный параметр потока отказов линии  $\omega_0$ , 1/(км·год)

Определить годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю, если максимальная нагрузка потребителя составляет  $P_i = 4$  МВт, время её использования  $T_i = 3000$  ч, удельный ущерб потребителю –  $\acute{o}_0 = 10000$  руб/кВт·ч.

#### Решение

1. Параметр потока отказов линии электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{л} = \omega_0 \cdot l = 0,17 \cdot 10 = 1,7 \text{ 1/год.}$$

2. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами

$$\omega_c = \sum_{i=1}^3 \omega_i = \omega_{T1} + \omega_{Tl} + \omega_{T2} = 0,01 + 1,7 + 0,012 = 1,722 \text{ 1/год..}$$

3. Среднее время восстановления системы с последовательно соединенными элементами

$$T_{Bc} = \frac{\omega_{T1} T_{Bt1} + \omega_{Tl} T_{Bt} + \omega_{T2} T_{Bt2}}{\omega_c} =$$

$$= \frac{(0,01 \cdot 190 + 1,7 \cdot 6 + 0,012 \cdot 80)}{1,722} = 7,58 \text{ ч.}$$

4. Продолжительность аварийных отключений потребителя в год

$$T_{Bгод} = \omega_c \cdot T_{Bc} = 1,722 \cdot 7,58 = 13,05 \text{ ч.}$$

5. Годовой недоотпуск электроэнергии потребителю

$$\Delta W = \frac{P_M \cdot T_M \cdot T_{Bгод}}{8760} = \frac{4 \cdot 3000 \cdot 7,58}{8760} = 10,38 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

6. Годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю

$$Y = y_0 \cdot \Delta W = 10000 \cdot 10,38 \cdot 10^3 = 1,038 \cdot 10^8 \text{ руб.}$$

### Задание для самостоятельной работы

1. Определить годовой ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю для схем электроснабжения в задачах 3.1-3.3, если

а) максимальная нагрузка потребителя составляет  $P_i = 15$  МВт, время её использования  $T_i = 5300$  ч, удельный ущерб потребителю –  $\acute{o}_0 = 40000$  руб/кВт·ч;

б) максимальная нагрузка потребителя составляет  $P_i = 12$  МВт, время её использования  $T_i = 4500$  ч, удельный ущерб потребителю –  $y_0 = 20000$  руб/кВт·ч;



в) максимальная нагрузка потребителя составляет  $P_i = 8$  МВт, время её использования  $T_i = 3900$  ч, удельный ущерб потребителю –  $y_0 = 26000$  руб/кВт·ч.

Преднамеренные отключения не учитывать.

2. Определить зависимость годового ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителю, получающему питание по схеме из задачи 6.1 от

а) максимальной нагрузки потребителя –  $P_i = 4..12$  МВт,

б) удельного ущерба потребителю –  $\acute{o}_0 = 5000..50000$  руб/кВт·ч.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганков, В.М. Надежность электрических систем и сетей: Конспект лекций / В.М. Цыганков. – Минск: БГПА, 2001. – 152 с.
2. Цыганков, В.М. Надежность электрических систем и сетей: Сборник задач / В.М. Цыганков. – Минск: БНТУ, 2006. – 134 с.
3. Надёжность систем электроснабжения / В.В. Зорин [и др.]. – Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 192 с.
4. Анищенко, В.А. Надежность систем электроснабжения: Учеб. пособие / В.А. Анищенко. – Минск: УП “Технопринт”, 2001. – 160 с.
5. Хорольский, В.Я. Надежность электроснабжения / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов. – Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2007. – 128 с.
6. Волков, Н.Г. Надежность электроснабжения. Учеб. пособие / Н.Г. Волков. – Томск: Том. политех. ун-т, 2003. – 140 с.
7. Розанов, М.Н. Надежность электроэнергетических систем / М.Н. Розанов. – М.: Энергия, 1974. – 175 с.
8. Будзко, И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И.А. Будзко, М.С. Левин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Определение вероятности безотказной работы и вероятности отказа схем электроснабжения.....	4
2. Количественная вероятностная оценка надёжности электроснабжения потребителей .....	14
3. Расчёт показателей надёжности схем электроснабжения потребителей .....	20
4. Составление структурных схем электрической сети и определение показателей надёжности .....	31
5. Статистические показатели эксплуатационной надёжности элементов схем электроснабжения .....	35
6. Определение экономичности вариантов схем электроснабжения с учётом надёжности .....	47
Список литературы.....	50

**Алферова Тамара Викторовна  
Пухальская Ольга Юрьевна  
Алферов Александр Александрович**

## **НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК**

**ПРАКТИКУМ**

**по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение», специализации 1-43 01 03 05  
«Электроснабжение предприятий агропромышленного  
комплекса» дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа ..14.

Пер. № .

<http://www.gstu.by>

**НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК**

**ПРАКТИКУМ**  
**по одноименной дисциплине**  
**для студентов специальности 1-43 01 03**  
**«Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 05**  
**«Электроснабжение предприятий**  
**агропромышленного комплекса»**  
**дневной формы обучения**

Составители: **Алферова** Тамара Викторовна  
**Пухальская** Ольга Юрьевна  
**Алферов** Александр Александрович

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 12.02.15.  
Пер. № 127Е.  
<http://www.gstu.by>