

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

**К. М. Медведев, О. Ю. Пухальская**

# **НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Практикум  
по одноименному курсу  
для студентов специальности 1-43 01 02  
«Электроэнергетические системы и сети»  
дневной формы обучения**

Гомель 2010

УДК 621.31.019.3(075.8)  
ББК 31.27-02я73  
М42

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 30.03.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *Г. И. Селиверстов*

**Медведев, К. М.**

М42

Надежность электроэнергетических систем : практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» днев. формы обучения / К. М. Медведев, О. Ю. Пухальская. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 52 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: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Практикум содержит шесть тем практических занятий, в которых даны 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 электроэнергетических систем.

Для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» дневной формы обучения.

УДК 621.31.019.3(075.8)  
ББК 31.27-02я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В практической деятельности инженеру-энергетику приходится постоянно принимать различные решения: выбрать проектный вариант электроэнергетической системы или её части; определить режимы её функционирования и т. д. В сложных современных электроэнергетических системах на выбор решений влияет большое количество факторов. Среди всех факторов надёжность занимает особое место, т. к. при принятии практически любого решения требуются знания теоретических основ и практических расчетов надёжности.

В данном практикуме рассмотрен ряд задач, связанных с расчётами и анализом надёжности электроэнергетических систем, включая расчёты вероятности безотказной работы и вероятности отказа электрических сетей, надёжности схем питания потребителей и схем передачи электроэнергии, составление структурных схем электрических сетей, определение показателей надёжности схем электрических систем, а также расчёт статистических показателей эксплуатационной надёжности элементов энергосистемы.

# 1. Определение вероятности безотказной работы и вероятности отказа электрической сети

## Теоретические сведения

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 ее физической природы, но обладающая общими закономерностями: 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 (т. е. вероятность одного события не изменяется вне зависимости от того, произошло или не произошло другое событие).

Для анализа надёжности распределительные сети представляются в виде структурной схемы или блок-схемы, в которой реальные связи заменяются условными с учетом 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 ее 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 соединенных элементов, работоспособна, если  $X_1, X_2, \dots, X_n$  работоспособны.

Показатели надёжности цепи, состоящей из  $n$  последовательно соединенных элементов определяются по выражениям, приведенным ниже.

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

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

2. Вероятность отказа последовательной цепи

$$Q_{\text{Ц}}(t) = 1 - P_{\text{Ц}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i(t)). \quad (1.3)$$

Т. к. для элемента всегда  $P_i(t) \leq 1$ , то  $P_{\text{Ц}}(t) \leq P_i(t)$ ,  $Q_{\text{Ц}}(t) \geq Q_i(t)$ .

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

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

Параллельную структуру называют еще 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  $n$  элементов находятся в состоянии простоя. Тогда

1) вероятность отказа параллельной цепи

$$Q_{\text{Ц}}(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod_{j=1}^n Q_j(t); \quad (1.4)$$

2) вероятность безотказной работы параллельной цепи

$$P_{\text{Ц}}(t) = 1 - Q_{\text{Ц}}(t) = 1 - \prod_{j=1}^n Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_j(t)). \quad (1.5)$$

Т. к. для элемента всегда  $Q_j(t) \leq 1$ , то  $Q_{\Pi}(t) \leq Q_j(t)$ ,  $P_{\Pi}(t) \geq P_j(t)$ .

### **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 проследим на примерах.

#### **Задача № 1.1**

Схема сети представлена на рис. 1.1 и состоит из последовательно соединённых элементов. Точно и приближённо определить вероятность отказа сети и вероятность её безотказной работы, если вероятности отказа отдельных элементов сети составляют: генератора  $Q_{\Gamma} = 0,04$ , трансформатора  $Q_{\text{Т}} = 0,15$ , линии  $Q_{\text{Л}} = 8 \cdot 10^{-3}$ .



Рис. 1.1. Схема передачи электроэнергии

#### **Решение**

1. Точный вариант.

Вероятность отказа схемы:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сх}} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) = 1 - (1 - Q_{\Gamma})(1 - Q_{\text{Т}})(1 - Q_{\text{Л}}) = \\ &= 1 - (1 - 0,04)(1 - 0,15)(1 - 8 \cdot 10^{-3}) = 1 - 0,809 = 0,191. \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{сх}} = 1 - Q_{\text{сх}} = 1 - 0,191 = 0,809.$$

2. Приближённый вариант.

Для элементов схемы электроэнергетической системы с  $Q_i \ll 1$  величины произведений вероятностей отказов  $Q_i$  отдельных элемен-

тов малы в сравнении с величинами этих вероятностей. С учётом этого обстоятельства:

$$Q_{cx} \approx \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} = 0,04 + 0,15 + 8 \cdot 10^{-3} = 0,198.$$

$$P_{cx} = 1 - Q_{cx} = 1 - 0,198 = 0,802.$$

### Задача № 1.2

Определить вероятность отказа схемы передачи электроэнергии (см. задачу № 1.1, рис. 1.1), считая повреждения элементов совместными событиями.

#### Решение

События называются **несовместными**, если никакие два из них не могут появиться вместе, и, наоборот, события называются **совместными**, если они могут произойти одновременно. Пример совместного события – одновременный отказ двух и более элементов в один и тот же момент времени в относительно простой последовательной схеме.

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

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

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

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

В нашем случае:

$$Q_{cx} = Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} - (Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma}) + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma};$$

$$Q_{cx} = 0,04 + 0,15 + 8 \cdot 10^{-3} - (0,04 \cdot 0,15 + 0,04 \cdot 8 \cdot 10^{-3} + 0,15 \cdot 8 \cdot 10^{-3}) + 0,04 \cdot 0,15 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 0,198 - 0,00752 + 0,000048 = 0,1905.$$

### Задача № 1.3

Определить вероятность отказа схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.2, считая повреждения элементов: а) несо-

вместными; б) совместными. Вероятности отказа отдельных элементов схемы составляют: генератора  $Q_{\Gamma} = 0,04$ , трансформатора Т1  $Q_{\Gamma 1} = 0,15$ , линии  $Q_{\text{л}} = 8 \cdot 10^{-3}$ , трансформатора Т2  $Q_{\Gamma 2} = 0,12$ .

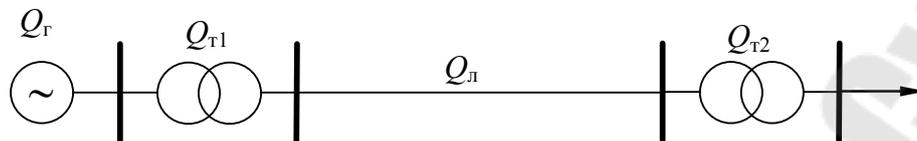


Рис. 1.2. Схема передачи электроэнергии

### Решение

а) Вероятность отказа схемы:

$$Q_{\text{сх}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) = 1 - (1 - Q_{\Gamma})(1 - Q_{\Gamma 1})(1 - Q_{\text{л}})(1 - Q_{\Gamma 2}) =$$

$$= 1 - (1 - 0,04)(1 - 0,15)(1 - 8 \cdot 10^{-3})(1 - 0,12) = 1 - 0,712 = 0,288,$$

или приближенно

$$Q_{\text{сх}} \approx \sum_{i=1}^n Q_i = 0,04 + 0,15 + 8 \cdot 10^{-3} + 0,12 = 0,318.$$

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

$$Q_{\text{сх}} = Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma 1} + Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma 2} - Q_{\Gamma} \cdot (Q_{\Gamma 1} + Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma 2}) - Q_{\Gamma 1} \cdot (Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma 2}) -$$

$$- Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} \cdot (Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma 2}) + Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} \cdot (Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma 1}) - Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} =$$

$$= Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma 1} + Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma 2} - (Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 2} + Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\Gamma 2} +$$

$$+ Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\text{л}} + Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2}) + (Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\text{л}} + Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\Gamma 2} + Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} \cdot Q_{\Gamma} +$$

$$+ Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} \cdot Q_{\Gamma 1}) - Q_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma 1} \cdot Q_{\text{л}} \cdot Q_{\Gamma 2} =$$

$$= 0,04 + 0,15 + 8 \cdot 10^{-3} + 0,12 - (0,04 \cdot 0,15 + 0,04 \cdot 8 \cdot 10^{-3} + 0,04 \cdot 0,12 +$$

$$+ 0,15 \cdot 0,12 + 0,15 \cdot 8 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12) + (0,04 \cdot 0,15 \cdot 8 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ 0,04 \cdot 0,15 \cdot 0,12 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 \cdot 0,04 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 \cdot 0,15) -$$

$$- 0,04 \cdot 0,15 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 = 0,318 - 0,03128 + 0,00095 - 0,000005 =$$

$$= 0,2877.$$

### Задача № 1.4

Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.3, если  $Q_{л1} = 18 \cdot 10^{-3}$ ,  $Q_{л2} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ .

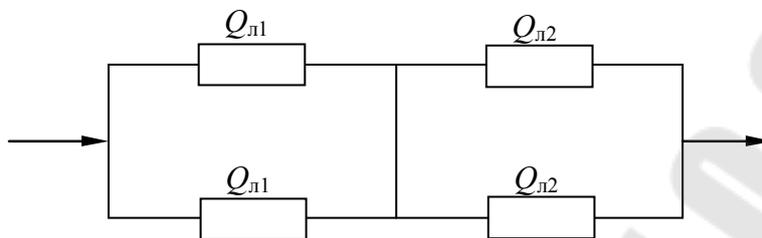


Рис. 1.3. Схема передачи электроэнергии

#### Решение

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

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

то в нашем случае:

$$Q_{гр1} = Q_{л1}^2 = (18 \cdot 10^{-3})^2 = 0,000324 = 3,24 \cdot 10^{-4};$$

$$Q_{гр2} = Q_{л2}^2 = (3,9 \cdot 10^{-3})^2 = 0,0000152 = 0,152 \cdot 10^{-4}.$$

Вероятность безотказной работы группы:

$$P_{гр1} = 1 - Q_{гр1} = 1 - 3,24 \cdot 10^{-4} = 0,999676;$$

$$P_{гр2} = 1 - Q_{гр2} = 1 - 0,152 \cdot 10^{-4} = 0,9999848.$$

На рис. 1.4 представлена исходная схема после преобразования:



Рис. 1.4. Эквивалентная схема

В схеме, состоящей из  $n$  последовательных элементов, вероятность безотказной работы:

$$P_{сх} = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i).$$

В рассматриваемом примере:

$$P_{cx} = P_{гр1} \cdot P_{гр2} = (1 - Q_{гр1})(1 - Q_{гр2}) = (1 - 3,24 \cdot 10^{-4})(1 - 0,152 \cdot 10^{-4}) = 0,999661.$$

Вероятность отказа схемы:

$$Q_{cx} = 1 - P_{cx} = 1 - 0,999661 = 0,000339 = 3,39 \cdot 10^{-4}.$$

Приближённый расчёт (т. к.  $Q_{л1}, Q_{л2} \ll 1$ ):

$$Q_{cx} \approx Q_{гр1} + Q_{гр2} = 3,24 \cdot 10^{-4} + 0,152 \cdot 10^{-4} = 0,000339 = 3,39 \cdot 10^{-4}.$$

### Задача № 1.5

Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы для схемы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.5, если  $P_1 = 0,98$ ;  $P_2 = 0,95$ .

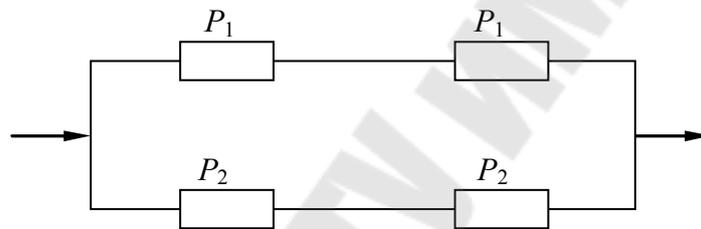


Рис. 1.5. Схема передачи электроэнергии

### 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:

$$P_{в} = P^2, \text{ следовательно } P_{в1} = P_1^2 = 0,98^2 = 0,9604;$$

$$P_{в2} = P_2^2 = 0,95^2 = 0,9025.$$

На рис. 1.6 представлена исходная схема после преобразования.

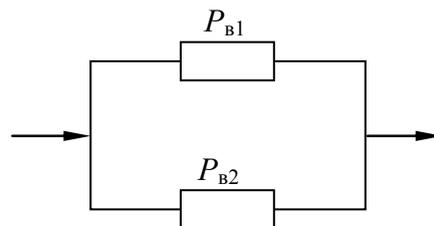


Рис. 1.6. Эквивалентная схема

Вероятность отказа ветви сети:

$$Q_{\text{в}} = 1 - P_{\text{в}};$$

$$Q_{\text{в1}} = 1 - 0,9604 = 0,0396;$$

$$Q_{\text{в2}} = 1 - 0,9025 = 0,0975.$$

Вероятность отказа сети из двух параллельных ветвей:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сх}} &= \prod_{i=1}^2 Q_{\text{в}i} = \prod_{i=1}^2 (1 - P_{\text{в}i}) = (1 - P_{\text{в1}})(1 - P_{\text{в2}}) = \\ &= (1 - 0,9604)(1 - 0,9025) = 0,003861 = 3,861 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{\text{сх}} = 1 - Q_{\text{сх}} = 1 - 0,003861 = 0,9961.$$

### Задача № 1.6

Система передачи электроэнергии потребителю состоит из следующих элементов: линии, выключателя В1, трансформатора, выключателя В2, системы сборных шин – см. рис. 1.7. Определить вероятность отказа схемы, если  $Q_{\text{л}} = 8 \cdot 10^{-3}$ ;  $Q_{\text{в1}} = 5 \cdot 10^{-3}$ ;  $Q_{\text{т}} = 0,15$ ;  $Q_{\text{в2}} = 0,012$ ;  $Q_{\text{сш}} = 0,004 \cdot 10^{-3}$ .

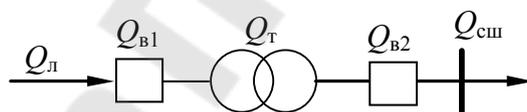


Рис. 1.7. Схема передачи электроэнергии

### Решение

1. Блочная схема для расчёта надёжности представлена на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Схема для расчёта надёжности

2. Вероятность отказа схемы:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{сх}} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) = 1 - (1 - Q_{\text{л}})(1 - Q_{\text{вл}})(1 - Q_{\text{т}})(1 - Q_{\text{в2}})(1 - Q_{\text{сш}}) = \\
 &= 1 - (1 - 8 \cdot 10^{-3})(1 - 5 \cdot 10^{-3})(1 - 0,15)(1 - 0,012)(1 - 0,004 \cdot 10^{-3}) = \\
 &= 1 - 0,829 = 0,171.
 \end{aligned}$$

3. Приближенный расчёт:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{сх}} &\approx Q_{\text{л}} + Q_{\text{вл}} + Q_{\text{т}} + Q_{\text{в2}} + Q_{\text{сш}} = \\
 &= 8 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} + 0,15 + 0,012 + 0,004 \cdot 10^{-3} = 0,175.
 \end{aligned}$$

### Задача № 1.7

Рассчитать параметры надёжности ( $Q_{\text{сх}}, P_{\text{сх}}$ ) для системы передачи электроэнергии, представленной на рис. 1.9. Вероятности безотказной работы элементов схемы  $P_1 = 0,98$ ;  $P_2 = 0,95$ .

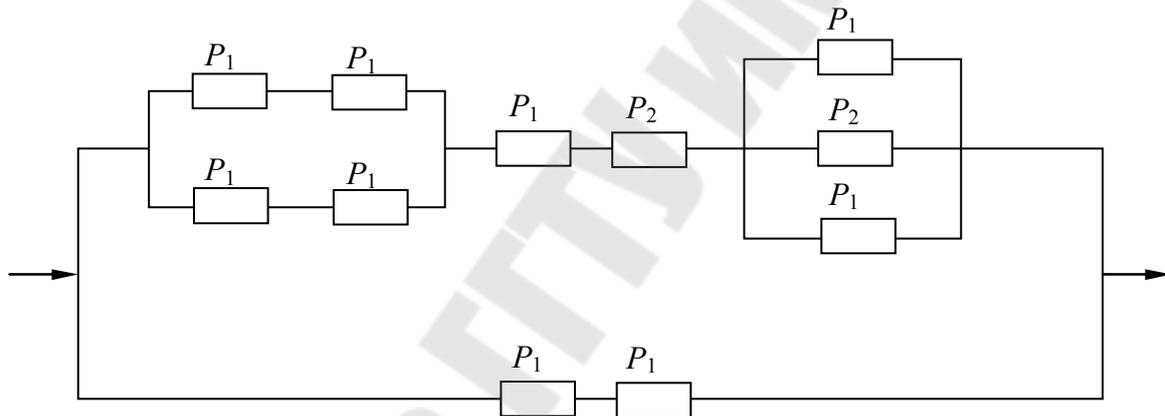


Рис. 1.9. Система передачи электроэнергии

1. Схема сети для расчёта надёжности имеет смешанную последовательно-параллельную группировку. На рис. 1.10 дано деление этой сети на две подгруппы с выделением в первой из них трёх блоков элементов ( $a, б, в$ ). Подсхемы I и II соединены параллельно.

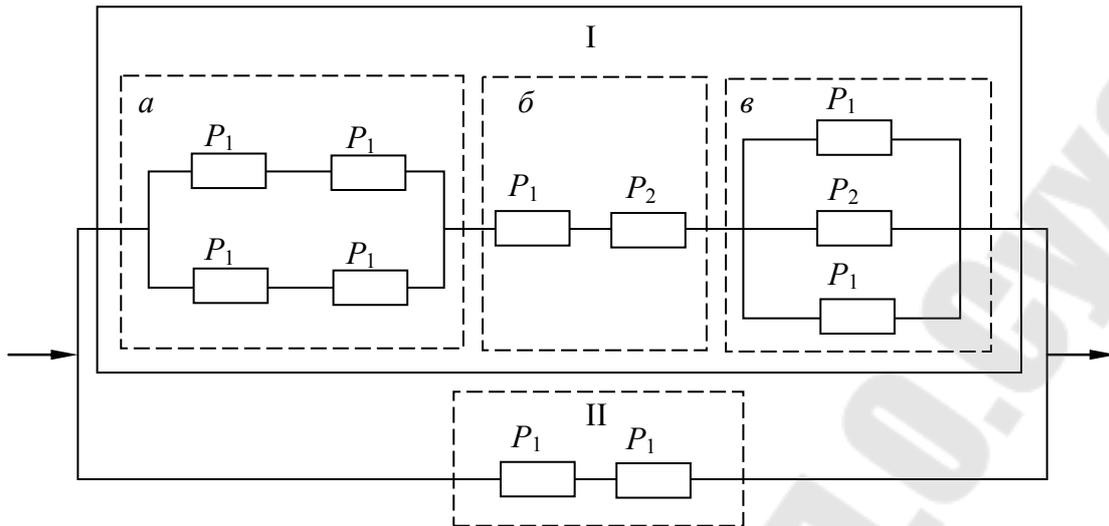


Рис. 1.10. Преобразование исходной схемы

2. Вероятность безотказной работы схемы составляет:

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

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

3. Рассмотрим режимы работы подсхем.

Вероятность безотказной работы подсхемы I:

$$P_I = P_a \cdot P_{\text{б}} \cdot P_{\text{в}}.$$

Для блока "а":

$$P_a = 1 - (1 - P_1^2)^2 = 1 - (1 - 0,98^2)^2 = 0,99843;$$

для блока "б":

$$P_{\text{б}} = P_1 \cdot P_2 = 0,98 \cdot 0,95 = 0,931;$$

для блока "в":

$$\begin{aligned} P_{\text{в}} &= 1 - Q_{\text{в}} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_1) = \\ &= 1 - (1 - 0,98)(1 - 0,95)(1 - 0,98) = 0,99998. \end{aligned}$$

Для подсхемы II вероятность безотказной работы:

$$P_{II} = P_1^2 = 0,98^2 = 0,9604.$$

Тогда

$$P_I = 0,99843 \cdot 0,931 \cdot 0,99998 = 0,92952.$$

Вероятность безотказной работы схемы:

$$P_{cx} = 1 - (1 - 0,92952)(1 - 0,9604) = 0,99721.$$

Вероятность отказа схемы:

$$Q_{cx} = 1 - P_{cx} = 1 - 0,99721 = 0,00279.$$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 1.1-1.7 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчёта вероятности безотказной работы и вероятности отказа

Вариант	$Q_{\Gamma}$	$Q_{\Gamma 1} = Q_{\Gamma}$	$Q_{\Gamma 2}$	$Q_{\Gamma 1} = Q_{\Gamma}$ $10^{-3}$	$Q_{\Gamma 2}$ $10^{-3}$	$P_1$	$P_2$	$Q_{B1}$ $10^{-3}$	$Q_{B2}$	$Q_{сш}$ $10^{-3}$
1	0,02	0,08	0,03	0,7	0,9	0,95	0,98	0,3	0,01	0,006
2	0,023	0,15	0,01	7,0	4,5	0,94	0,965	7,0	0,006	0,002
3	0,025	0,1	0,08	13,0	6,0	0,946	0,99	0,8	0,062	0,004
4	0,027	0,155	0,07	3,0	1,8	0,985	0,955	13,0	0,005	0,005
5	0,029	0,13	0,09	12,0	0,8	0,988	0,936	6,0	0,012	0,003
6	0,03	0,16	0,1	6,0	2,7	0,945	0,97	0,9	0,0075	0,007
7	0,032	0,09	0,16	0,75	3,5	0,982	0,977	1,5	0,011	0,004
8	0,034	0,145	0,01	0,8	0,85	0,943	0,93	0,2	0,0135	0,006
9	0,036	0,18	0,11	11,0	2,0	0,991	0,926	8,0	0,0065	0,005
10	0,038	0,175	0,02	4,0	5,5	0,951	0,945	0,7	0,0098	0,002
11	0,04	0,07	0,07	8,0	3,0	0,979	0,951	5,0	0,015	0,007
12	0,043	0,085	0,17	0,85	3,3	0,955	0,96	1,0	0,0139	0,004
13	0,045	0,115	0,12	14,0	6,5	0,984	0,946	12,0	0,014	0,003
14	0,047	0,19	0,06	0,95	1,0	0,947	0,935	0,4	0,0125	0,006
15	0,05	0,115	0,13	4,5	3,8	0,96	0,988	9,0	0,0055	0,005
16	0,051	0,11	0,02	0,9	2,5	0,956	0,92	4,0	0,013	0,002
17	0,053	0,075	0,11	7,5	0,95	0,965	0,956	0,6	0,0073	0,007
18	0,058	0,14	0,15	10,0	7	0,957	0,925	14,0	0,007	0,006
19	0,059	0,185	0,04	2,0	6,5	0,966	0,938	5,5	0,0145	0,004
20	0,06	0,065	0,18	1,5	5,0	0,97	0,966	2,0	0,0085	0,005
21	0,061	0,125	0,03	5,0	4,9	0,968	0,94	9,5	0,009	0,007
22	0,063	0,17	0,1	2,5	1,5	0,99	0,928	10,0	0,0115	0,002
23	0,065	0,135	0,05	1,0	5,2	0,977	0,975	0,5	0,008	0,005
24	0,067	0,095	0,12	9,0	4,0	0,98	0,985	3,0	0,0087	0,007
25	0,069	0,12	0,14	3,5	6,3	0,975	0,95	11,0	0,0095	0,004

## 2. РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

### Задача № 2.1

Определить вероятность аварийных отключений мощности для приведенной схемы питания потребителя (рис. 2.1) Каждая цепь линии пропускает мощность  $S_H$ ,  $Q_{Л1} = Q_{Л2} = Q_L = 10 \cdot 10^{-3}$ .

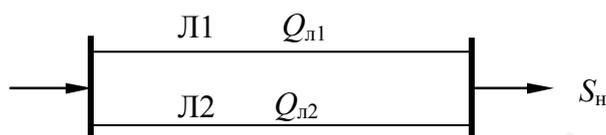


Рис. 2.1. Схема электрической сети

### Решение

Для параллельной группы линий имеем следующие комбинации:

1) одновременная работа двух линий, потребитель получит 100 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$P_{Л1} \cdot P_{Л2} = (1 - Q_{Л1})(1 - Q_{Л2}) = (1 - Q_L)^2 = (1 - 10 \cdot 10^{-3})^2 = 0,9801;$$

2) авария Л1 при работе Л2 или аварии Л2 при работе Л1, потребитель получит 100 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$Q_{Л1} \cdot P_{Л2} + P_{Л1} \cdot Q_{Л2} = 2 \cdot Q_L \cdot (1 - Q_L) = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 10 \cdot 10^{-3}) = 0,0198;$$

3) одновременная авария Л1 и Л2, потребитель получит 0 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$Q_{Л1} \cdot Q_{Л2} = Q_L^2 = (10 \cdot 10^{-3})^2 = 1 \cdot 10^{-4}.$$

Результаты расчёта сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

### Результаты расчёта

Количество отказавших линий	Вероятность события $A_i$	Мощность, полученная потребителем	Мощность, недоотпущенная потребителю
0	$(1 - Q_L)^2 = 0,9801$	100%	0 %
1	$2Q_L \cdot (1 - Q_L) = 0,0198$	100%	0 %
2	$Q_L^2 = 1 \cdot 10^{-4}$	0%	100 %

## Задача № 2.2

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

а) каждая двухцепная линия пропускает мощность, необходимую заводу;

б) каждая цепь линии пропускает половину мощности, нужной заводу.

Требуется определить вероятность надёжной работы завода, если  $Q_{Т1} = Q_{Т2} = Q_{Т3} = Q_{Т4} = Q_{Т} = 0,12$ ;  $Q_{Л1} = 4 \cdot 10^{-3}$ ;  $Q_{Л2} = 7 \cdot 10^{-3}$ .

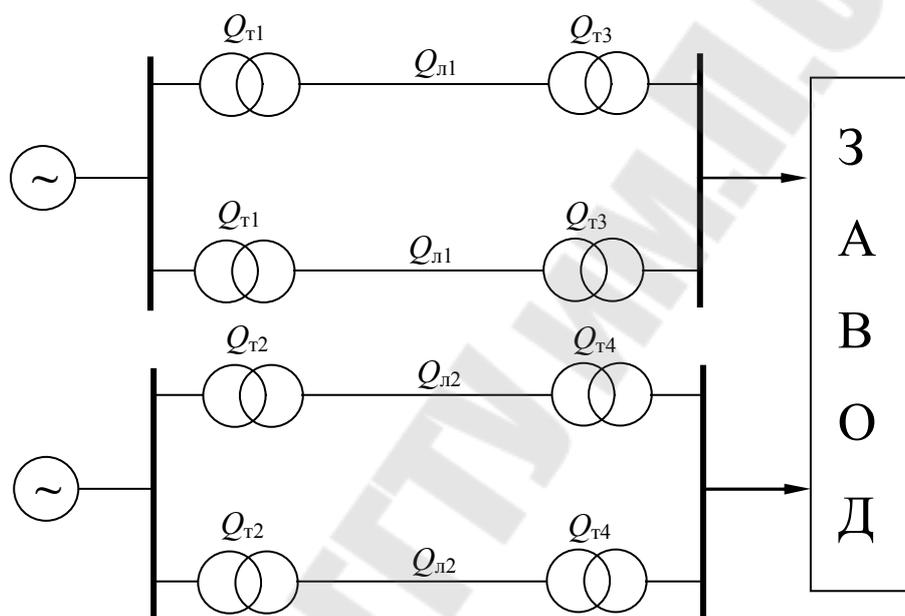


Рис. 2.2. Схема электроснабжения завода

### Решение

Получение мощности заводом возможно, если хотя бы две (любые) параллельные цепи из четырёх находятся в работе. Вероятность надёжной работы системы (без учёта надёжности станций) можно получить через вероятность отказа трёх и более цепей.

Вероятность отказа каждой из четырёх цепей составит:

1-й:

$$Q_I = 1 - P_I = 1 - P_{Т1} \cdot P_{Л1} \cdot P_{Т3} = 1 - (1 - Q_{Т1}) \cdot (1 - Q_{Л1}) \cdot (1 - Q_{Т3}) = \\ = 1 - (1 - 0,12) \cdot (1 - 4 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,12) = 1 - 0,7713 = 0,2287;$$

2-й:

$$Q_{II} = Q_I = 0,2287;$$

3-й:

$$Q_{III} = 1 - (1 - Q_{T2}) \cdot (1 - Q_{L2}) \cdot (1 - Q_{T4}) = \\ = 1 - (1 - 0,12) \cdot (1 - 7 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,12) = 1 - 0,769 = 0,231;$$

4-й:

$$Q_{IV} = Q_{III} = 0,231.$$

Вероятность надёжной работы двух и более цепей как событие противоположное отказу трёх и более цепей определим по формуле  $P = 1 - Q$ , где  $Q$  – отказ трёх и более цепей.

Рассмотрим все случаи.

1) Отказ всех четырёх цепей одновременно

$$Q_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV}.$$

2) Отказ 1-й, 2-й и 3-й цепей при работе 4-й цепи

$$Q_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot P_{IV}.$$

3) Отказ 1-й, 2-й и 4-й цепей при работе 3-й цепи

$$Q_I \cdot Q_{II} \cdot P_{III} \cdot Q_{IV}.$$

4) Отказ 1-й, 3-й и 4-й цепей при работе 2-й цепи

$$Q_I \cdot P_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV}.$$

5) Отказ 2-й, 3-й и 4-й цепей при работе 1-й цепи

$$P_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV}.$$

Тогда вероятность безотказной работы двух и более цепей

$$P = 1 - [Q_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV} + Q_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot P_{IV} + Q_I \cdot Q_{II} \cdot P_{III} \cdot Q_{IV} + \\ + Q_I \cdot P_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV} + P_I \cdot Q_{II} \cdot Q_{III} \cdot Q_{IV}] = \\ = 1 - [Q_I^2 \cdot Q_{III}^2 + Q_I^2 \cdot Q_{III} \cdot (1 - Q_{III}) + Q_I^2 \cdot Q_{III} \cdot (1 - Q_{III}) + \\ + Q_I \cdot (1 - Q_I) \cdot Q_{III}^2 + (1 - Q_I) \cdot Q_I \cdot Q_{III}^2] = \\ = 1 - [Q_I^2 \cdot Q_{III}^2 + 2 \cdot Q_I^2 \cdot Q_{III} \cdot (1 - Q_{III}) + 2 \cdot Q_I \cdot Q_{III}^2 \cdot (1 - Q_I)]; \\ P = 1 - [0,2287^2 \cdot 0,231^2 + 2 \cdot 0,2287^2 \cdot 0,231 \cdot (1 - 0,231) + \\ + 2 \cdot 0,2287 \cdot 0,231^2 \cdot (1 - 0,2287)] = 1 - 0,0402 = 0,9598.$$

Если вычислять  $Q$  приближённо:

$$Q_I = Q_{II} \approx Q_{T1} + Q_{л1} + Q_{T3} = 0,12 + 4 \cdot 10^{-3} + 0,12 = 0,244;$$

$$Q_{III} = Q_{IV} \approx Q_{T2} + Q_{л2} + Q_{T4} = 0,12 + 7 \cdot 10^{-3} + 0,12 = 0,247;$$

$$P = 1 - \left[ 0,244^2 \cdot 0,247^2 + 2 \cdot 0,244^2 \cdot 0,247 \cdot (1 - 0,247) + 2 \cdot 0,244 \cdot 0,247^2 \cdot (1 - 0,244) \right] = 1 - 0,0483 = 0,9517.$$

### Задача № 2.3

Определить вероятность аварийных отключений мощности для приведённой схемы питания потребителя (рис. 2.3). Допущения: пропускная способность одного трансформатора Т1, Т2 или Т3 – 50 % от  $S_H$ ; аварии элементов – независимые события.

$$Q_{T1} = Q_{T2} = Q_{T3} = Q_T = 0,11.$$

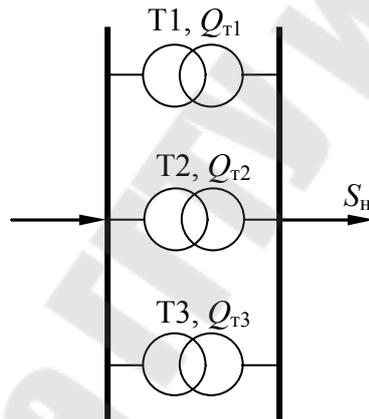


Рис. 2.3. Схема передачи электроэнергии

### Решение

Для параллельной группы трансформаторов имеем следующие комбинации (всего 8 комбинаций):

1) одновременная работа трёх трансформаторов, потребитель получит 100 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$P_{T1} \cdot P_{T2} \cdot P_{T3} = (1 - Q_T)^3 = (1 - 0,11)^3 = 0,7050.$$

2) авария одного из трёх трансформаторов, в этом случае потребитель получит 100%  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$Q_{T1} \cdot P_{T2} \cdot P_{T3} + P_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot P_{T3} + P_{T1} \cdot P_{T2} \cdot Q_{T3} = 3 \cdot (1 - Q_T)^2 \cdot Q_T = \\ = 3 \cdot (1 - 0,11)^2 \cdot 0,11 = 0,2614;$$

3) авария двух из трёх трансформаторов, в этом случае потребитель получит 50 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$Q_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot P_{T3} + Q_{T1} \cdot P_{T2} \cdot Q_{T3} + P_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot Q_{T3} = 3 \cdot (1 - Q_T) \cdot Q_T^2 = \\ = 3 \cdot (1 - 0,11) \cdot 0,11^2 = 0,0323;$$

4) авария трёх трансформаторов, в этом случае потребитель получит 0 %  $S_H$ ; вероятность этого события:

$$Q_{T1} \cdot Q_{T2} \cdot Q_{T3} = Q_T^3 = 0,11^3 = 0,0121;$$

Результаты расчёта сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

#### Результаты расчёта

Количество отказавших трансформаторов	Вероятность события $A_i$	Мощность, полученная потребителем	Мощность, недоотпущенная потребителю
0	$(1 - Q_T)^3 = 0,705$	100 %	0 %
1	$3(1 - Q_T)^2 \cdot Q_T = 0,2614$	100 %	0 %
2	$3(1 - Q_T) \cdot Q_T^2 = 0,0323$	50 %	50 %
3	$Q_T^3 = 0,0121$	0 %	100 %

#### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 2.1–2.3 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

#### Исходные данные для расчёта надёжности

Вариант	$Q_{л1} = Q_{л1}$ $10^{-3}$	$Q_{л2}$ $10^{-3}$	$Q_T$
1	1,1	0,9	0,08
2	9,4	8,8	0,04
3	7,0	6,5	0,1
4	1,3	1,1	0,06
5	12,1	11,5	0,15
6	8,5	7,9	0,02
7	3,7	3,4	0,11
8	7,7	7,2	0,12
9	6,1	5,8	0,14

Окончание табл. 2.3

Вариант	$Q_{л1} = Q_{л}$ $10^{-3}$	$Q_{л2}$ $10^{-3}$	$Q_{г}$
10	2,4	2,1	0,05
11	3,9	3,7	0,13
12	9,8	9,4	0,13
13	2,6	2,1	0,1
14	5,8	5,4	0,05
15	6,5	6,0	0,12
16	8,3	7,9	0,13
17	4,7	4,3	0,09
18	11,3	11,0	0,01
19	12	11,6	0,04
20	10	9,8	0,15
21	4,4	4,0	0,07
22	8,8	8,5	0,11
23	5,2	5,0	0,14
24	7,7	7,3	0,09
25	3,6	3,3	0,02

### 3. 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. Это оборудование может находиться в исключаяющем 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

$$Q_{k,n} = C_n^k Q^k (1 - Q)^{n-k}, \quad (3.1)$$

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!},$$

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  $k$ :

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (3.2)$$

#### Задача № 3.1

Определить вероятность отключения различных значений мощности на подстанции, имеющей два одинаковых трансформатора (рис. 3.1). Номинальная мощность каждого трансформатора  $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{T1} = Q_{T2} = Q = 0,15$ .

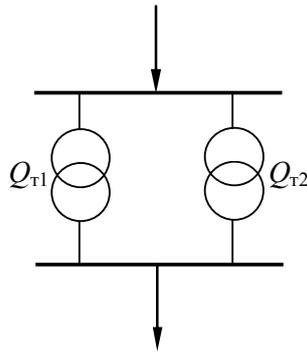


Рис. 3.1. Схема подстанции

### Решение

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

1) одновременная работа двух трансформаторов; вероятность этого события

$$P_{T1} \cdot P_{T2} = (1 - Q_{T1}) \cdot (1 - Q_{T2}) = (1 - Q)^2 = (1 - 0,15)^2 = 0,7225,$$

или по биномиальному закону

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

$$Q_{0,2} = C_2^0 \cdot (1 - Q)^{2-0} \cdot Q^0 = 1 \cdot (1 - 0,15)^{2-0} \cdot 0,15^0 = 0,7225;$$

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

$$\begin{aligned} Q_{T1} \cdot P_T + P_{T1} \cdot Q_{T2} &= Q_{T1} \cdot (1 - Q_{T2}) + (1 - Q_{T1}) \cdot Q_{T2} = 2 \cdot Q \cdot (1 - Q) = \\ &= 2 \cdot 0,15 \cdot (1 - 0,15) = 0,255, \end{aligned}$$

или по формулам (3.1), (3.2)

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

$$Q_{1,2} = C_2^1 \cdot (1 - Q)^{2-1} \cdot Q^1 = 2 \cdot (1 - 0,15)^{2-1} \cdot 0,15^1 = 0,255;$$

3) одновременный отказ T1 и T2; вероятность этого события

$$Q_{T1} \cdot Q_{T2} = Q^2 = 0,15^2 = 0,0225,$$

или

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

$$Q_{2,2} = C_2^2 \cdot (1-Q)^{2-2} \cdot Q^2 = 1 \cdot (1-0,15)^{2-2} \cdot 0,15^2 = 0,0255.$$

### Задача № 3.2

Оценить степень надёжности электроснабжения промышленного потребителя на шинах 220 кВ подстанции при передаче ему мощности  $S_H$  (рис. 3.2). Вероятности отказа элементов схемы электроснабжения:

котла  $Q_k = 0,7 \cdot 10^{-2}$ ; турбины  $Q_T = 1,1 \cdot 10^{-2}$ ; генератора  $Q_G = 0,04$ ; трансформатора  $Q_{тр} = 0,2$ ; одной ячейки РУ 220 кВ  $Q_{РУ220} = 0,3 \cdot 10^{-4}$ .

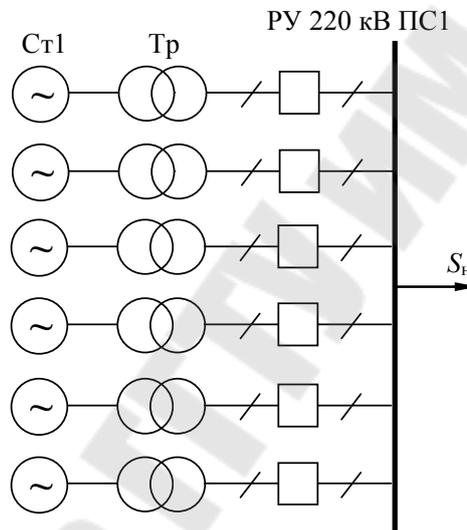


Рис. 3.2. Схема электроснабжения

### Решение

1. Определяем вероятность отказа энергоблока электростанции Ст1, состоящего из группы последовательно соединенных элементов (рис. 3.3): котла, турбины, генератора, блочного трансформатора и ячейки РУ 220 кВ:

$$\begin{aligned} Q_{\text{бл}} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) = 1 - (1 - Q_k)(1 - Q_T)(1 - Q_G)(1 - Q_{\text{тр}})(1 - Q_{\text{РУ220}}) = \\ &= 1 - (1 - 0,7 \cdot 10^{-2})(1 - 1,1 \cdot 10^{-2})(1 - 0,04)(1 - 0,2)(1 - 0,3 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 1 - 0,7542 = 0,2458. \end{aligned}$$

2. Вероятность безотказной работы блока:

$$P_{\text{бл}} = 1 - Q_{\text{бл}} = 1 - 0,2458 = 0,7542.$$

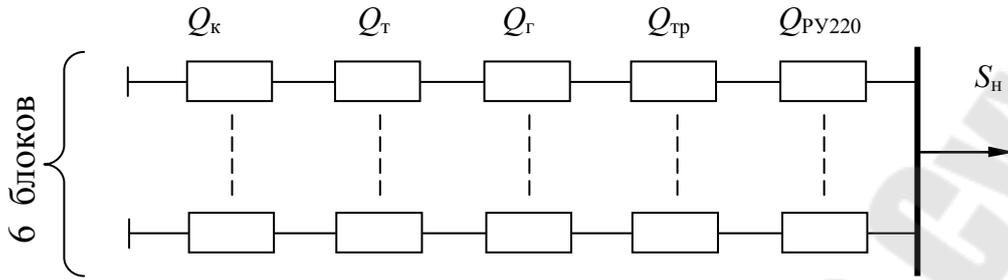


Рис. 3.3. Схема для расчёта надёжности

3. Определяем вероятность аварии энергоблоков, работающих параллельно. Вероятность аварии  $k$  энергоблоков из  $n$ , работающих параллельно определяем по формуле Бернулли:

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

Расчёты сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### Результаты расчёта

№ режима	Количество блоков в аварии	Количество комбинаций $C_n^k$	Вероятность аварии $k$ энергоблоков из $n$ $Q_{k,n}$
1	0	$C_6^0 = \frac{6!}{0!(6-0)!} = 1$	$Q_{0,6} = 1 \cdot Q^0 (1 - Q)^{6-0} = (1 - 0,2458)^6 = 0,184$
2	1	$C_6^1 = \frac{6!}{1!(6-1)!} = 6$	$Q_{1,6} = 6 \cdot Q^1 (1 - Q)^{6-1} = 6 \cdot 0,2458 \cdot (1 - 0,2458)^5 = 0,3599$
3	2	$C_6^2 = \frac{6!}{2!(6-2)!} = 15$	$Q_{2,6} = 15 \cdot Q^2 (1 - Q)^{6-2} = 15 \cdot 0,2458^2 \cdot (1 - 0,2458)^4 = 0,2932$
4	3	$C_6^3 = \frac{6!}{3!(6-3)!} = 20$	$Q_{3,6} = 20 \cdot Q^3 (1 - Q)^{6-3} = 20 \cdot 0,2458^3 \cdot (1 - 0,2458)^3 = 0,1274$
5	4	$C_6^4 = \frac{6!}{4!(6-4)!} = 15$	$Q_{4,6} = 15 \cdot Q^4 (1 - Q)^{6-4} = 15 \cdot 0,2458^4 \cdot (1 - 0,2458)^2 = 0,0311$
6	5	$C_6^5 = \frac{6!}{5!(6-5)!} = 6$	$Q_{5,6} = 6 \cdot Q^5 (1 - Q)^{6-5} = 6 \cdot 0,2458^5 \cdot (1 - 0,2458)^1 = 0,0041$
7	6	$C_6^6 = \frac{6!}{6!(6-6)!} = 1$	$Q_{6,6} = 1 \cdot Q^6 (1 - Q)^{6-6} = 1 \cdot 0,2458^6 \cdot (1 - 0,2458)^0 = 0,0002$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 3.1–3.2 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 3.2. Задачу № 3.2 решить, приняв количество блоков равным 7.

Таблица 3.2

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

Вариант	$Q_{T1}, Q_{T2}$	$Q_k$ 10-2	$Q_T$ 10-2	$Q_r$	$Q_{тр}$ 10-2	$Q_{PY220}$ 10-4
1	0,08	0,7	1,1	0,09	7,5	0,3
2	0,15	0,8	3,0	0,02	10,5	0,31
3	0,1	0,6	2,4	0,05	13	0,31
4	0,075	0,75	1,6	0,04	7	0,33
5	0,13	0,9	2,7	0,08	9,5	0,34
6	0,16	1	2,9	0,06	14	0,35
7	0,09	0,65	1,2	0,07	8	0,36
8	0,145	0,8	2,3	0,02	11,5	0,37
9	0,18	0,7	2,8	0,04	14,5	0,38
10	0,175	0,9	1,7	0,05	15	0,39
11	0,07	1	2,7	0,07	18,5	0,3
12	0,133	0,85	2,2	0,06	17,5	0,31
13	0,115	0,7	1,3	0,02	9	0,31
14	0,19	1	3,1	0,08	19,5	0,33
15	0,076	0,95	2,5	0,09	16	0,34
16	0,11	0,8	1,8	0,03	8,5	0,35
17	0,087	0,7	2,0	0,04	10	0,36
18	0,14	0,9	1,4	0,02	12,5	0,37
19	0,185	1	1,2	0,06	16,5	0,38
20	0,127	0,8	1,8	0,05	11	0,39
21	0,099	0,65	1,9	0,03	13,5	0,3
22	0,17	0,9	2,6	0,07	15,5	0,33
23	0,118	0,85	1,5	0,08	12	0,35
24	0,095	1	3,0	0,04	17	0,37
25	0,12	0,7	2,1	0,05	20	0,39

## 4. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Теоретические сведения

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

Параметр потока отказов цепи:

$$\omega_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (4.1)$$

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

Среднее время восстановления цепи:

$$T_{\text{вц}} = \frac{1}{\omega_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n \omega_i T_{\text{в}i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{\text{в}i}$  – среднее время восстановления  $i$ -го элемента цепи.

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

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

$$\omega_{\text{ц}}^{(m)} = \left( \prod_{j=1}^m \omega_j \cdot T_{\text{в}j} \right) \cdot \left( \sum_{j=1}^m T_{\text{в}j}^{-1} \right), \quad (4.3)$$

среднее время восстановления цепи:

$$T_{\text{вц}}^{(m)} = \left( \sum_{j=1}^m T_{\text{в}j}^{-1} \right)^{-1}. \quad (4.4)$$

Для структуры, состоящей из двух параллельно соединённых элементов 1 и 2, частота отказов:

$$\omega_{\text{ц}}^{(2)} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2}) \quad (4.5)$$

или

$$\omega_{\text{ц}}^{(2)} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2}) \cdot 8760^{-1}, \quad (4.6)$$

среднее время восстановления

$$T_{\text{вц}}^{(2)} = T_{\text{в}1} \cdot T_{\text{в}2} \cdot (T_{\text{в}1} + T_{\text{в}2})^{-1}. \quad (4.7)$$

### 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

$$\omega_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{п}i}, \quad (4.8)$$

при среднем времени обслуживания (преднамеренного отключения)

$$T_{\text{пс}} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{\text{п}i} T_{\text{п}i}}{\omega_{\text{пс}}}, \quad (4.9)$$

где  $\omega_{\text{п}i}$ ,  $T_{\text{п}i}$  – 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 распреустройства). 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

$$g_{i/\delta} = \frac{m_{i/\delta}(t)}{M_i(t)}, \quad (4.10)$$

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

$$\omega_{\text{пс}} = \omega_{\delta} + \sum_{i=1, i \neq \delta}^n \omega_i \cdot (1 - g_{i/\delta}), \quad (4.11)$$

среднего времени преднамеренных отключений

$$T_{\text{пс}} = (\omega_{\text{пс}})^{-1} \times \left[ \omega_{\text{пб}} \cdot T_{\text{пб}} + \omega_{\text{п(max)}} \cdot (T_{\text{п(max)}} - T_{\text{пб}}) + \sum_{i=1, i \neq 6}^n \omega_{\text{пи}} \cdot T_{\text{пи}} \cdot (1 - g_{i/6}) \right], \quad (4.12)$$

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

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

$n$  – число элементов в цепочке.

Формулами (4.11) и (4.12) пользуются, когда система не эквивалентирована. После эквивалентирования элементов преднамеренные отключения считаются независимыми событиями и применяются формулы (4.8), (4.9).

#### Задача № 4.1

Система передачи электроэнергии, представленная на рис. 4.1, состоит из следующих элементов: повышающего трансформатора Т1, линии электропередачи Л, длиной 45 км, понижающего трансформатора Т2, отказы которых независимы.



Рис. 4.1. Схема системы передачи электроэнергии

Параметры потока отказов элементов и средние времена их восстановления приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### Показатели надёжности элементов сети

Показатель надёжности	Элемент сети		
	Т1	Л	Т2
$\omega$ , 1/год	0,016	0,02*	0,021
$T_{\text{в}}$ , ч	370	30	440

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

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

## Решение

1. Параметр потока отказов линии электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{\text{л}} = \omega_0 \cdot l = 0,02 \cdot 45 = 0,9 \text{ 1/год.}$$

2. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами

$$\omega_{\text{с}} = \sum_{i=1}^3 \omega_i = \omega_{\text{Т1}} + \omega_{\text{л}} + \omega_{\text{Т2}} = 0,016 + 0,9 + 0,021 = 0,937 \text{ 1/год.}$$

3. Среднее время восстановления системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned} T_{\text{вс}} &= \frac{\omega_{\text{Т1}} T_{\text{вТ1}} + \omega_{\text{л}} T_{\text{вл}} + \omega_{\text{Т2}} T_{\text{вТ2}}}{\omega_{\text{с}}} = \\ &= \frac{(0,016 \cdot 370 + 0,9 \cdot 30 + 0,021 \cdot 440)}{0,937} = 44,99 \text{ ч.} \end{aligned}$$

4. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_{\text{с}} = \frac{\omega_{\text{с}} \cdot T_{\text{вс}}}{8760} = \frac{0,937 \cdot 44,99}{8760} = 4,81 \cdot 10^{-3}.$$

## Задача № 4.2

Система передачи электроэнергии потребителю, представленная на рис. 4.2, состоит из следующих элементов: генератора  $\Gamma$ , повышающего трансформатора  $\text{T1}$ , линии электропередачи  $\text{Л}$ , понижающего трансформатора  $\text{T2}$ , отказы которых независимы.

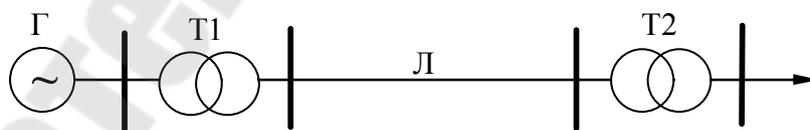


Рис. 4.2. Схема системы передачи электроэнергии

Параметры потока отказов элементов и средние времена их восстановления те же, что и в задаче № 4.1; для генератора  $\omega_{\text{Г}} = 0,9 \text{ 1/год}$ ,  $T_{\text{вГ}} = 190 \text{ ч}$ .

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

## Решение

1. Параметр потока отказов системы

$$\omega_c = \omega_r + \omega_{T1} + \omega_{Л1} + \omega_{T2} = 1,9 + 0,016 + 0,9 + 0,021 = 2,837 \text{ 1/год.}$$

2. Среднее время восстановления системы

$$T_{вс} = \frac{(1,9 \cdot 190 + 0,016 \cdot 370 + 0,9 \cdot 30 + 0,021 \cdot 440)}{2,837} = 142,11 \text{ ч.}$$

3. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{вс}}{8760} = \frac{2,837 \cdot 142,11}{8760} = 4,6 \cdot 10^{-2}.$$

## Задача № 4.3

Потребитель получает электроэнергию по линиям электропередачи Л1 и Л2, отказы которых независимы. Каждая линия пропускает всю необходимую потребителю мощность. Длина линий составляет  $l_1 = 50 \text{ км}$ ,  $l_2 = 55 \text{ км}$ .

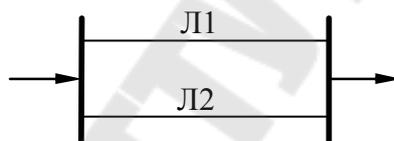


Рис. 4.3. Схема системы передачи электроэнергии

Удельные параметры потока отказов линий и средние времена их восстановления приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

### Показатели надёжности

Показатель надёжности	Элемент сети	
	Л1	Л2
$\omega_0$ , 1/км·год	0,018	0,02
$T_{в}$ , ч	12	16

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

## Решение

1. Параметры потока отказов линий электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{л1} = \omega_{01} \cdot l_1 = 0,018 \cdot 50 = 0,9 \text{ 1/год};$$

$$\omega_{л2} = \omega_{02} \cdot l_2 = 0,02 \cdot 55 = 1,1 \text{ 1/год}.$$

2. Параметр потока отказов системы с двумя параллельно соединенными элементами

$$\omega_c = \omega_{л1} \cdot \omega_{л2} \cdot \left( \frac{T_{вл1} + T_{вл2}}{8760} \right) = 0,9 \cdot 1,1 \cdot \left( \frac{12 + 16}{8760} \right) = 3,16 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}.$$

3. Среднее время восстановления системы с двумя параллельно соединенными элементами

$$T_{вс} = \frac{T_{вл1} \cdot T_{вл2}}{T_{вл1} + T_{вл2}} = \frac{12 \cdot 16}{12 + 16} = 6,86 \text{ ч}.$$

4. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{вс}}{8760} = \frac{3,16 \cdot 10^{-3} \cdot 6,86}{8760} = 2,47 \cdot 10^{-6}.$$

## Задача № 4.4

Определить показатели надёжности участка электрической сети, представленного на рис. 4.4, с учётом преднамеренных отключений. За базовый элемент принята ВЛ 110 кВ. Показатели надёжности элементов, коэффициенты совпадения приведены в табл. 4.3. Длина ВЛ 110 кВ составляет 35 км.

Таблица 4.3

### Исходные данные

Элемент	$\omega$ , 1/год	$T_v$ , ч	$\omega_n$ , 1/год	$T_n$ , 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.

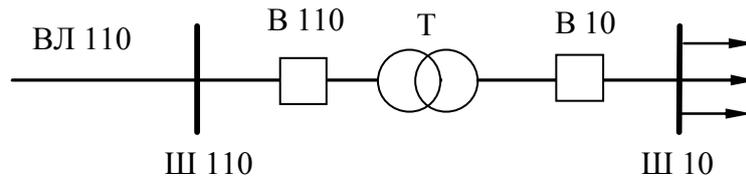


Рис. 4.4. Схема участка электрической сети

### Решение

1. Составляем схему замещения для расчёта надёжности – см. рис. 4.5.



Рис. 4.5. Схема замещения

2. Параметр потока отказов линии электропередачи протяженностью  $l$

$$\omega_{л} = \omega_0 \cdot l = 0,08 \cdot 35 = 2,8 \text{ 1/год.}$$

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

шин 10 кВ –  $\omega_{ш}^{10} = 0,001 \cdot 4 = 0,004$ .

3. Параметр потока отказов системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned} \omega_c &= \omega_{ВЛ}^{110} + \omega_{ш}^{110} + \omega_{В}^{110} + \omega_{Т} + \omega_{В}^{10} + \omega_{ш}^{10} = \\ &= 2,8 + 0,002 + 0,02 + 0,03 + 0,015 + 0,004 = 2,871 \text{ 1/год.} \end{aligned}$$

4. Среднее время восстановления системы с последовательно соединенными элементами

$$\begin{aligned} T_{вс} &= \frac{\sum_{i=1}^6 \omega_i T_{вi}}{\omega_c} = \\ &= \frac{(2,8 \cdot 6 + 0,002 \cdot 4 + 0,02 \cdot 5,5 + 0,03 \cdot 25 + 0,015 \cdot 5 + 0,004 \cdot 3,5)}{2,871} = \\ &= 6,185 \text{ ч.} \end{aligned}$$

5. Средняя вероятность отказа системы

$$Q_c = \frac{\omega_c \cdot T_{вс}}{8760} = \frac{2,871 \cdot 6,185}{8760} = 2,03 \cdot 10^{-3}.$$

6. Частота преднамеренных отключений с учётом коэффициента совпадения и базового элемента ВЛ 110 кВ

$$\omega_{пс} = \omega_{\bar{6}} + \sum_{i=1, i \neq 6}^6 \omega_i \cdot (1 - g_{i/\bar{6}}) = 2,0 + [0,1 \cdot (1 - 0,6) + 0,2 \cdot (1 - 0,8) + 0,3 \cdot (1 - 0,6) + 0,15 \cdot (1 - 0,75) + 0,12 \cdot (1 - 0,75)] = 2,268 \text{ 1/год.}$$

7. Среднее время преднамеренных отключений

$$T_{пс} = (\omega_{пс})^{-1} \cdot [\omega_{п\bar{6}} \cdot T_{п\bar{6}} + \omega_{п(max)} \cdot (T_{п(max)} - T_{п\bar{6}}) + \sum_{i=1, i \neq 6}^n \omega_{пi} \cdot T_{пi} \cdot (1 - g_{i/\bar{6}})] =$$

$$= \frac{1}{2,268} \cdot [2 \cdot 6,5 + 0,3 \cdot (10 - 6,5) + 0,1 \cdot 5 \cdot (1 - 0,6) + 0,2 \cdot 5 \cdot (1 - 0,8) + 0,3 \cdot 10 \cdot (1 - 0,6) + 0,15 \cdot 4 \cdot (1 - 0,75) + 0,12 \cdot 4 \cdot (1 - 0,75)] = 7,02 \text{ ч.}$$

Если бы не учитывали взаимного влияния преднамеренных отключений, то получили бы следующие показатели надёжности

$$\omega_{пс} = \sum_{i=1}^6 \omega_{пi} = 2,0 + 0,1 + 0,2 + 0,3 + 0,15 + 0,12 = 2,87 \text{ 1/год;}$$

$$T_{пс} = \frac{\sum_{i=1}^6 \omega_{пi} T_{пi}}{\omega_{пс}} =$$

$$= \frac{(2 \cdot 6,5 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 10 + 0,15 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4)}{2,87} = 6,47 \text{ ч.}$$

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачи 4.1-4.3 самостоятельно. Исходные данные по вариантам представлены в табл. 4.1. Принять  $l = l_1$ ,  $\omega_{0л1} = \omega_{0л2} = \omega_{0л}$ .

Таблица 4.1

## Исходные данные для расчёта показателей надёжности схем электрических систем

Вариант	$\omega_{Г1},$ 1/ГОД	$\omega_{0Л},$ 1/(КМ·ГОД)	$l_1,$ КМ	$l_2,$ КМ	$\omega_{Г2},$ 1/ГОД	$T_{ВГ1},$ Ч	$T_{ВЛ},$ Ч	$T_{ВГ2},$ Ч	$\omega_{Г},$ 1/ГОД	$T_{ВГ},$ Ч	$T_{ВЛ1},$ Ч	$T_{ВЛ2},$ Ч
1	0,015	0,017	35	30	0,017	400	19	380	1,5	210	19	23
2	0,017	0,018	40	35	0,018	390	15	370	2,0	205	15	18
3	0,019	0,019	45	40	0,020	380	20	360	1,85	190	20	19
4	0,021	0,020	50	45	0,023	370	22	350	1,65	215	22	24
5	0,023	0,021	55	50	0,025	360	17	340	1,9	220	17	20
6	0,025	0,022	60	55	0,026	350	16	345	2,15	180	16	17
7	0,016	0,023	65	60	0,018	340	24	330	1,7	230	24	26
8	0,018	0,024	70	65	0,019	330	21	310	2,2	175	21	24
9	0,020	0,025	75	70	0,021	320	18	300	1,8	195	18	22
10	0,022	0,026	80	75	0,023	310	26	290	1,6	200	26	23
11	0,020	0,015	75	80	0,021	350	24	360	2,3	230	24	22
12	0,025	0,016	70	75	0,023	410	30	420	1,6	190	30	25
13	0,017	0,017	65	70	0,025	450	27	460	2,0	200	27	27
14	0,019	0,018	60	65	0,015	360	25	380	1,8	185	25	21
15	0,022	0,019	55	60	0,019	480	30	460	2,25	210	30	24
16	0,015	0,020	50	55	0,017	380	31	400	1,5	195	31	30
17	0,018	0,021	45	50	0,022	470	28	450	1,9	215	28	27
18	0,021	0,022	40	45	0,016	370	26	360	1,7	180	26	25
19	0,016	0,023	35	40	0,018	400	29	390	2,1	205	29	26
20	0,022	0,024	30	35	0,020	420	32	430	1,55	220	32	30
21	0,017	0,015	40	45	0,02	450	20	430	1,7	175	20	21
22	0,019	0,017	50	55	0,018	470	25	450	1,95	200	25	26
23	0,021	0,019	60	65	0,016	490	30	470	2,0	210	30	32
24	0,023	0,021	70	75	0,015	350	27	330	1,6	180	27	29
25	0,025	0,023	80	85	0,019	380	23	360	2,1	230	23	25

## 5. СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ

### Задача № 5.1

На рис. 5.1 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.

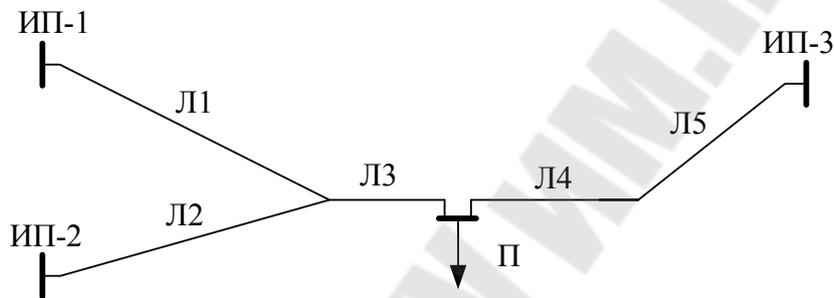


Рис. 5.1. Схема электрической сети  
ИП – источник питания; Л – линия; П – потребитель

### Решение

1. Составляем структурную схему электрической сети, объединив источники питания и заменив линии блоками, связанными между собой (рис. 5.2, а). Последовательность преобразований исходной схемы представлена на рис. 5.2, б, в, г.

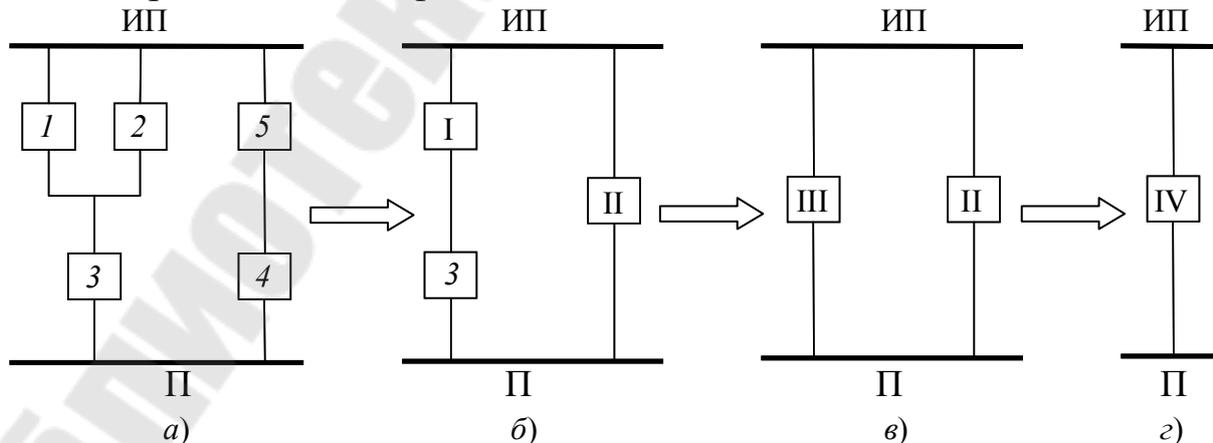


Рис. 5.2. Структурная схема электрической сети (а) и этапы её преобразования (б, в, г)

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. 5.2, а, б):

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

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

$$Q_I = \frac{\omega_I \cdot T_{BI}}{8760} = \frac{0,23 \cdot 9}{8760} = 2,36 \cdot 10^{-4}.$$

3. Находим показатели надёжности блока II (последовательное соединение блоков 5 и 4 – рис. 5.2, 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. 5.2, б, в):

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

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

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

5. Находим показатели надёжности схемы, т.е. блока IV (параллельное соединение блоков III и II – рис. 5.2, в, з):

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

$$T_{вс} = T_{вIV} = \frac{T_{вIII} \cdot T_{вII}}{T_{вIII} + T_{вII}} = \frac{17,46 \cdot 18}{17,46 + 18} = 8,86 \text{ ч};$$

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

### Задание для самостоятельной работы

Решить задачу № 5.1 самостоятельно. Исходные данные по вариантам: удельный параметр потока отказов для вариантов 1-12  $\omega_{0i} = 0,03 \text{ 1/(км} \cdot \text{год)}$ ; для вариантов 13-25  $\omega_{0i} = 0,04 \text{ 1/(км} \cdot \text{год)}$ ; среднее время восстановления для вариантов 1-12 –  $T_{вi} = 21 \text{ ч}$ ; для вариантов 13-25 –  $T_{вi} = 25 \text{ ч}$ ; длины линий по вариантам представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Длины линий, км

Вариант	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5
1	45	30	40	70	50
2	150	160	105	190	170
3	80	95	75	100	90
4	120	100	115	90	135
5	50	60	80	75	100
6	40	55	65	80	70
7	90	75	105	120	135
8	170	150	140	130	170
9	140	125	100	115	120
10	100	110	90	145	130
11	60	70	80	100	115
12	190	170	165	140	150
13	75	80	120	155	140
14	85	60	50	25	35
15	140	150	80	45	60
16	185	160	140	65	60
17	95	105	80	85	70
18	55	70	90	105	110
19	110	120	70	35	50

Окончание табл. 5.1

Вариант	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5
20	105	80	90	55	65
21	135	115	100	75	80
22	65	50	70	90	100
23	110	90	65	80	75
24	130	105	90	70	85
25	180	160	120	60	55

## 6. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

### Теоретические сведения

Статистическая оценка вероятности безотказной работы  $P(t)$

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (6.1)$$

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

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

Статистическая оценка вероятности отказа  $Q(t)$

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (6.2)$$

**Частота отказов**  $a(t)$  – производная от вероятности отказа

$$a(t) = Q'(t) = -P'(t). \quad (6.3)$$

Для определения величины  $a(t)$  используется следующая статистическая оценка:

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (6.4)$$

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

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

$\Delta t$  – интервал времени.

Точность статистической оценки (6.4) возрастает с увеличением первоначального числа наблюдаемых элементов и уменьшением временного интервала  $\Delta t$ .

**Интенсивность отказов**  $\lambda(t)$  представляет собой вероятность отказа неремонтируемого изделия в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до этого момента не возник. Численно она равна среднему числу отказов в единицу времени на один объект из количества объектов  $n(t_{\text{отк}} > t)$  не отказавших до произвольного, но фиксированного времени  $t$ .

$$\lambda(t) = \frac{n(t < t_{\text{отк}} \leq t + \Delta t)}{n(t_{\text{отк}} > t) \cdot \Delta t} \quad (\text{ед. вр}^{-1}). \quad (6.5)$$

Понятие интенсивность отказов устройства в единицу времени используется как количественная характеристика для математического определения надёжности. Эта величина измеряется обычно числом отказов за один час. В литературе часто встречается следующее определение интенсивности отказов: это условная плотность распределения времени безотказной работы для момента времени  $t$  при условии, что до этого момента отказ не произошел (интенсивность появления отказов в единицу времени)

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}, \quad (6.6)$$

где  $a(t)$  – частота отказов элемента;

$P(t)$  – вероятность безотказной работы элемента.

Так как  $P(t) \leq 1$ , то всегда  $\lambda(t) \geq a(t)$ .

Со статистической точки зрения интенсивность отказов  $\lambda(t)$  – отношение числа отказавших элементов за некоторый промежуток времени к числу работоспособных элементов в начале этого промежутка.

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad (6.7)$$

или

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta t}, \quad (6.8)$$

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.

$N_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \left( N_{t-\frac{\Delta t}{2}} + N_{t+\frac{\Delta t}{2}} \right)$  – среднее число исправно работающих элементов в интервале  $\Delta t$ .

На рис. 6.1 представлена типичная зависимость  $\lambda(t)$ .

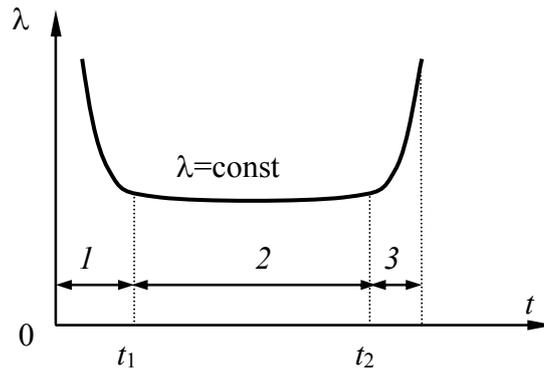


Рис. 6.1. Зависимость интенсивности отказов объекта в функции времени:  
 зона 1 – период приработки элемента;  
 зона 2 – период нормальной эксплуатации элемента ( $\lambda=\text{const}$ );  
 зона 3 – период износа элемента

Различие между частотой и интенсивностью отказов в том, что первый показатель характеризует вероятность отказа за интервал  $(t, t + \Delta t)$  элемента, взятого из группы элементов произвольным образом, причем неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится выбранный элемент. Второй показатель характеризует вероятность отказа за тот же интервал времени элемента, взятого из группы оставшихся работоспособными к моменту  $t$  элементов.

**Среднее время безотказной работы или средняя наработка до отказа  $T$**  – математическое ожидание случайной величины времени безотказной работы элемента до первого отказа, т. е. математическое ожидание наработки до первого отказа.

По статистическим данным среднее время наработки элемента ЭС до отказа определяется из выражения:

$$\tau^* = T^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (6.9)$$

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

$N_0$  – общее число элементов взятых для испытания.

**Коэффициент готовности  $K_T$**  – вероятность того, что объект работоспособен в произвольный момент времени

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_{\text{в}}}. \quad (6.10)$$

Коэффициент готовности имеет смысл надёжностного коэффициента полезного действия, т. к. числитель представляет полезную составляющую, а знаменатель – общие затраты времени.

Коэффициент  $K_{\Gamma}$  оценивает эксплуатационные качества объекта и квалификацию обслуживающего персонала, характеризует готовность объекта (элемента) к работе. Его недостатком является то, что по нему нельзя судить о времени непрерывной работы объекта без отказов.

Статистическая оценка коэффициента  $K_{\Gamma}$ :

$$K_{\Gamma}^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m t_{\text{в}i}}, \quad (6.11)$$

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

$t_{\text{в}i}$  – время восстановления элемента ЭС;

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

**Коэффициент неготовности (вынужденного простоя)  $K_{\text{н}}$**  – вероятность того, что объект неработоспособен в произвольный момент времени

$$K_{\text{н}} = \frac{T_{\text{в}}}{T + T_{\text{в}}}. \quad (6.12)$$

Статистическая оценка  $K_{\text{н}}$ :

$$K_{\text{н}}^* = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\text{в}i}}{\sum_{i=1}^m t_{\text{в}i} + \sum_{i=1}^m t_i}. \quad (6.13)$$

Очевидно, что всегда имеет место равенство:

$$K_{\Gamma} + K_{\text{н}} = 1. \quad (6.14)$$

**Коэффициент оперативной готовности  $K_{\text{ог}}(t, \tau)$**  – вероятность того, что объект (элемент) окажется в работоспособном состоянии в

произвольный момент времени  $t$  и, начиная с этого момента времени, безотказно проработает в течение заданного интервала времени  $\tau$ .

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

$$K_{\text{ог}}(t, \tau) = K_{\text{г}}(t) \cdot P(\tau). \quad (6.15)$$

**Коэффициент технического использования**  $K_{\text{ти}}$  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 работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленном техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T}{T + T_{\text{в}} + T_{\text{о}}}, \quad (6.16)$$

где  $T_{\text{о}}$  – среднее время обслуживания, то есть среднее время нахождения элемента в отключенном состоянии для производства планово-предупредительных ремонтов.

### Задача № 6.1

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 № 6.2

Построить кривую интенсивности отказов по данным табл. 6.1. На испытания поставлено  $N_0 = 200$  элементов, испытания проводились в течение  $t = 100$  ч.

Таблица 6.1

#### 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

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

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

$$\lambda^*(20) = \frac{10}{200 \cdot 10} = 0,005.$$

Результаты расчёта сведены в табл. 6.2.

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. 6.2

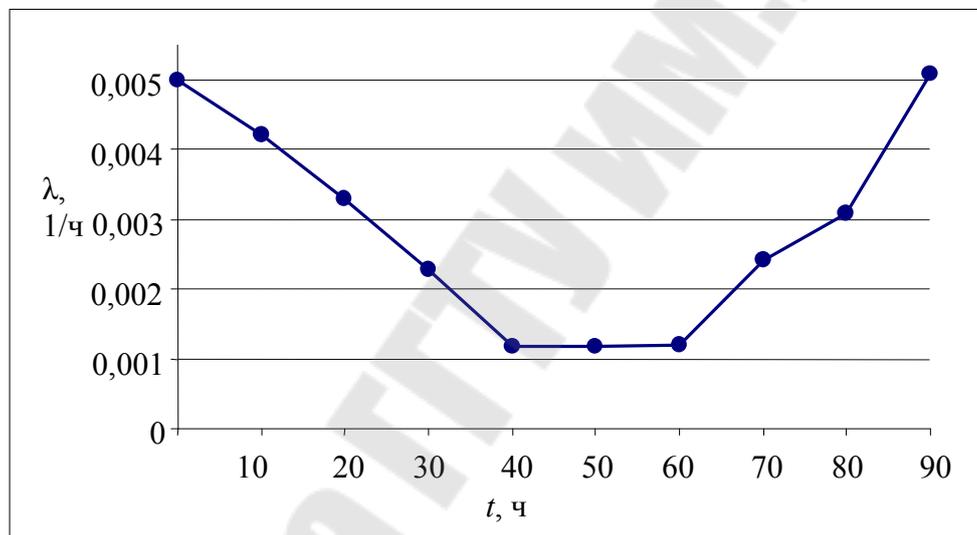


Рис. 6.2. Зависимость  $\lambda(t)$

### Задача № 6.3

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

#### Решение

Коэффициент готовности

$$K_r = \frac{T}{T + T_B} = \frac{200}{200 + 3} = 0,985.$$

### Задача № 6.4

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. 6.3. Определить вероятность безотказной работы за 1000, 1500, 4000, 14000 часов работы ламп.

Таблица 6.3

#### 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

Статистическая оценка вероятности безотказной работы

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}.$$

Тогда вероятность безотказной работы ламп за 1000 ч:

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

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

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

Вероятность безотказной работы ламп за 14000 ч:

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

### Задача № 6.5

По исходным данным задачи № 6.4 определить вероятность отказа ламп за 1000, 1500, 4000, 14000 ч.

#### Решение

Статистическая оценка вероятности отказа

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

Вероятность отказа ламп за 1000 ч:

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

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 № 6.6

Определить среднее время безотказной работы ламп по данным задачи № 6.4.

#### Решение

Для определения среднего времени безотказной работы используем формулу из задачи № 6.1

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

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

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

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

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

### Задача № 6.7

Определить зависимость частоты отказов от времени для ламп, установленных в электронном устройстве, по данным задачи № 6.4.

#### Решение

Статистическая оценка частоты отказов

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

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

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

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

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. 6.4.

## 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. 6.3.

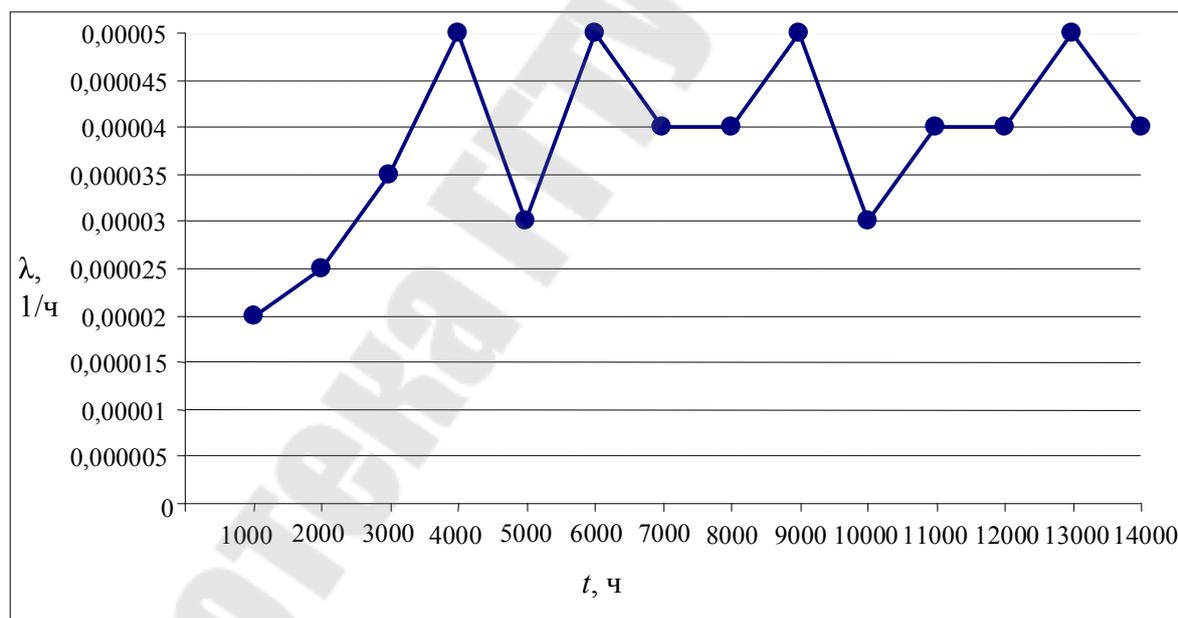


Рис. 6.3. Зависимость  $a(t)$

### Задача № 6.8

При эксплуатации электрических распределительных сетей района их суммарная наработка за год составила 8700 ч, суммарное время ремонта 390 ч и суммарное время технического обслуживания

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

### **Решение**

Введем следующие обозначения: суммарная наработка за год  $T = 8700$  ч, суммарное время ремонта  $T_B = 390$  ч и суммарное время технического обслуживания  $T_0 = 900$  ч.

Тогда коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B} = \frac{8700}{8700 + 390} = 0,957;$$

коэффициент неготовности

$$K_{\text{H}} = \frac{T_B}{T + T_B} = \frac{390}{8700 + 390} = 0,043;$$

коэффициент технического использования

$$K_{\text{ТИ}} = \frac{T}{T + T_B + T_0} = \frac{8700}{8700 + 390 + 900} = 0,871.$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганков В.М. Надежность электрических систем и сетей: Конспект лекций. – Минск: БГПА, 2001. – 152 с.
2. Цыганков В.М. Надежность электрических систем и сетей: Сборник задач. – Минск: БНТУ, 2006. – 134 с.
3. Анищенко В.А. Надежность систем электроснабжения: Учебное пособие. – Минск: УП "Технопринт", 2001. – 160 с.
4. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. – Москва: Высшая школа, 1984. – 256 с.
5. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1974. – 175 с.
6. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 224 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
1. Определение вероятности безотказной работы и вероятности отказа электрической сети .....	4
2. Расчет надежности схем питания потребителей .....	15
3. Количественная вероятностная оценка надёжности электроснабжения потребителей .....	21
4. Расчет показателей надежности схем электрических систем .....	26
5. Составление структурных схем электрической сети и определение показателей надёжности .....	35
6. Статистические показатели эксплуатационной надёжности элементов энергосистемы .....	39
Литература .....	51

**Медведев Константин Михайлович**  
**Пухальская Ольга Юрьевна**

# **НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Практикум**  
**по одноименному курсу**  
**для студентов специальности 1-43 01 02**  
**«Электроэнергетические системы и сети»**  
**дневной формы обучения**

Подписано в печать 29.09.2010.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,01.

Изд. № 29.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе  
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.  
Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого».  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.