

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ЭЛТИ

\_\_\_\_\_ А.П. Суржиков  
« \_\_ » \_\_\_\_\_ 2009 г.

**Н.Г. Волков, А.А. Сивков**

## **Исследование надежности систем электрообеспечения предприятий**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Надежность электрообеспечения»  
для студентов V курса, обучающихся по специальности 140211  
«Электрообеспечение», направления  
140200 «Электроэнергетика»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 658.26:621.31(076.5)

ББК 31.29-5я73

И88

**Волков Н.Г.**

И88 Исследование надежности систем электроснабжения предприятий: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу “Надежность электроснабжения” для студентов V курса, обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение» направления 140200 «Электроэнергетика», / Н.Г. Волков, А.А. Сивков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 23 с.

**УДК 658.26:621.31(076.5)**

**ББК 31.29-5я73**

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
электроснабжения промышленных предприятий ЭЛТИ

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2009 г.

Зав. кафедрой ЭСПП ТПУ

профессор, доктор тех. наук

\_\_\_\_\_ *Б.В. Лукутин*

Председатель учебно-методической  
комиссии

\_\_\_\_\_ *В.И. Готман*

*Рецензент*

Доктор физ.-мат.наук, профессор каф. ЭСПП ТПУ

*А.В. Кабышев*

© Волков Н.Г., Сивков А.А., 2009

© Томский политехнический университет, 2009

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2009

## **Цель работы.**

Практическое ознакомление с основами расчета надежности систем электроснабжения по средним значениям вероятностей состояния элементов.

Исследование влияния параметров надежности элементов электрических схем на надежность функционирования систем электроснабжения.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Современные системы электроснабжения являются частью электроэнергетических систем, которые отличаются от других технических систем не только большими размерами, но и сложным характером взаимосвязей между отдельными элементами и внешней средой, а также между объектами производства и потребления энергии. Одной из основных характеристик системы является надежность, определяющая экономическую эффективность функционирования системы.

Взаимодействие между системой электроснабжения и внешней средой носит вероятностный характер и можно говорить лишь о некоторой вероятности достижения цели - передачи энергии потребителю в требуемом объеме. Под надежностью любого технического объекта будем понимать его способность выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации, а применительно к системам электроснабжения - обеспечение потребителей электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества (напряжения, частоты). Надежность системы электроснабжения сама является одним из показателей качества системы. Однако, этот показатель существенным образом отличается, например, от показателей качества системы по энергии. Если система не обладает необходимой степенью надежности, то все остальные показатели качества теряют свое практическое значение, поскольку они не могут быть полноценно использованы в эксплуатации.

В качестве количественного показателя эффективности принимают отношение реального выходного эффекта к идеальному, т.е. отношение математического ожидания отпущенной потребителю электроэнергии в реальной системе к математическому ожиданию энергии в идеальной по показателям функционирования системе. Количественная оценка эффективности является одним из конечных результатов всех расчетов надежности силовых систем, каковыми являются системы электроснабжения. При этом недоотпуск электроэнергии потребителям, обусловленный отказами элементов оборудования, определяется с учетом реальных характеристик электропотребления. Очевидно, что количественная оценка эффективности системы электроснабжения должна базироваться

на количественных показателях ее надежности. Необходимы методы оценки надежности, позволяющие работать с минимумом исходных данных, в то же время обеспечивающие достоверные результаты, по возможности простые, позволяющие рассматривать достаточно большое количество вариантов. Поэтому в рамках цели данной работы применяется более простой вероятностный метод расчета надежности по средним значениям характеристик элементов схемы.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА РАСЧЕТА ПО СРЕДНИМ ЗНАЧЕНИЯМ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ**

### **2.1 СРЕДНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТА**

Под элементом системы электроснабжения в расчете надежности понимаются отдельные электрические машины и аппараты: генераторы, трансформаторы, выключатели, отделители, короткозамыкатели, разъединители, сборные шины, а также присоединения.

При расчете показателей надежности по средним значениям вероятностей состояния используются следующие статистические данные:

- 1) параметр потока отказов  $\omega$  (при простейшем потоке интенсивность отказов  $\lambda = \omega$ ), т.е. среднее количество отказов в единицу времени (обычно год), отнесенное к одному элементу [1/год]. Для линий электропередач параметр потока отказов относится к 1 км линии [1/км·год];
- 2) среднее время восстановления (аварийного ремонта)  $t_B$  [час/одно восстановление];
- 3) средняя продолжительность преднамеренных отключений элемента (в основном для профилактических ремонтов оборудования)  $t_{п.}$

Ненадежность элемента (средняя вероятность отказового состояния) определяется средней вероятностью его суммарного простоя вследствие вынужденного отключения из-за повреждений и преднамеренных отключений для профилактики.

Вероятность вынужденного простоя элемента и линии

$$q_э = \frac{\omega \cdot t_B}{8760} = \frac{\lambda_0 \cdot t_B}{8760} = \lambda \cdot t_B \quad (2.1)$$

$$q_{л.} = \frac{\lambda_0 \cdot t_B}{8760} L \quad (2.1.1.)$$

где:  $L$  – длина линии, км

Вероятность преднамеренного отключения, если время преднамеренного отключения в течении года  $t_{п.}$ :

$$q_{\pi} = \frac{\lambda_{\pi} \cdot t_{\pi}}{8760} \quad (2.2)$$

Вероятность суммарного простоя

$$q_{\Sigma} = q + q_{\pi} \quad (2.3)$$

Вероятность рабочего состояния

$$p = 1 - q_{\Sigma} = 1 - q - q_{\pi} \quad (2.4)$$

## **2.2 ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВОГО И БЕЗОТКАЗОВОГО СОСТОЯНИЙ СХЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

Если расчетная схема по надежности состоит из последовательно соединенных элементов, то она будет в рабочем состоянии тогда, когда все  $n$  –элементов будут находиться в рабочем состоянии.

Вероятность отказа схемы определяется как вероятность отказа хотя бы одного элемента. Вероятность этого события определяется с использованием формулы для нахождения вероятности суммы совместных событий

$$q_c \cong \sum_{i=1}^n q_i - \sum_{i,j} q_i \cdot q_j + \sum_{i,j,k} q_i \cdot q_j \cdot q_k + \dots + (-1)^{n-1} \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \dots q_n \quad (2.5)$$

Для элементов электрических систем характерными являются соотношения, при которых  $q_i \ll 1$ . Поэтому при определении вероятности отказового состояния системы из  $n$  последовательно соединенных элементов вторым, третьим и т.д. слагаемыми правой части последнего равенства можно пренебречь, как числами более высокого порядка малости. Поэтому в практических расчетах используют формулу

$$q_c \cong \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.6)$$

Если схема последовательно соединенных элементов по надежности соответствует принципиальной электрической схеме соединения элементов, то, учитывая, что в реальных условиях профилактический ремонт элементов последовательной цепи производится одновременно, вероятность простоя цепи следует определять по формуле

$$q_{сп} \cong \sum_{i=1}^n q_i + q_{пнб} = q_c + q_{пнб} \quad (2.7)$$

где:  $q_{пнб}$  - вероятность преднамеренного отключения того из элементов, у которого продолжительность такого состояния наибольшая.

### 2.3 ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВОГО И БЕЗОТКАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СХЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрим схему, состоящую из  $n$  параллельных элементов при условии независимости отказов каждого элемента и пропускной способности каждого, достаточной для обеспечения всей мощности, необходимой потребителю. Такая система будет в рабочем состоянии при условии работы хотя бы одного элемента. Вероятность рабочего состояния схемы определяется с использованием формулы для нахождения вероятности суммы независимых совместных событий - работы каждого элемента

$$P_c = \sum_i P_i - \sum_{i,j} P_i \cdot P_j + \sum_{i,j,k} P_i \cdot P_j \cdot P_k - \dots + (-1)^{n-1} \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_n \quad (2.8)$$

Определение вероятности работы системы с использованием этой формулы весьма трудоемко, так как необходимо вычислить и сложить  $(2^n - 1)$  слагаемых. В результате следует учитывать все слагаемые, так как их значения близки к единице. Поэтому вероятность надежной работы системы проще определить по вероятностям отказового состояния элементов.

Система будет в отказовом состоянии при условии, если все элементы откажут одновременно. Вероятность такого состояния определяется с использованием формулы для произведения (совмещения) независимых событий-отказов каждого элемента системы.

$$q_c = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i \quad (2.9)$$

Вероятность рабочего состояния такой системы определяется как вероятность противоположного события (отказа системы):

$$P_c = 1 - q_c = 1 - \prod_{i=1}^n q_i \quad (2.10)$$

Рассмотрим методику определения вероятности отказового состояния системы, состоящей из  $n$  параллельно соединенных элементов с учетом преднамеренных отключений отдельных элементов. Причем, одновременно преднамеренно может быть отключено не более одного элемента и во время аварийного восстановления преднамеренные отключения не производятся.

Для определения вероятности отказового состояния такой системы необходимо рассмотреть, помимо вероятности сложного события - отказа всех элементов, также и вероятности  $n$  гипотез, в каждой из кото-

рых рассматривается вероятность отказа системы при преднамеренном отключении одного элемента  $q_{ni}$

Так как гипотезы независимы вследствие независимости элементов, то вероятность отказового состояния системы определяется как сумма вероятностей отказовых состояний при каждой гипотезе

$$\begin{aligned}
 q_{\text{сп}} = & \prod_{i=1}^n q_i + q_{n1} \cdot K_{n1} \cdot \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq 1}}^n q_i + q_{n2} \cdot K_{n2} \cdot \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n q_i + \dots \\
 & + q_{nn} \cdot K_{nn} \cdot \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{n-1} q_i = \prod_{i=1}^n q_i + \sum_{j=1}^n q_{nj} \cdot K_{nj} \cdot \prod_{i=1}^n q_i
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

При определении вероятностей отказовых состояний при каждой гипотезе введен коэффициент  $k_{nj} < 1$ , учитывающий понижение вероятности наложения аварийного отключения оставшейся части схемы на преднамеренное отключение  $i$ -го элемента, так как возможно лишь наложение аварии оставшейся части схемы на преднамеренное отключение  $j$ -го элемента и невозможно наложение преднамеренного отключения на аварийное восстановление оставшейся части схемы. Оставшуюся часть схемы после исключения преднамеренно отключаемого элемента целесообразно при каждой гипотезе представить как один эквивалентный элемент со свойствами простейшего потока отказов и восстановлений и с эквивалентными параметрами  $q_{\text{в}}$  и  $\lambda_{\text{в}}$ . Эквивалентное время восстановления оставшейся части схемы определяется в соответствии с формулой (2.1):

$$t_{\text{в.э}} = \frac{8760 \cdot q_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}$$

Значения понижающего коэффициента зависят от отношения времени преднамеренного отключения  $j$ -го элемента ко времени восстановления эквивалентного элемента следующим образом:

$$K_{\text{п}j} = 1 - e^{-\frac{t_{\text{п}j}}{t_{\text{в.э}}}} \tag{2.12}$$

## 2.4 ПОТОКИ ОТКАЗОВ

В системах с последовательным соединением элементов для уменьшения вероятности отключенного состояния и числа перерывов в электроснабжении стремятся совместить преднамеренные отключения элементов с целью профилактических и капитальных ремонтов.

Для приближенных расчетов, в частности проектного характера, коэффициент вынужденного простоя и параметр потока отказов такой цепи, состоящей из  $n$  элементов, равны:

$$K_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_{\text{в}i} + (\lambda_{\text{п}i} \cdot t_{\text{п}i})_{\text{нб}} \quad (2.13)$$

$$\lambda_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i + (\lambda_{\text{п}i})_{\text{нб}} \quad (2.14)$$

где:  $(\lambda_{\text{п}i} \cdot t_{\text{п}i})_{\text{нб}}$  и  $(\lambda_{\text{п}i})_{\text{нб}}$  - соответственно наибольшая из вероятностей преднамеренного отключения цепи из  $n$  элементов и наибольшая из частот преднамеренного отключения элементов.

В системах с резервированием элементов эти параметры определяются по формулам:

$$K_{\text{пс}} = \prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_{\text{в}i} + \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{п}i} \cdot t_{\text{п}i} \cdot K_{\text{п}i} \cdot \prod_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n \lambda_j \cdot t_{\text{в}j} \quad (2.15)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \prod_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n (\lambda_j \cdot t_{\text{в}j} + \lambda_{\text{п}j} \cdot t_{\text{п}j}) \quad (2.16)$$

С использованием основ теории изложенных выше, и будем производить расчеты надежности схем, которые можно привести к последовательно-параллельным или параллельно-последовательным соединениям элементов, и которые представляют очень широкий класс систем электроснабжения промышленных предприятий.

В случае двух параллельных элементов без учета их преднамеренных отключений:

$$\lambda_c = \lambda_1 \cdot q_2 + \lambda_2 \cdot q_1 \quad (2.17)$$

С учетом преднамеренных отклонений:

$$\lambda_c = \lambda_1 \cdot (q_2 + q_{\text{п}2}) + \lambda_2 \cdot (q_1 + q_{\text{п}1}) \quad (2.18)$$

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОРЯДОК РАСЧЕТА

#### 3.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

По условию задачи исходными данными являются:

- принципиальная электрическая схема электроснабжения;
- $\lambda_0$ , [1/км.год, 1/год] - параметры потоков отказов элементов системы;
- $L$ , [км] - длина линий электропередач;
- $t_{\text{в}}$ , [час] - время восстановления элемента;
- $\lambda_{\text{п}}$ , [1/год] - параметр потока преднамеренных отключений элементов сети;

- $t_{п}$ , [час] - время преднамеренного отключения элементов сети.

### 3.2 ЗАДАНИЯ И УСЛОВИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На рисунках 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 приведены схемы электро-снабжения предприятий. Коммутация линий и трансформаторов осуществляется высоковольтными разъединителями и выключателями (на 110 кВ и 10 кВ).

Параметры потоков отказов и преднамеренных отключений элементов системы электроснабжения, средние времена восстановления и длительности преднамеренных отключений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры элементов СЭС

Элемент	$\lambda_o$ , [1/км.год]	L, [км]	$t_b$ , [час]	$\lambda_{п}$ , [1/год]	$t_{п}$ , [час]
B1	0,06	-	15	3,5	32
B2	0,06	-	15	3,5	32
B3	0,02	-	10	1	10
B4	0,02	-	10	1	10
B5	0,02	-	10	1	10
Л1	0,023	80	30	2,2	32
Л2	0,019	30	30	1,8	35
P1	0,015	-	14	0,2	8
P2	0,015	-	14	0,2	8
P3	0,015	-	14	0,2	8
P4	0,015	-	14	0,2	8
P5	0,01	-	10	0,3	6
P6	0,01	-	10	0,3	6
P7	0,01	-	10	0,3	6
P8	0,008	-	6	0,5	4
P9	0,008	-	6	0,5	4
T1	0,016	-	280	0,33	110
T2	0,016	-	280	0,33	110
T3	0,01	-	80	0,3	30
T4	0,01	-	80	0,3	30
T5	0,01	-	80	0,3	30
КЛ1	0,8	0,8	10	0,5	6
КЛ2	0,7	0,6	11	0,5	5
КЛ3	0,6	0,2	12	0,5	4

График нагрузки имеет две ступени:  $S_1 = 80$  мВт;  $S_2 = 60$  мВт. Соответствующие вероятности этих значений  $P_1 = 0,4$ ;  $P_2 = 0,6$ .

При расчетах вероятность отказа сборных шин принимаем равной 0; время оперативных переключений не учитываем; во время аварийного восстановления преднамеренных отключений не производится; вероятности отказов линий и подстанций не зависят от значений нагрузки. Поток отказов элементов простейший.

Задание выдается шифром из двух блоков, каждый из которых состоит из четырех цифр.

В шифре:

- 1 цифра означает номер варианта задания (п. 3.4), который используется для вызова программы расчета вашего варианта;
- 2 цифра - номер, присвоенный элементу схемы в этом варианте, который подлежит преднамеренному отключению;
- 3 цифра - номер исследуемой по ее длине линии;
- 4 цифра - номер элемента схемы в этом варианте, влияние разброса параметров надежности которого исследуется.

### **3.3 ПОРЯДОК РАСЧЕТА**

Расчет осуществляется в следующем порядке:

- принципиальная электрическая схема заменяется на расчетную по надежности;
- для всех элементов расчетной схемы определяются параметры потоков отказов и вероятность отказового состояния (табл. 3.1, формулы 2.1, 2.2);
- последовательно включенные элементы на расчетной схеме заменяются эквивалентным с соответствующим определением параметра потока отказа и вероятности отказового состояния по формулам (2.6),(2.14);
- расчетная схема по надежности сводится к простой схеме с параллельно-последовательным соединением элементов;
- используя формулы (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.6), (2.7), (2.9), (2.11), (2.12), (2.14), (2.16) определяются все интересующие параметры надежности системы для узла нагрузки, относительно которого решается задача;
- оценка влияния элемента цепи на параметры функционирования системы может быть получена просчетом вариантов с вариацией параметров интересующих элементов и сравнением полученных результатов.

В соответствии с шифром задания для узла нагрузки А требуется определить:

1. параметр потока отказа системы электроснабжения с учетом преднамеренных отключений;
2. среднюю вероятность отказа с учетом преднамеренных отключений;
3. среднее время безотказной работы;
4. среднее время восстановления;
5. недоотпуск электроэнергии заводу за год;
6. исследовать влияние на результаты параметров надежности системы электроснабжения отклонения параметров элементов на  $\pm 25\%$ ,  $\pm 50\%$  от средних значений, указанных в таблице 3.1:
  - а) времени преднамеренного отключения элемента, указанного в шифре задания (вторая цифра шифра);
  - б) длины линии электропередач (третья цифра шифра);
  - в) параметров надежности элемента (четвертая цифра шифра).

По результатам исследований построить графики изменения параметров надежности (по пп.1-6) в функции изменяемого параметра.

Эти исследования необходимо провести для двух блоков отдельно. Сделать анализ зависимостей и сопоставление полученных результатов по обоим исследованиям.

### **3.4 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ**

#### **ВАРИАНТ №1**

Схема электроснабжения приведена на рис. №1. Элементам схемы присвоены номера:

Элементы	Л1	КЛ1	КЛ2	T1	T2	B3	P5	T2	T3	T4
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

#### **ВАРИАНТ №2**

Схема электроснабжения приведена на рис. №2. Элементам схемы присвоены номера:

Элементы	Л1	КЛ1	КЛ2	B1	B3	B4	T1	T2	T3	T4
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

#### **ВАРИАНТ №3**

Схема электроснабжения приведена на рис. №3. Элементам схемы присвоены номера:

Эле- менты	Л1	Л2	КЛ1	КЛ3	Р1	Р3	Т1	Р6	Р8	Т5
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

### ВАРИАНТ №4

Схема электроснабжения приведена на рис. №4. Элементом схемы присвоены номера:

Эле- менты	Л1	Л2	КЛ1	КЛ2	В1	Р2	Т2	В3	Р6	Т3
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

### ВАРИАНТ №5

Схема электроснабжения приведена на рис. №5. Элементом схемы присвоены номера:

Эле- менты	Л1	Л2	КЛ1	В2	Р1	Р4	В4	Р5	Т2	Т3
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

### ВАРИАНТ №6

Схема электроснабжения приведена на рис. №6. Элементом схемы присвоены номера:

Эле- менты	Л1	Л2	Л3	В3	Т1	Т2	Р6	Р7	Т3	Т4
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

## 3.5 СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

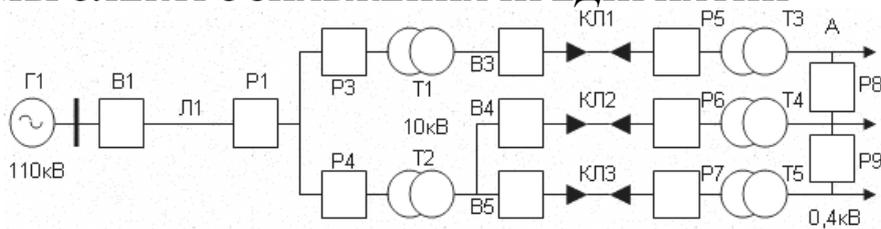


Рис. 3.1

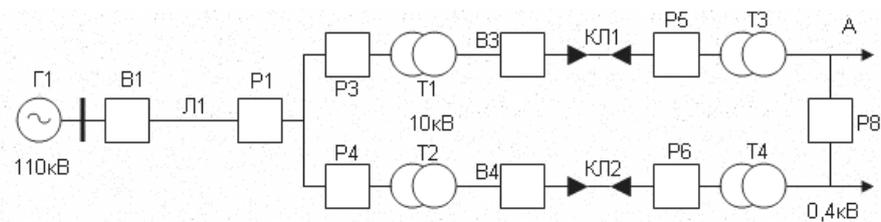


Рис. 3.2



Таблица 4.1. Параметры элементов СЭС

Элемент	$\lambda_o, [1/\text{год}]$	$L, [\text{км}]$	$t_b, [\text{час}]$	$q$	$\lambda_n, [1/\text{год}]$	$t_n, [\text{час}]$
B1	0,06	-	15	1,03E-04	3,5	32
B2	0,06	-	15	1,03E-04	3,5	32
....	....	....	....	....	....	....

Для элементов преднамеренного отключения значения параметра потока преднамеренных отключений, длительности преднамеренного отключения и длины линии определяются из таблицы 4.1 и заносятся в таблицу 4.2. Также в данной таблице производится автоматический подсчет значений  $q_n$  для преднамеренно отключенного элемента схемы.

Если элемент преднамеренного отключения не является линией, то в столбец  $L$  необходимо ввести значение "1".

Таблица 4.2. Параметры отключаемого элемента

Элемент	$\lambda_n, [1/\text{год}]$	$L, [\text{км}]$	$t_n, [\text{час}]$	$q_n$
	0,5	0,8	6	2,74E-04

Для правильности расчетов убедитесь в том, что все ячейки белого цвета заполнены и данные внесенные в эти ячейки верны. Для перехода к следующему этапу выполнения лабораторной работы произведите щелчок левой кнопкой мыши на ярлыке с названием "Условные обозначения".

## 4.2 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

При составлении расчетов приняты следующие обозначения элементов системы электроснабжения:

Таблица 4.3. Элементы СЭС

Элемент	$\lambda_o, [1/\text{год}]$	$L, [\text{км}]$	$t_b, [\text{час}]$	$q$
B1	X_Q1		T_Q1	Q_Q1
B2	X_Q2		T_Q2	Q_Q2
B3	X_Q3		T_Q3	Q_Q3
B4	X_Q4		T_Q4	Q_Q4
B5	X_Q5		T_Q5	Q_Q5
L1	X_L1	L_L1	T_L1	Q_L1
L2	X_L2	L_L2	T_L2	Q_L2
P1	X_QS1		T_QS1	Q_QS1
P2	X_QS2		T_QS2	Q_QS2
P3	X_QS3		T_QS3	Q_QS3

P4	X_QS4		T_QS4	Q_QS4
P5	X_QS5		T_QS5	Q_QS5
P6	X_QS6		T_QS6	Q_QS6
P7	X_QS7		T_QS7	Q_QS7

Продолжение таблицы 4.3. Элементы СЭС

P8	X_QS8		T_QS8	Q_QS8
P9	X_QS9		T_QS9	Q_QS9
T1	X_T1		T_T1	Q_T1
T2	X_T2		T_T2	Q_T2
T3	X_T3		T_T3	Q_T3
T4	X_T4		T_T4	Q_T4
T5	X_T5		T_T5	Q_T5
КЛ1	X_LC1	L_LC1	T_LC1	Q_LC1
КЛ2	X_LC2	L_LC2	T_LC2	Q_LC2
КЛ3	X_LC3	L_LC3	T_LC3	Q_LC3

Таблица 4.4. Элемент преднамеренного отключения

Элемент	$\lambda_n, [1/\text{км}]$	$L, [\text{км}]$	$t_n, [\text{час}]$	$q$
	X_P	L_P	T_P	Q_P

Коэффициент изменения надежности  $K_n$  обозначим как “К”.

Для выполнения следующего этапа лабораторной работы произведите щелчок левой кнопкой мыши на ярлыке с названием "Расчет схемы".

### 5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

В качестве примера приведем расчет для схемы, показанной на рис. 5.1, с тремя характерными случаями поочередного преднамеренного отключения следующих элементов: выключателя В1, трансформатора Т1, кабельной линии КЛ2.

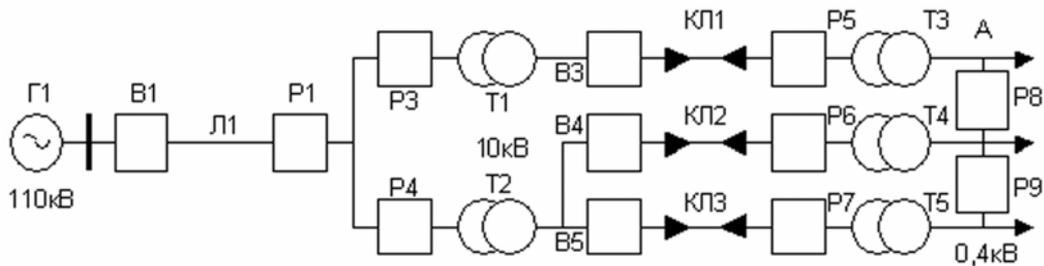


Рис. 5.1 Принципиальная схема

Для удобства расчетов заменим принципиальную схему на рис. 5.1, на элементную с соответствующими надежностными параметрами, которая представлена на рис. 5.2.

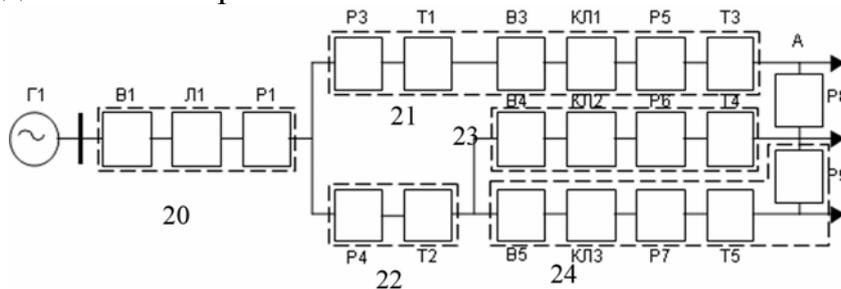


Рис. 5.2 Элементная схема после преобразования схемы на рис. 5.1

Выделим участки с последовательно соединенными элементами пунктирными линиями в эквивалентные блоки и обозначим их 20, 21, 22 в последовательности сверху вниз, слева направо.

Определяем вероятности отказов участков с последовательно - соединенными элементами, выделенные пунктирной линией, как эквивалентные по надежности в соответствии с изложенной методикой. Система будет иметь пять таких участков (блоков).

Заменим последовательно соединенные элементы В1, Л1 и Р1 на элемент №20 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{20} = Q_{В1} + Q_{Л1} + Q_{P1}$$

$$\lambda_{20} = \lambda_{В1} + \lambda_{Л1} \cdot L_{Л1} + \lambda_{P1}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{20} = Q_{Q1} + Q_{L1} + Q_{QS1}$$

$$X_{20} = X_{Q1} + X_{L1} \cdot L_{L1} + X_{QS1}$$

Для правильного ввода формул соблюдайте следующие правила:

- редактирование формулы осуществляется в строке формул или непосредственно в ячейке при помощи клавиши F2 или двойного нажатия на левую кнопку мыши,
- ввод формулы осуществляется только в ячейку белого цвета,
- ввод формулы осуществляется со знака "=",

г) все символы необходимо вводить на английском языке и заглавными буквами.

Заменим последовательно соединенные элементы P3, T1, B3, KЛ1, P5, T3 на элемент №21 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{21} = Q_{P3} + Q_{T1} + Q_{B3} + Q_{KЛ1} + Q_{P5} + Q_{T3}$$

$$\lambda_{21} = \lambda_{P3} + \lambda_{T1} + \lambda_{B3} + \lambda_{KЛ1} \cdot L_{KЛ1} + \lambda_{P5} + \lambda_{T3}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{21} = Q_{QS3} + Q_{T1} + Q_{Q3} + Q_{LC1} + Q_{QS5} + Q_{T3}$$

$$X_{21} = X_{QS3} + X_{T1} + X_{Q3} + X_{LC1} \cdot L_{LC1} + X_{QS5} + X_{T3}$$

Заменим последовательно соединенные элементы P4, T2 на элемент №22 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{22} = Q_{P4} + Q_{T2}$$

$$\lambda_{22} = \lambda_{P4} + \lambda_{T2}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{22} = Q_{QS4} + Q_{T2}$$

$$X_{22} = X_{QS4} + X_{T2}$$

Заменим последовательно соединенные элементы B4, KЛ2, P6, T4 на элемент №23 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{23} = Q_{B4} + Q_{KЛ2} + Q_{P6} + Q_{T4}$$

$$\lambda_{23} = \lambda_{B4} + \lambda_{KЛ2} \cdot L_{KЛ2} + \lambda_{P6} + \lambda_{T4}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{23} = Q_{Q4} + Q_{LC2} + Q_{QS6} + Q_{T4}$$

$$X_{23} = X_{Q4} + X_{LC2} \cdot L_{LC2} + X_{QS6} + X_{T4}$$

Заменим последовательно соединенные элементы B5, KЛ3, P7, T5, P9 на элемент №24 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{24} = Q_{B5} + Q_{KЛ3} + Q_{P7} + Q_{T5} + Q_{P9}$$

$$\lambda_{24} = \lambda_{B5} + \lambda_{KЛ3} \cdot L_{KЛ3} + \lambda_{P7} + \lambda_{T5} + \lambda_{P9}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{24} = Q_{Q5} + Q_{LC3} + Q_{QS7} + Q_{T5} + Q_{QS9}$$

$$X_{24} = X_{Q5} + X_{LC3} \cdot L_{LC3} + X_{QS7} + X_{T5} + X_{QS9}$$

В результате проведенных преобразований расчетная схема упростится до вида представленного на рис 5.3.

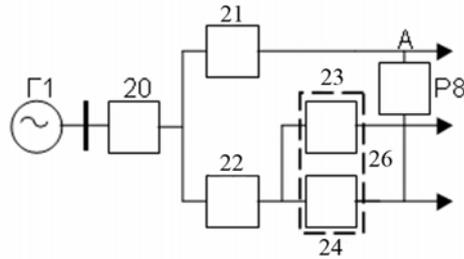


Рис. 5.3 Эквивалентная схема после преобразования схемы на рис. 5.2  
 Заменяем параллельно соединенные элементы №23, №24 на элемент №26 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{26} = Q_{23} \cdot Q_{24}$$

$$\lambda_{26} = \lambda_{23} \cdot Q_{24} + \lambda_{24} \cdot Q_{23}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{26} = Q_{23} \cdot Q_{24}$$

$$X_{26} = X_{23} \cdot Q_{24} + Q_{23} \cdot X_{24}$$

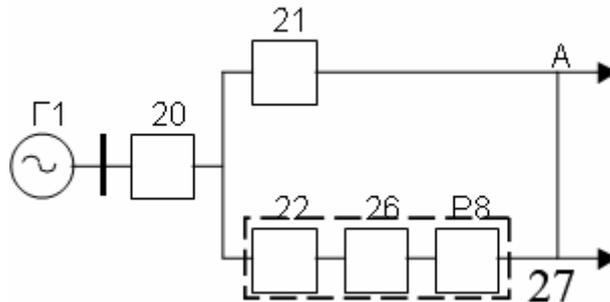


Рис. 5.4 Эквивалентная схема после преобразования схемы на рис. 5.3  
 Заменяем последовательно соединенные элементы №22, №26, P8 на элемент №27 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{27} = Q_{22} + Q_{26} + Q_{P8}$$

$$\lambda_{27} = \lambda_{22} + \lambda_{26} + \lambda_{P8}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{27} = Q_{22} + Q_{26} + Q_{P8}$$

$$X_{27} = X_{22} + X_{26} + X_{P8}$$

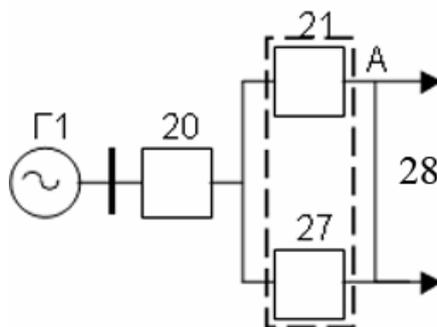


Рис. 5.5 Эквивалентная схема после преобразования схемы на рис. 5.4

Заменяем параллельно соединенные элементы №21, №27 на элемент №28 с эквивалентными параметрами:

$$Q_{28} = Q_{21} \cdot Q_{27}$$

$$\lambda_{28} = \lambda_{21} \cdot Q_{27} + Q_{21} \cdot \lambda_{27}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$Q_{28} = Q_{21} \cdot Q_{27}$$

$$X_{28} = X_{21} \cdot Q_{27} + Q_{21} \cdot X_{27}$$

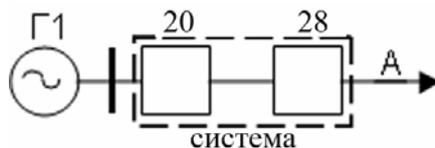


Рис. 5.6 Эквивалентная схема после преобразования схемы на рис. 5.5

Следующим шагом является определение показателей надежности системы в целом с учетом преднамеренного отключения указанных в задании элементов.

**В первом случае** в рассматриваемом примере следует учесть влияние преднамеренного отключения выключателя В1, входящего в эквивалентный элемент 20. Электрическая цепь В1 - Л1 - Р1 не резервируется. При выводе в ремонт В1 электроснабжение узла нагрузки А прерывается на время преднамеренного отключения  $t_{ПВ1}$ . Тогда

$$Q_c = Q_{20} + Q_{ПВ1} + Q_{28}$$

$$\lambda_c = \lambda_{20} + \lambda_{ПВ1} + \lambda_{28}$$

Эквивалентная формула для ввода в ЭВМ выглядит следующим образом:

$$Q_c = Q_{20} + Q_{ПВ1} + Q_{28}$$

$$\lambda_c = \lambda_{20} + \lambda_{ПВ1} + \lambda_{28}$$

**Во втором случае** необходимо учесть влияние преднамеренного отключения трансформатора Т1, входящего в эквивалентный элемент 21. Для этого определим коэффициент  $K_{П}$  изменения вероятности за счет возможного наложения аварии оставшейся части схемы на преднамеренное отключение Т1. Определим вероятность отказов и интенсивность отказов оставшейся части схемы (после исключения Т1 и эквивалентного элемента 21):

$$Q_B = Q_{20} + Q_{27}$$

$$\lambda_B = \lambda_{20} + \lambda_{27}$$

Эквивалентные формулы для ЭВМ:

$$Q_B = Q_{20} + Q_{27}$$

$$\lambda_B = \lambda_{20} + \lambda_{27}$$

Определим эквивалентное время восстановления оставшейся части схемы:

$$t_{вэ} = \frac{8760 \cdot q_{в}}{\lambda_{в}}$$

Определим понижающий коэффициент  $K_{п}$ :

$$K_{пj} = 1 - e^{-\frac{t_{пj}}{t_{вэ}}}$$

Заменим последовательно соединенные элементы 20 и 28 эквивалентными элементами, характеризующими систему в целом, параметры которой определяются как:

$$q_c = q_{20} + q_{27} (q_{21} + K_{п} \cdot q_{пт1})$$

$$\lambda_c = \lambda_{20} + \lambda_{27} (q_{21} + q_{пт1}) + q_{27} \cdot (\lambda_{21} + \lambda_{пт1})$$

Эквивалентные формулы для ЭВМ:

$$q_c = " = Q_{20} + Q_{27} \cdot (Q_{21} + K \cdot Q_{п}) "$$

$$\lambda_c = " = X_{20} + X_{27} \cdot (Q_{21} + Q_{п}) + Q_{27} \cdot (X_{21} + X_{п}) "$$

**В третьем случае** необходимо учесть преднамеренное отключение кабельной линии КЛ2, входящей в 23 - й эквивалентный элемент. Для учета влияния преднамеренного отключения вводится понижающий коэффициент  $K_{п}$ , который определяется по выше приведенной формуле, в которую входит эквивалентное время восстановления  $t_{вэ}$  оставшейся части схемы после вывода в ремонт КЛ2. Это время определяется по эквивалентным параметрам оставшейся части схемы  $q_{в}$  и  $\lambda_{в}$ , которые в данном случае определяются:

$$q_{в} = q_{20} + q_{21} \cdot (q_{22} + q_{24} + q_{п8})$$

$$\lambda_{в} = \lambda_{20} + q_{21} \cdot (\lambda_{22} + \lambda_{24} + \lambda_{п8}) + \lambda_{21} (q_{22} + q_{24} + q_{п8})$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$q_{в} = " = Q_{20} + Q_{21} \cdot (Q_{22} + Q_{24} + Q_{п8}) "$$

$$\lambda_{в} = " = X_{20} + Q_{21} (X_{22} + X_{24} + X_{п8}) + X_{21} \cdot (Q_{22} + Q_{24} + Q_{п8}) "$$



Рис. 5.7 Результирующая эквивалентная схема системы электроснабжения

Заменим последовательно соединения элементы №20, №28 эквивалентным элементом, характеризующим систему в целом с учетом преднамеренного отключения:

$$q_c = q_{20} + q_{21}(q_{22} + (q_{23} \cdot q_{24} + K_{\text{П}} \cdot q_{\text{ПКЛ2}} \cdot q_{24}) + q_{\text{P8}})$$

$$\lambda_c = \lambda_{20} + \lambda_{21}(q_{22} + (q_{23} + q_{\text{ПКЛ2}})q_{24} + q_{\text{P8}}) +$$

$$+ q_{21} \cdot (\lambda_{22} + \lambda_{24} \cdot (q_{23} + q_{\text{ПКЛ2}})) + (\lambda_{23} + \lambda_{\text{ПКЛ2}}) \cdot q_{24} + \lambda_{\text{P8}}$$

Эквивалентными формулами для ввода в ЭВМ являются:

$$q_c = " = Q_{20} + Q_{21} \cdot (Q_{22} + (Q_{23} \cdot Q_{24} + K \cdot Q_{\text{P}} \cdot Q_{24}) + Q_{\text{QS8}})"$$

$$\lambda_c = " = X_{20} + X_{21} \cdot (Q_{22} + Q_{24} \cdot (Q_{23} + Q_{\text{P}}) + Q_{\text{QS8}}) +$$

$$+ Q_{21} \cdot (X_{22} + X_{24} \cdot (Q_{23} + Q_{\text{P}}) + Q_{24} \cdot (X_{23} + X_{\text{P}}) + X_{\text{QS8}})"$$

В каждом варианте следует рассчитать недоотпуск электроэнергии по выражению:

$$\Delta \mathcal{E} = (S'_1 \cdot P_{S1} + S'_2 \cdot P_{S2}) \cdot q_c \cdot 8760$$

После ввода всех выше приведенных формул результаты подсчитываются и выводятся автоматически, например:

Поток отказа системы  $\lambda_c = 1,923428, 1/\text{год}$

Эквивалентное время восстановления оставшейся части схемы после преднамеренного отключения заданного элемента  $t_{\text{вс}} = 29.36679$ , час

Коэффициент понижения надежности системы в связи с преднамеренным отключением заданного элемента  $K_{\text{П}} = 0.184792$

Средняя вероятность отказового состояния  $q_c = 0.006422$ , вероятность

Среднее время восстановления системы  $t_{\text{вс}} = 29.24972$ , час

Среднее время безотказной работы системы  $t_c = 0.519905$ , год

Недоотпуск энергии  $\Delta \mathcal{E} = 3825.661$ , мВт·час

## **6. ИСЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СЭС**

Для оценки влияния параметров надежности элементов на показатели надежности системы ЭС необходимо повторить расчет для интересующего нас элемента при  $n$  возможных значениях его параметра.

Для нашего примера произведем исследование влияния длины линии №1 на показатели надежности системы. Для этого в разделе “Влияние длины линии на параметры надежности системы” произведите щелчок левой кнопкой мыши над названием того элемента, влияние параметра которого необходимо определить. (Например, для линии №1).

После этого произойдет пересчет значений в таблице 6.1, которая будет содержать искомые величины, для построения графических зависимостей.

Таблица 6.1

L, [км]	$\lambda_c$ , [1/год]	$q_c$	$t_{ec}$ , [час]	$t_c$ , [час]	$\Delta \mathcal{E}$
40	0,995000711	0,003503201	30,84223231	1,005024408	2086,786928
60	1,455000711	0,005076927	30,5662253	0,687284888	3024,223808
80	1,915000711	0,006650653	30,42281691	0,522193018	3961,660688
100	2,375000711	0,008224378	30,33496039	0,421052506	4899,097568
120	2,835000711	0,009798104	30,27561461	0,352733598	5836,534448

Расчет влияния времени преднамеренного отключения и потока отказов на параметры надежности системы определяются аналогично.

Для просмотра графиков изменения параметров надежности, произведите щелчок левой кнопкой мыши на ярлыке "Графики".

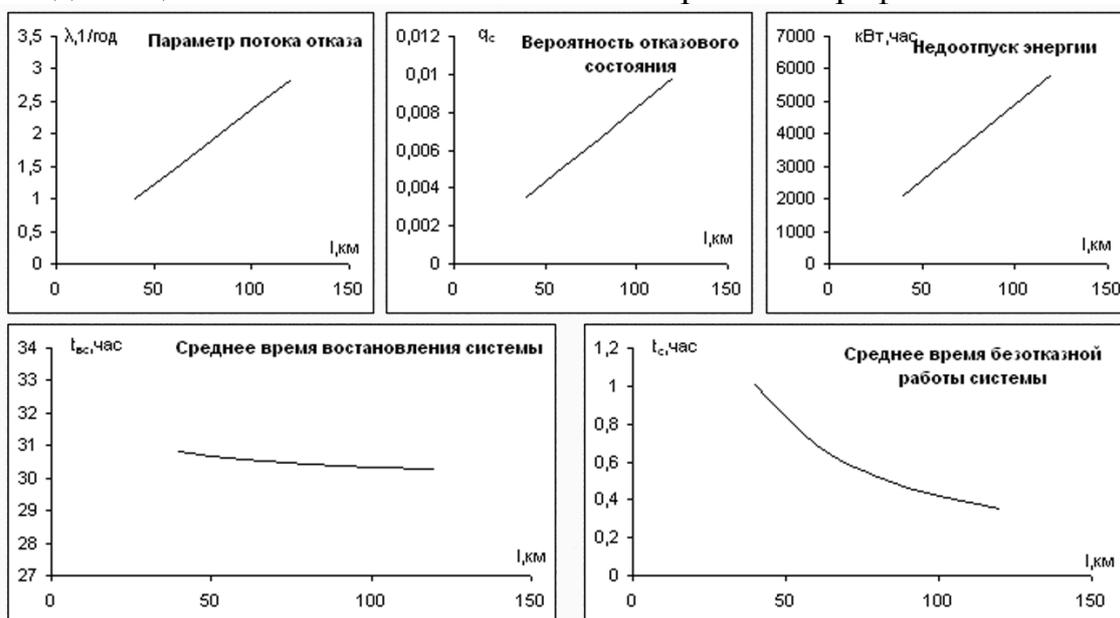


Рис 6.1 Результат исследования в графической форме.

## 7.ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Отчет должен составляться с учетом требований ГОСТ на техническую документацию и в следующем порядке:

- 7.1 Цель работы
- 7.2 Исходный материал (схема электроснабжения, статистические данные, график нагрузки и др.)
- 7.3 Задание
- 7.4 Методика и порядок исследований
- 7.5 Расчет контрольных точек
- 7.6 Результаты исследований (таблицы, графики)
- 7.7 Анализ результатов исследований и выводы.





Учебное издание

ВОЛКОВ Николай Георгиевич  
СИВКОВ Александр Анатольевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Надежность электроснабжения» для студентов V курса,  
обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение»,  
направления 140200 «Электроэнергетика»

Научный редактор  
доктор физ.-мат.наук,  
профессор каф. ЭСПП ТПУ

*А.В. Кабышев*

Верстка

*А.А. Сивков*

Подписано к печати 02.03.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать RISO. Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л.1,21.  
Заказ 147\_09. Тираж 50 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.