

Министерство общего профессионального  
образования Российской Федерации

Ивановский государственный  
энергетический университет

Кафедра безопасности жизнедеятельности

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗ-  
ОПАСНОСТИ  
ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕН-  
НОГО ТОКА  
НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Методические указания  
к лабораторной работе по курсу  
**“Безопасность жизнедеятельности”**

Иваново – 2000  
Составитель: к.т.н., профессор В.И. Дьяков

Редактор: к.т.н., доцент В.П. Строев

Настоящая лабораторная работа выполняется по разделу “Электробезопасность” курса “Безопасность жизнедеятельности” и предусматривает изучение влияния электрических сетей трехфазного тока на поражение людей электрическим током при различных режимах работы и параметрах сетей.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ИФФ.

***Рецензент***

Кафедра безопасности жизнедеятельности  
Ивановского государственного энергетического  
университета

*Цель работы* – исследовать электробезопасность сетей трехфазного тока напряжением до 1000 В; выявить зависимость электробезопасности от режима нейтрали сети, сопротивления изоляции и емкости фаз относительно земли.

### **Содержание работы**

1. Сравнить опасность прикосновения человека к каждой из фаз двух сетей с разными режимами нейтрали (параметры сетей задает преподаватель);
  - а) при нормальном режиме работы сети (человек касается фазы);
  - б) при аварийном режиме работы сети (человек касается фазы при замыкании другой на землю).
2. При нормальном режиме работы сети выявить изменение опасности прикосновения к одной из фаз в зависимости от:
  - а) сопротивления изоляции фазных проводов сети относительно земли при постоянной емкости;
  - б) емкости фазных проводов сети относительно земли при постоянном сопротивлении изоляции (параметры сети задает преподаватель).

### **КРАТКИЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Статистика электротравматизма доказывает, что до 85% смертельных поражений людей электрическим током происходит в результате прикосновения пострадавшего непосредственно к токоведущим частям, находящимся под напряжением. При этом в сетях напряжением до 1000 В величина тока, протекающего через человека, а, следовательно, и опасность поражения зависят прежде всего от режима нейтрали сети, а также от активной и емкостной проводимостей проводов относительно земли.

“Правила устройства электроустановок” (ПУЭ) предусматривают применение при напряжениях до 1000 В лишь двух сетей трехфазного тока: трехпроводной с изолированной нейтралью и четырехпроводной с заземленной нейтралью.

Каждая из этих сетей характеризуется своими технико-экономическими, эксплуатационными и другими показателями и различной степенью электробезопасности.

### **ТРЕХФАЗНАЯ ТРЕХПРОВОДНАЯ СЕТЬ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

При нормальном режиме рассматриваемой сети ток, протекающий через человека в период касания к одной фазе, например фазе I (рис.1), в комплексной форме запишется

$$I_h = U_\phi \cdot Y_h \cdot \frac{Y_2(1 - a^2) + Y_3(1 - a)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_h}, (1)$$

где  $Y_1, Y_2, Y_3$  – полные проводимости изоляции фазных проводов;

$Y_h$  – проводимость тела человека;

$U_\phi$  – фазное напряжение сети;

$a$  – фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз.

На основании выражения (1) оценим опасность прикосновения человека к фазному проводу для следующих случаев.

1) При равенстве сопротивлений изоляции и емкостей проводов относительно земли, т.е. при

$$r_1 = r_2 = r_3 = r;$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = c;$$

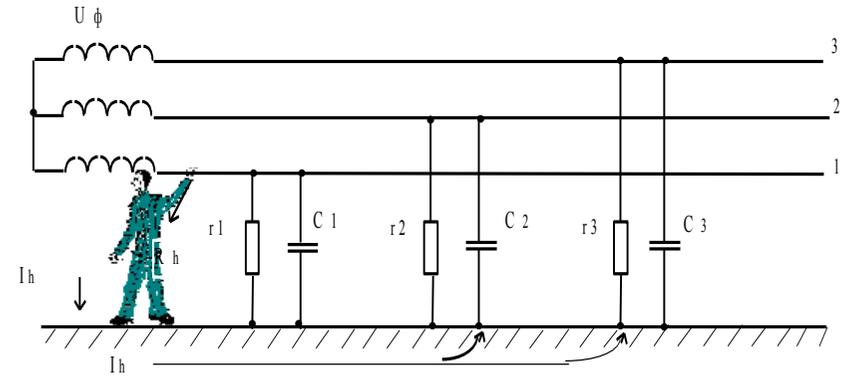


Рис. 1

а, следовательно, при  $Y_1 = Y_2 = Y_3 = Y = \frac{1}{r} + j\omega c$ , ток через человека в комплексной форме будет

$$I_h = \frac{U_{\delta}}{R_h + \frac{1}{3Y}} = \frac{U_{\delta}}{R_h + \frac{Z}{3}}; \quad (2)$$

где  $Z$  – комплекс полного сопротивления провода относительно земли, А.

2) При равенстве сопротивлений изоляции и отсутствии емкостей, т.е. при

$$r_1 = r_2 = r_3 = r;$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = 0;$$

что имеет место в коротких воздушных сетях, ток через человека будет, А,

$$I_h = \frac{3U_{\delta}}{3R_h + r} \quad (3)$$

3) При равенстве емкостей и весьма больших сопротивлений изоляции, т.е. при

$$c_1 = c_2 = c_3 = c;$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = \infty,$$

что может быть в кабельных сетях, будем иметь, А,

$$I_h = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{X_c}{3}\right)^2}}, \quad (4)$$

где  $X_c = \frac{1}{\omega \cdot c}$  – емкостное сопротивление, Ом.

Из выражений (2–4) видно, что в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления проводов относительно земли; с увеличением сопротивления опасность уменьшается. Вместе с тем этот случай менее опасен, чем прикосновение в сети с заземленной нейтралью уравнения (3–4) и (8–9).

При аварийном режиме сети (рис. 2) ток через тело человека будет равен

$$I_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}}{R_h + R_{\text{зп}}}, \quad (5)$$

где  $R_{\text{зп}}$  – сопротивление переходного контакта в месте короткого замыкания провода на землю.

Напряжение прикосновения будет

$$U_{i\delta} = I_h R_h = U_{\delta} \sqrt{3} \frac{R_h}{R_h + R_{\text{зп}}}, \quad (6)$$

Если принять  $R_{\text{зп}} = 0$  или  $R_{\text{зп}} \ll R_h$  (так обычно бывает на практике), то, согласно (6), получим

$$U_{r\delta} = U_{\delta} \cdot \sqrt{3}, (7),$$

т.е. человек окажется под линейным напряжением сети.

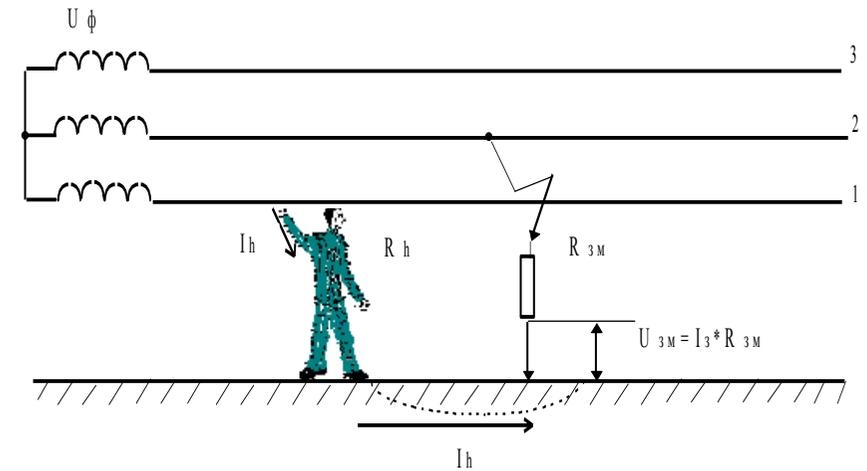


Рис. 2

### ТРЕХФАЗНАЯ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ СЕТЬ С ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

При нормальном режиме рассматриваемой сети ток, протекающий через человека в период касания к одной фазе, например фазе I (рис. 3) будет равен, А,

$$I_h = \frac{U_{\delta}}{R_h + R_3}, (8)$$

где  $R_3$  – сопротивление заземления нейтральной точки трансформатора.

Согласно ПУЭ  $R_3$  не должно превышать 4–10 Ом; сопротивление же тела человека не опускается ниже нескольких сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки в уравнении (8) значением  $R_3$  можно пренебречь, тогда

$$I_h = \frac{U_\delta}{R_h}, \quad (9),$$

т.е. при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью человек оказывается под фазным напряжением  $U_\phi$ .

Из уравнения (9) вытекает еще один вывод: если полные проводимости проводов относительно земли малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, то ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью в период нормальной его работы, практически не изменяется с изменением сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

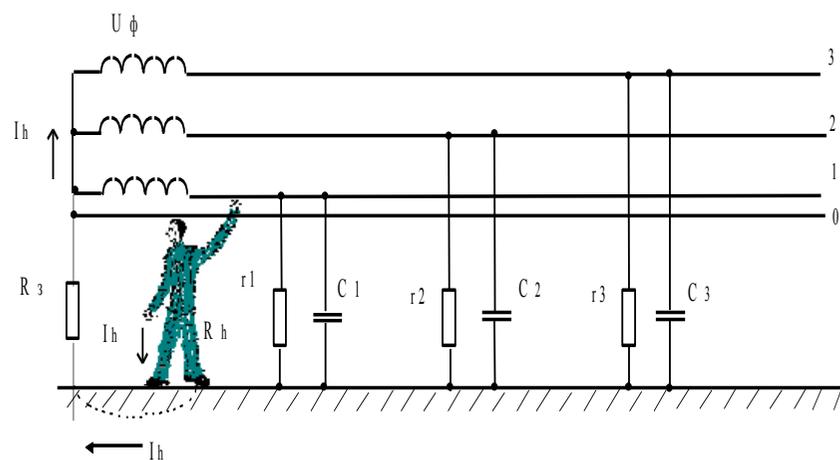


Рис. 3

При аварийном режиме, когда одна из фаз сети, например фаза 2 (рис. 4а), замкнута на землю через малое сопротивление  $R_{3M}$ , напряжение прикосновения будет равно

$$U_{r\delta} = U_\delta R_h \frac{R_{\phi} + R_3 \sqrt{3}}{R_{\phi} R_3 + R_h (R_{\phi} + R_3)}, \quad (10)$$

Ток через человека будет равен

$$I_h = U_{\delta} \frac{R_{\varphi} + R_3 \sqrt{3}}{R_{\varphi} R_3 + R_h (R_{\varphi} + R_3)}, \quad (11)$$

Если принять  $R_{3M} = 0$ , то уравнение (10) примет вид

$$U_{i\delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\delta}, \quad (12)$$

Следовательно, в данном случае человек оказывается под воздействием линейного напряжения сети.

Если принять равным нулю сопротивление заземления нейтрали  $R_3$ , то

$$U_{i\delta} = U_{\delta}, \quad (13)$$

т.е. человек окажется под фазным напряжением.

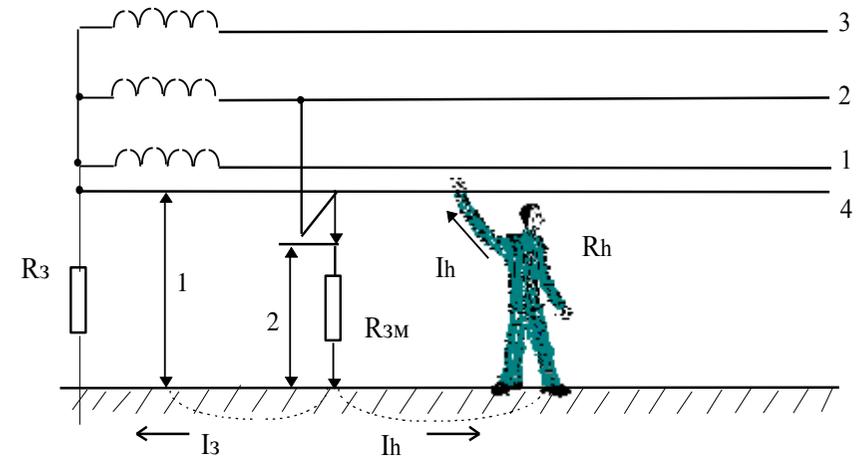


Рис. 4(а)

Однако, в практических условиях сопротивления  $R_{3M}$  и  $R_3$  всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым

оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с заземленной нейтралью, всегда меньше линейного, но больше фазного, (рис. 4б), т.е.

$$U_{\delta} \sqrt{3} > U_{i\delta} > U_{\phi},$$

( 14 )

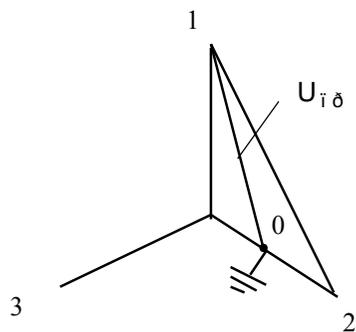


Рис. 4(б)

Таким образом, прикосновение человека к исправному фазному проводу сети с заземленной нейтралью в аварийный период более опасно, чем при нормальном режиме.

### **Выводы:**

1. При нормальном режиме работы сети прикосновение человека к одному из фазных проводов в период нормальной работы более опасно в четырехпроводной сети с заземленной нейтралью.

2. При аварийном режиме работы сети прикосновение человека к одному из фазных проводов в трехпроводной сети с изолированной нейтралью более опасно, чем прикосновение к здоровой фазе четырехпроводной сети с заземленной нейтралью.

### **ВЫБОР СХЕМЫ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В**

При напряжениях до 1000 В распространение получили обе схемы трехфазных сетей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с заземленной нейтралью. По технологическим требованиям предпочтение чаще

отдается четырехпроводной сети, так как она позволяет использовать два рабочих напряжения – линейное и фазное.

По условиям безопасности сети с изолированной нейтралью целесообразно применять в тех случаях, когда возможно поддержание высокого уровня изоляции проводов относительно земли и когда емкость проводов относительно земли незначительна (короткие сети, находящиеся под постоянным надзором, электротехнические лаборатории и т.д.).

Сети с заземленной нейтралью следует применять там, где трудно обеспечить хорошую изоляцию проводов (из-за высокой влажности, агрессивной среды и т.д.), когда нельзя быстро отыскать повреждение изоляции или когда емкостные токи из-за большой протяженности сетей достигают больших значений, опасных для человека (сети крупных предприятий, городские и сельские сети, сети собственных нужд электростанций и т.п.).

### **Экспериментальная часть**

Работа производится на стенде путем моделирования основных параметров исследуемых сетей и определения величины тока, проходящего через человека при его соприкосновении с токоведущими частями. Схема стенда показана на рис. 5. Вместо реально существующих распределенных сопротивлений изоляции и емкостей проводов относительно земли, на стенде предусмотрены сосредоточенные сопротивления и емкости, меняя величину которых, а также соотношение между ними, можно получить сеть с нужными параметрами. Тело человека имитируется в схеме стенда активным сопротивлением, которое может подключаться к каждому проводу сети переключателем.

Изменение тока, проходящего через это сопротивление, производится с помощью миллиамперметра с шунтами.

### **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТЫ**

1. Включать стенд под напряжение только с разрешения преподавателя.

2. Перед каждым измерением величины тока, проходящего через человека, определять ожидаемый предел измерения амперметра.

3. По окончании экспериментов все выключатели на стенде поставить в положение “откл.”.

## **ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Для выявления изменения опасности прикосновения к фазным проводам в сети с разными режимами нейтрали, как в нормальном режиме, так и в аварийном, произвести изменения в следующем порядке.

### **I. Сеть с изолированной нейтралью**

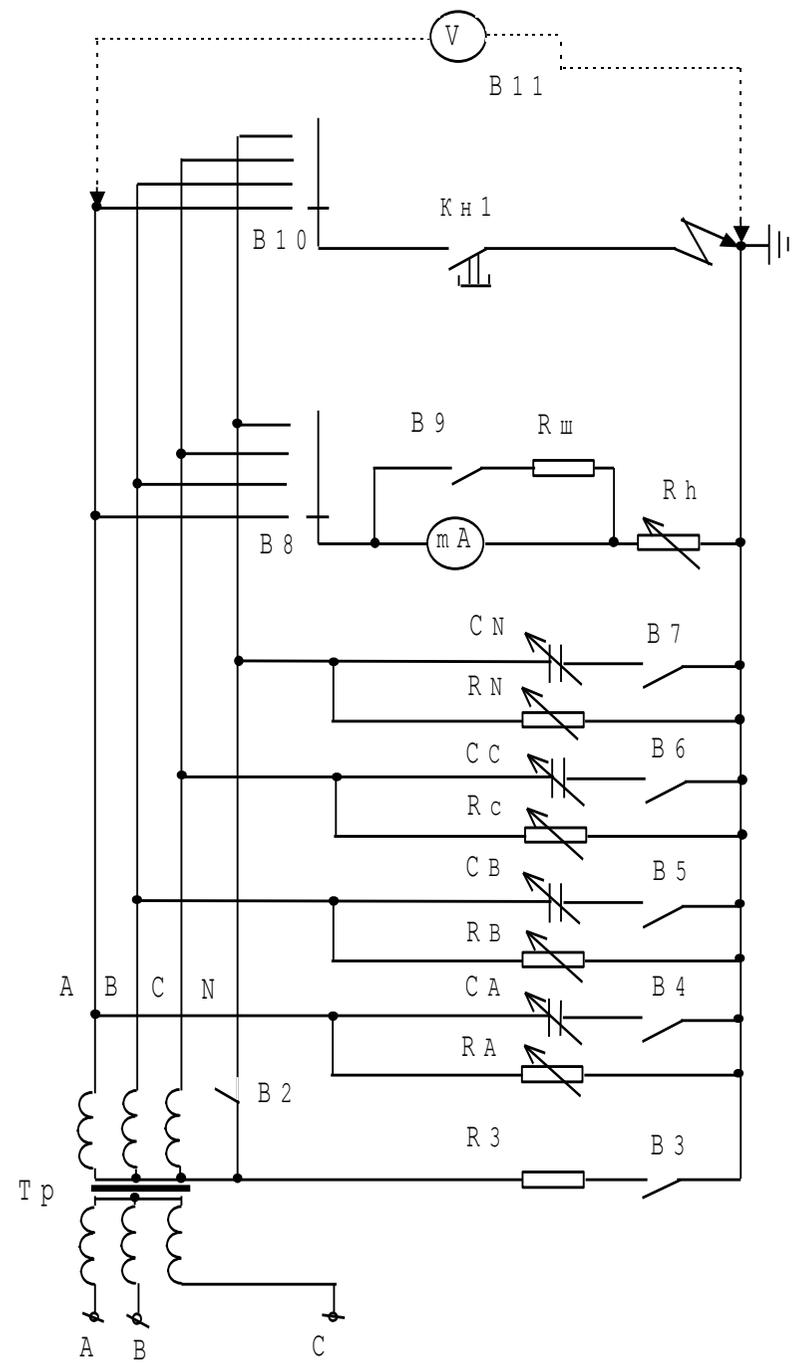
В начале работы все выключатели на стенде поставить в положение “отключено”.

### **НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ**

1. Тумблеры В2, В3, В4, В5, В6, В7 отключить. В этом случае емкости проводов относительно земли равны нулю.

2. С помощью резисторов  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  установить соответствующее сопротивление изоляции проводов относительно земли при  $R_A = R_B = R_C = \dots$ . Сопротивления  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  задаются преподавателем (3÷4 значения).

3. Включить схему под напряжение выключателем В1 “Сеть”.



4. Резистор  $R_h$ , имитирующий сопротивление тела человека, установить в положение, соответствующее заданному значению (задается преподавателем).

5. Переключатель В8 подключить поочередно к фазам А, В, С.

Этим имитируется прикосновение человека, стоящего на земле, к соответствующим фазам, т.е. измеряются токи, проходящие через человека  $I_{h_A}, I_{h_B}, I_{h_C}$ . Показания миллиамперметра занести в таблицу 1.

Исследуемая сеть	Режим работы сети							Ток, проход. через ч-ка		
		$R_A$	$R_B$	$R_C$			$C_C$			
3х-проводная с изолир. нейтралью	Норм. режим работы									

6. С помощью резисторов  $R_A, R_B, R_C$  установить разное сопротивление изоляции проводов относительно земли  $R_A \neq R_B \neq R_C$ . Сопротивления  $R_A, R_B, R_C$  задаются преподавателем (2÷3 значения). Переключить В8, поочередно подключить к фазам А, В, С. Показания миллиамперметра занести в таблицу 1.

7. Произвести замеры токов  $I_h$  и записать их в таблицу 1 при подключении емкости проводов:

а)  $C_A = C_B = C_C = \dots$  (2÷3 значения, задаваемые преподавателем с помощью  $C_A, C_B, C_C$ ).

$R_A, R_B, R_C = \text{const}$  (задается преподавателем; достаточно задать одно значение).

Включить тумблеры В4, В5, В6.

### **АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ**

8. В аварийном режиме работы проделать все аналогично пунктам 1–7. Переключатель В10 поочередно подключать к фазам А, В, С с одновременным кратковременным нажатием кнопочного замыкателя КН1, которые имитируют аварийный режим, т.е. соприкосновение одного фазного провода с землей. Результаты замеров занести в таблицу 1.

По окончании замеров выключить “Сеть”; В1 и все тумблеры и переключатели поставить в выключенное положение.

## **II. Трехфазная четырехпроводная сеть с заземленной нейтралью**

### **НОРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ**

9. Заземлить нейтраль включением тумблеров В2, В3. Произвести все операции аналогично пунктам 5–7 для тех же значений сопротивлений изоляции и емкости. Данные внести в таблицу 1.

### **АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ**

10. В аварийном режиме работы измерения произвести так же, как и в пункте 8 и для тех же значений сопротивлений изоляции и емкости. Данные замеров занести в таблицу 1. По окончании замеров все выключатели и тумблеры поставить в положение “откл”. По данным замеров пунктов 5–9 и таблицы 1 построить зависимость  $I_h = f(R_{\text{изоляция}})$ .

11. Дать заключение:

а) какая из двух исследуемых сетей более опасна в нормальном режиме работы и при замыкании одной фазы на землю;

б) как влияет емкость проводов на опасность поражения электрическим током.

## Вопросы для самопроверки

1. Что такое 3х- и 4х-проводные сети?
2. В каких случаях применяются 3х- и 4х-проводные сети?
3. Что такое нормальный и аварийный режим работы сетей?
4. Напишите формулы величины тока, проходящего через человека при касании к фазе в 3х- и 4х- проводных сетях?
5. Как влияет на величину тока человека сопротивление изоляции (емкости) проводов в 3х- и 4х-проводных сетях?
6. Значение защитных электротехнических средств при эксплуатации 3х- и 4х-проводных сетей. Значение сопротивления подошвы обуви и пола?
7. Под какое напряжение попадает человек в 3х- и 4х-проводных сетях в аварийном режиме работы?
8. Какая из сетей (3х- или 4х-проводная) более опасна при нормальном и аварийном режиме работы?
9. К какому фазному проводу 3х-проводной сети прикосновение опаснее, если провода имеют различные сопротивления изоляции относительно земли ?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1979 – 408 с.
2. Охрана труда в электроустановках / под ред. проф. Б.А. Князевского – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Охрана труда в машиностроении / под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова – М. : Машиностроение, 1983.