

Министерство науки и высшего образования РФ  
Филиал ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический  
университет» в поселке Яблоновском  
(Филиал ФГБОУ ВО «МГТУ» в пос. Яблоновском)

*Кафедра транспортных процессов и техносферной безопасности*

# **ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Методические указания по выполнению лабораторных работ для  
обучающихся всех форм обучения специальности 20.05.01 – Пожарная  
безопасность

поселок Яблоновский  
2019

Составитель: ст. препод. Хрисониди В.А.

**УДК 614.84:621.3**

**ББК 31.29**

**Пожарная безопасность электроустановок.** Методические указания по выполнению лабораторных работ для обучающихся всех форм обучения специальности 20.05.01 – Пожарная безопасность : Сост. ст. препод. Хрисониди В.А.; Филиал ФГБОУ ВО «МГТУ» в поселке Яблоновском. Кафедра транспортных процессов и техносферной безопасности. – пос. Яблоновский : Кафедра ТПиТБ, 2019. – 57 с.

Рассмотрены теоретические основы пожарной безопасности и электробезопасности, даны описания лабораторных стендов и методика выполнения лабораторных работ. Выполнение лабораторных работ позволяет на практике ознакомиться с электрическими аппаратами, устройствами и измерительными приборами, научиться проводить измерения электрических величин и грамотно обрабатывать результаты измерений. Все это позволит надежно закрепить полученные обучающиеся теоретические знания.

Лабораторные работы выполняются курсантами и слушателями в соответствии с рабочей программой и учебным планом по дисциплине «Пожарная безопасность электроустановок» по темам: пожарная безопасность электрических сетей, пожарная безопасность силовых и осветительных электроустановок, заземление и зануление электроустановок.

## **Методика выполнения лабораторных работ и правила техники безопасности при работе в электрических лабораториях**

1. Группа, работающая в лаборатории, разбивается на бригады. В каждой бригаде должно быть не более четырех человек.

2. Слушатель должен заранее подготовиться к выполнению лабораторной работы, уяснив предварительно:

- а) целевое назначение работы;
- б) теоретический материал, относящийся к работе;
- в) порядок выполнения работ;
- г) методику обработки экспериментальных данных.

Необходимо заранее в тетради заготовить таблицы для записи результатов измерений и вычислений.

3. Придя на занятия, слушатель занимает свое рабочее место и знакомится с приборами, аппаратурой и электрической схемой данной установки.

4. При сборке схемы необходимо следить за тем, чтобы включаемые измерительные приборы, реостаты и аппараты соответствовали ожидаемым рабочим значениям токов и напряжений схемы.

5. Сборку схем следует начинать с основной последовательной цепи, а затем подключать параллельные цепи.

6. Электрическую схему нужно собирать так, чтобы провода излишне не перекрещивались, не натягивались и не скручивались петлями.

7. Прежде чем включить кнопку пускателя (автомата), все включенные в цепь реостаты надо ввести полностью на максимальное сопротивление.

8. Собранную схему должен проверить преподаватель или лаборант. Включать кнопки пускателей автоматов и т.п. можно только после разрешения преподавателя или лаборанта.

9. В процессе работы схемы и особенно при ее включении необходимо следить за показаниями приборов. Если они покажут чрезмерную величину, нужно сразу же разомкнуть цепь. Повторное включение схемы нельзя производить до тех пор, пока не найдены и не устранены повреждения цепи.

10. Окончив экспериментальную часть работы, цепь разбирать не следует. Сначала нужно полученные результаты показать преподавателю или лаборанту, т.к. возникшую ошибку легко найти при не разобранный цепи. Только убедившись в правильности полученных результатов, можно разобрать существующую цепь и перейти к сборке следующей, если это требуется по работе.

11. По окончании работы, необходимо отключить питание, разобрать цепь, собрать соединительные провода, привести в порядок рабочее место. Все таблицы с результатами измерений следует показать преподавателю.

12. На основании проделанных измерений и вычислений каждый слушатель составляет отчет. Отчет должен быть написан чернилами, а схемы, диаграммы и графики вычерчены при помощи чертежных инструментов, диаграммы и графики нужно выполнять в масштабе. В начале осей координат должен быть нуль, а по осям нанесены равномерные деления масштаба. Не следует допускать разрывов осей, т.к. может создаться неправильное представление о характере процесса.

13. Отчет по предыдущей лабораторной работе предъявляется преподавателю для проверки перед началом очередной лабораторной работы. Без предъявления отчета по предыдущей работе слушатели к выполнению очередной работы не допускаются.

14. После проведения нескольких лабораторных работ слушатель защищает их. К защите необходимо подготовить кроме оформленного отчета теоретическую часть в объеме, соответствующем данной лабораторной работе.

15. При проведении работ в электротехнической лаборатории необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

- а) не трогать руками токоведущие части;
- б) не проверять наличие напряжения руками, пользоваться для проверки наличия напряжения индикатором напряжения или вольтметром;
- в) не включать цепь без разрешения преподавателя или лаборанта;
- г) остерегаться короткого замыкания между клеммами;
- д) не производить какие-либо переключения в цепи, которая находится под напряжением;
- е) устанавливать и заменять предохранители на щитках только с разрешения преподавателя или лаборанта при отключенном рубильнике;
- ж) не пользоваться соединительными проводами без наконечников и проводами с поврежденной изоляцией;
- з) не отходить от испытательного стенда и не оставлять без наблюдения приборы и аппараты, находящиеся под напряжением;
- и) при пользовании переносным вольтметром применять специальные провода, имеющие держатели из изоляционного материала;
- к) немедленно выключать рубильник (пускатель) и сообщать преподавателю при обнаружении любого повреждения электрооборудования, измерительных приборов и проводов.

18. Слушатели, нарушившие правила техники безопасности, немедленно отстраняются от занятий в лаборатории и направляются к руководству.

## Лабораторная работа № 1

### Исследование влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности и пожарной опасности

**Цель работы** – экспериментальное исследование основных характеристик электробезопасности и пожарной опасности электрической сети с изолированной (*IT*) и глухозаземлённой (*TN*) нейтралью.

#### Задачи исследования:

1. Получить зависимость тока, проходящего через тело человека  $I_h$ , от величины электрического сопротивления изоляции фаз  $R_{ИЗ}$ , при неизменной ёмкости фаз,  $I_h = f(R_{ИЗ})$ .
2. Получить зависимость величины  $I_h$  от величины ёмкости фаз  $C$  относительно «земли» при постоянном электрическом сопротивлении изоляции фаз,  $I_h = f(C)$
3. Получить зависимость величины  $I_h$  от величины сопротивления  $R_{ЗАМ}$  при замыкании фазного провода на «землю»,  $I_h = f(R_{ЗАМ})$ .

### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электроустановки напряжением до 1 кВ в отношении мер электробезопасности и пожарной опасности разделяются на:

- электроустановки с **глухозаземленной** нейтралью;
- электроустановки с **изолированной** нейтралью.

Для таких электроустановок приняты следующие обозначения:

• **система *TN*** – система, в которой нейтраль источника питания **глухо** заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников (***PE***);

• **система *TN-C*** – система ***TN***, в которой нулевой защитный (***PE***) и нулевой рабочий (***N***) проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении;

• **система *TN-S*** – система ***TN***, в которой нулевой защитный (***PE***) и нулевой рабочий (***N***) проводники разделены на всем ее протяжении;

• **система *TN-C-S*** – система ***TN***, в которой функции нулевого защитного (***PE***) и нулевого рабочего (***N***) проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания;

• **система *IT*** – система, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройство, имеющие

большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены;

• **система TT** – система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически не зависящего от глухозаземленной нейтрали источника.

Под буквенными обозначениями систем следует понимать:

первая буква – состояние нейтрали источника питания относительно земли: **T** – заземленная нейтраль; **I** – изолированная нейтраль.

вторая буква – состояние открытых проводящих частей относительно земли: **T** – открытые проводящие части заземлены, независимо от отношения к земле нейтрали источника питания или какой-либо точки питающей сети; **N** – открытые проводящие части присоединены к глухозаземленной нейтрали источника питания.

Последующие (после **N**) буквы – совмещение в одном проводнике или разделение функций нулевого рабочего и нулевого защитного проводников: **S** – нулевой рабочий (**N**) и нулевой защитный (**PE**) проводники разделены; **C** – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике (**PEN** проводник).

Опасность прикосновения принято оценивать по двум крайним случаям: прикосновение к двум фазам и между фазой и землей.

Двухфазное прикосновение является редким, но опасным и может возникать при  $R_2 = 0$  или  $R_3 = 0$  (рис. 1.1). Человек оказывается под линейным напряжением. Ток, проходя через тело человека, может стать опасным. Его величина будет определяться выражением

$$I_h = \sqrt{3} U_{\phi} / R_h = 380 / 1000 = 380 \text{ мА},$$

где  $R_h$  – активное сопротивление тела человека, Ом.

В задачах по электробезопасности  $R_h$  принимается равным 1000 Ом.

Такое значение  $I_h$  значительно больше допустимых 40-100 мА (см. прил. 1, табл. 1), при которых возможна гибель пораженного человека. Однако случаи двухфазного прикосновения очень редки и не могут служить основанием для оценки опасности сети. Они обычно бывают при использовании неисправных защитных средств, эксплуатации оборудования с открытыми (голыми) токоведущими частями (открытые рубильники, незащищенные зажимы сварочных трансформаторов и т.п.).

Однофазное прикосновение возникает значительно чаще (70 - 80% всех замыканий) и является основным видом для анализа поражения людей током. Человек, прикасающийся к корпусу электроприемника при замыкании фазы **A** (**L1**) (см. рис. 1.1), если корпус не соединен надежно с заземлением, приобретает потенциал фазы сети или близкий к нему.

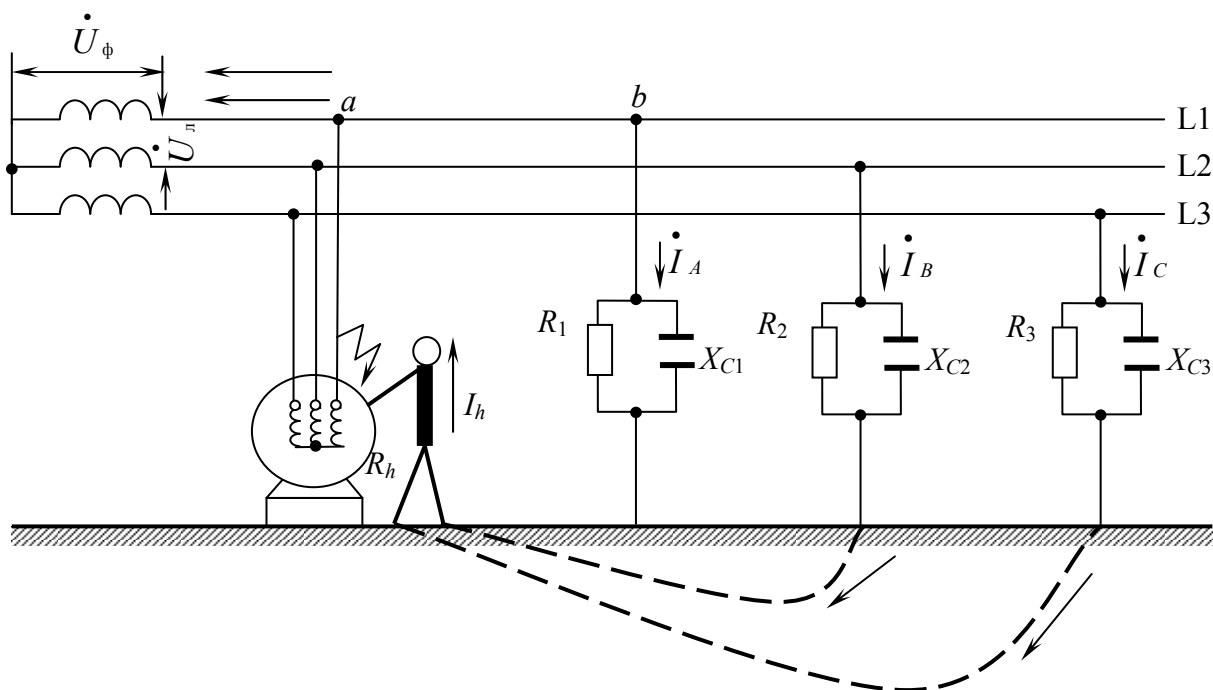


Рис. 1.1. Замыкание на корпус электроприемника в сети с изолированной нейтралью (система IT) при отсутствии заземления

Прикосновение к корпусу равносильно прикосновению к фазе. Тело человека, его обувь, пол, земля, активные  $R_2$ ,  $R_3$  и емкостные  $X_{C2}$  и  $X_{C3}$  сопротивления других фаз, провода и обмотки составляют замкнутую цепь. Ток в этой цепи зависит от ее сопротивления и напряжения и может нанести человеку тяжелое поражение. В целях упрощения считают, что тело человека обладает лишь активным сопротивлением  $R_h$ , сопротивление растеканию его ног равно нулю. Фазные напряжения равны и симметричны, а сопротивления изоляции фаз одинаковы, т.е.  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{из}$ . Емкостью воздушных проводов при промышленной частоте относительно земли пренебрегают.

Ток, проходящий через тело человека оказывается в  $\sqrt{3}$  раз меньше двухфазного включения

$$I_{h\phi} = \frac{U_{\phi}}{R_h}, I_{hл} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{R_h} = \frac{U_{л}}{R_h}.$$

где  $I_{h\phi}$ ,  $I_{hл}$  – ток, проходящий через тело человека при однофазном и двухфазном включении тела человека в электрическую цепь соответственно, А;

$U_{\phi}$ ,  $U_{л}$  – фазное и линейное напряжение электроустановки, В;

$R_h$  – электрическое сопротивление тела человека, Ом.

В исправном состоянии сопротивление изоляции  $R_{из}$  установок напряжением до 1кВ должно быть не менее 0,5 МОм. В таком случае человек оказывается «под защитой» изоляции других фаз, а ток, проходящий через него, будет безопасным.

При этом ток, проходящий через тело человека, будет равен

$$I_h = U_{\text{л}} / (R_h + R_{\text{ИЗ}}) = 380 / (10^3 + 0,5 \cdot 10^6) = 0,76 \text{ мА},$$

что составляет доли миллиампер и условие электробезопасности выполняется.

В сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит:

а) от сопротивления проводов относительно земли: с увеличением сопротивления опасность уменьшается;

б) от емкостей проводов относительно земли: с увеличением емкости опасность увеличивается.

Вместе с тем этот случай менее опасен, чем прикосновение в сети с заземленной нейтралью.

При большой протяженности сетей с изолированной нейтралью значением, определяющим их электро- и пожарную безопасность, является не сопротивление изоляции  $R_{\text{ИЗ}}$ , а емкостное сопротивление сети  $X_C$ . Величина емкостного сопротивления сетей  $X_C$  с изолированной нейтралью, достигающих по длине больше 1 км, может составлять приблизительно 1 кОм.

При таком значении  $X_C$  условие электробезопасности выполняться не будет, так как

$$I_h = U_{\text{л}} / (R_h + X_C) = 380 / (10^3 + 10^3) = 190 \text{ мА},$$

что значительно больше порогового значения, т.е. для каждого конкретного случая следует индивидуально оценивать необходимость учитывать  $X_C$  сети или возможность пренебрегать этим показателем.

При равенстве сопротивлений изоляции и емкостей проводов относительно земли, т.е. при  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{\text{ИЗ}}$ ,  $C_1 = C_2 = C_3 = C$  ток через тело человека определяется выражением:

$$I_h = \frac{U_{\Phi}}{R_h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{\text{ИЗ}}(R_{\text{ИЗ}} + 6R_h)}{9 \cdot R_h^2 \cdot (1 + 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C^2 \cdot R_{\text{ИЗ}}^2)}}}.$$

Однако следует учитывать, что наличие в производственных помещениях заземленных металлоконструкций (технологическое оборудование, вентиляция и т.п.) создает опасность одновременного прикосновения к корпусу поврежденного электрооборудования и металлоконструкциям, имеющим потенциал земли. Ток поражения в этом случае может достигать опасных значений, так как в цепь протекания тока не входит значительная величина сопротивления пола, а иногда и обуви.



Без специального заземления электроустановки (например, корпуса электродвигателя) ток однофазного замыкания может возникать в «случайной» цепи (металлоконструкции здания, технологическое оборудование и т.п.) и в местах плохих контактов в этой цепи вызвать искрение, что особенно недопустимо во взрывоопасных зонах. Пожарную опасность представляют искры и дуги при пробое изоляции неповрежденных фаз на землю. Это может привести к возникновению уже сравнительно больших токов, не всегда отключаемых защитой. Задержка или отказ отключения таких токов иногда вызывает прожог электрической дугой труб электропроводки, оболочек кабелей и корпусов электроприемников или их местный недопустимый нагрев. Все это весьма опасно, особенно в условиях пожаровзрывоопасных зон.

Обеспечить необходимую электробезопасность человека и пожарную безопасность сетей с изолированной нейтралью позволяет применение низкоомного заземлителя, шунтирующего сопротивление тела человека.

Сопротивление искусственного заземлителя (рабочего заземления нейтрали), согласно требованиям ПУЭ для сетей с  $U_{л} = 380$  В принимают 4 Ом.

В практике эксплуатации электрического оборудования ток, проходящий через тело человека, редко определяется только напряжением электрической сети и электрическим сопротивлением тела человека. Этот ток значительно уменьшается за счет использования обуви с подошвой из полимеров, изолированных покрытий полов помещений (дерево, линолеум и др.), применения технических защитных средств защитного заземления и зануления, а также средств индивидуальной защиты.

Для трехфазной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ типа  $TN - C$  значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения определяются фазным напряжением сети и не зависят от сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

Действительно, сопротивления фазного и нулевого проводников относительно земли по сравнению с сопротивлением заземления нейтрали малы. При этом выражение для тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазному проводу при нормальном режиме работы сети  $TN - C$ , принимает вид:

$$I_{h\phi} = \frac{U_{\phi}}{R_h + R_0},$$

где  $R_0$  – сопротивление рабочего заземления нейтрали.

Напряжение прикосновения в этом случае определяется из уравнения:

$$U_h = \frac{U \cdot R_h}{R_h + R_0}.$$

Так как обычно  $R_0 \ll R_h$ , то можно считать, что человек в этом случае попадает практически под фазное напряжение сети.

Рассмотрим на рис. 1.2 схему без нулевого защитного провода, роль которого выполняет земля (т.е. схема сети с глухозаземлённой нейтралью).

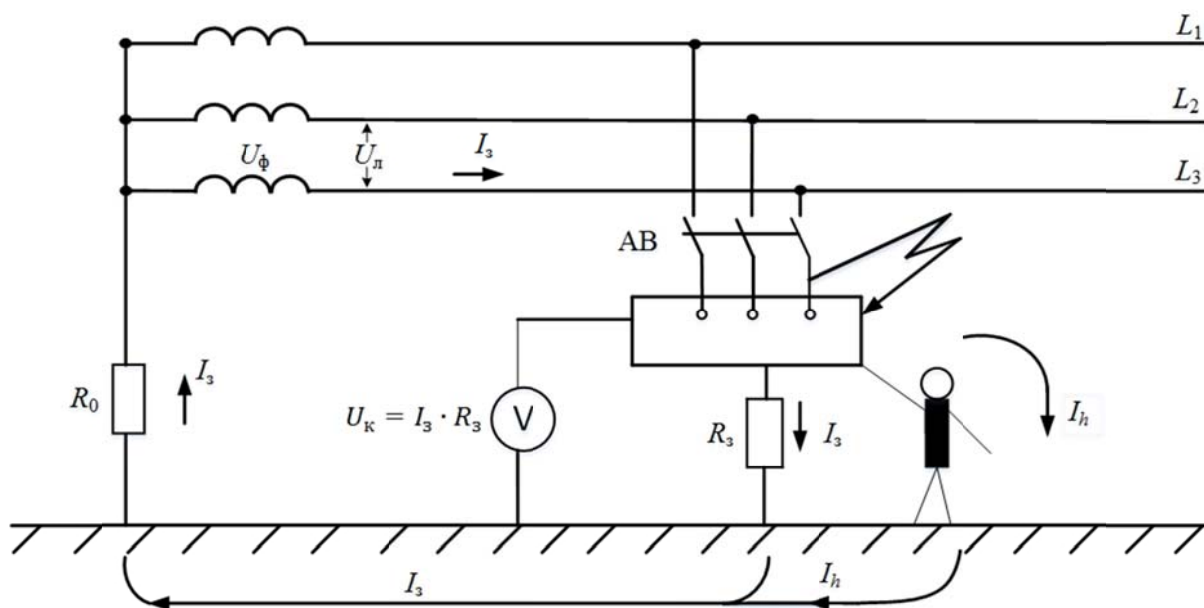


Рис. 1.2. Замыкание на корпус электроприемника в сети с глухозаземленной нейтралью (система TN)

При замыкании фазы на корпус установки, на последнем возникает напряжение относительно земли:

$$U_k = I_3 \cdot R_3 = U_\phi \cdot \frac{R_3}{R_0 + R_3},$$

где:  $U_\phi$  – фазное напряжение, В;

$R_0, R_3$  – сопротивление заземлений нейтрали и корпуса, Ом.

Сопротивление обмотки трансформатора и проводов можно не учитывать, т.к. оно мало по сравнению с  $R_0$  и  $R_3$ .

При этом, ток  $I_3$  может оказаться недостаточным, чтобы вызвать срабатывание защиты, и электроустановка может не отключиться.

Такой аварийный режим работы сети создаст угрозу поражения человека электрическим током, в случае прикосновения к повреждённому оборудованию, а также возможное образование электрических разрядов между корпусом неисправной установки и сторонними заземленными металлическими частями.

При аварийном режиме, когда один из фазных проводов сети, например, провод  $L3$  замкнут на землю через относительно малое активное сопротивление  $R_{ЗАМ}$ , а человек прикасается к исправному фазному проводу, через его тело будет протекать ток, рассчитываемый по формуле:

$$I_{h \text{ ав}} = \frac{U_{\phi}(R_{ЗАМ} + \sqrt{3}R_0)}{R_{ЗАМ}R_0 + R_h(R_{ЗАМ} + R_0)}.$$

Рассмотрим два характерных случая.

1. Если принять, что сопротивление замыкания фазного провода на землю  $R_{ЗАМ}$  равно нулю, то напряжение прикосновения  $U_h = \sqrt{3} U$ . Следовательно, в данном случае человек окажется практически под воздействием линейного напряжения сети.

2. Если принять равным нулю сопротивления заземления нейтрали  $R_0$ , то  $U_h = U$ , т.е. напряжение, под которым окажется человек, будет практически равно фазному напряжению.

Однако в реальных условиях сопротивления  $R_{ЗАМ}$  и  $R_0$  всегда больше нуля, поэтому напряжение прикосновения  $U_h$ , под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, будет всегда меньше линейного, но больше фазного, то есть  $\sqrt{3} U > U_h > U$ .

С учетом того, что всегда  $R_{ЗАМ} > R_0$ , напряжение прикосновения  $U_h$  в большинстве случаев незначительно превышает значение фазного напряжения, что менее опасно для человека, чем в аналогичной ситуации в сети типа  $IT$ .

Для устранения опасности поражения человека электрическим током и обеспечения пожарной безопасности необходимо обеспечить автоматическое отключение электроустановки, т.е. увеличить ток до величины  $I_3 > I_{с.з.}$ , что достигается уменьшением сопротивления цепи за счёт введения в схему защитного нулевого провода с малым сопротивлением.

Согласно ПУЭ нулевой защитный проводник должен иметь проводимость не меньше половины проводимости фазного провода. В этом случае ток однофазного короткого замыкания будет достаточным для быстрого отключения аппаратом защиты поврежденной электроустановки.

**Вывод:** в 3-х фазной сети напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью без нулевого защитного проводника невозможно обеспечить безопасность при замыкании на корпус, поэтому такую сеть применять запрещается.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа осуществляется в следующей последовательности:

1. Соедините гнезда защитного заземления всех блоков, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания желтыми проводами с зеленой полосой.

2. Смоделируйте **сеть с изолированной нейтралью (IT)**. Для этого соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений рис. 1.3.

Используйте красные провода для соединения амперметра на блоке мультиметров с цепью прикосновения человека на модели человека (контакт 2), вольтметра 1 с землей модели замыкания на землю. Для остальных соединений используйте черные провода.

3. Рассчитайте напряжения прикосновения и тока, проходящего через тело человека, для различных условий работы сети, пользуясь расчётными формулами, приведенными в табл. 1.1, и занесите полученные расчётные данные в табл. 1.2.

4. Установите на амперметре и вольтметре максимальные значения – 2А и 700В. Для создания нормального режима на модели замыкания на землю установите  $R_{ЗАМ} = \infty$ .

5. Включите трехфазный источник питания и питание блока мультиметров.

6. Снимите в электрической сети с изолированной нейтралью **в нормальном режиме** с помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров следующие зависимости тока через тело человека:  $I_h = f(R_{ИЗ})$ ,  $I_h = f(C)$ ,  $I_h = f(R_{ОБУВИ})$ ,  $I_h = f(R_{ПОЛА})$  для этого:

6.1. Установите на модели человека:  $R_{ОБУВИ} = R_{ПОЛА} = 0$ , на модели участка электрической сети  $C = C_A, C_B, C_C = 0,6$  мкФ, и варьируя сопротивление изоляции  $R_{ИЗ} = R_A = R_B = R_C = 5 - 500$  кОм, измерьте  $I_h$  и  $U_{ПР}$ ;

6.2. Установите  $R_{ИЗ} = R_A = R_B = R_C = 10$  кОм и варьируя емкости  $C_A, C_B, C_C = 0,1 - 0,5$  мкФ измерьте  $I_h$  и  $U_{ПР}$ ;

6.3. Установите  $R_{ИЗ} = const$ ,  $C_A, C_B, C_C = const$ , меняя  $R_{ПОЛА}$  и  $R_{ОБУВИ}$ , измерьте  $I_h$  и  $U_{ПР}$ ;

6.4. Установите  $C_A, C_B, C_C = 0$ ,  $R_A = 5$  кОм,  $R_B = 10$  кОм,  $R_C = 100$  кОм, снимите показания  $I_h$  и  $U_{ПР}$ ;

6.5. Установите  $C_A, C_B, C_C = 0$ ,  $R_A = 10$  кОм,  $R_B = 100$  кОм,  $R_C = 500$  кОм, снимите показания  $I_h$  и  $U_{ПР}$ ;

6.6. Занесите полученные результаты в табл. 1.2.

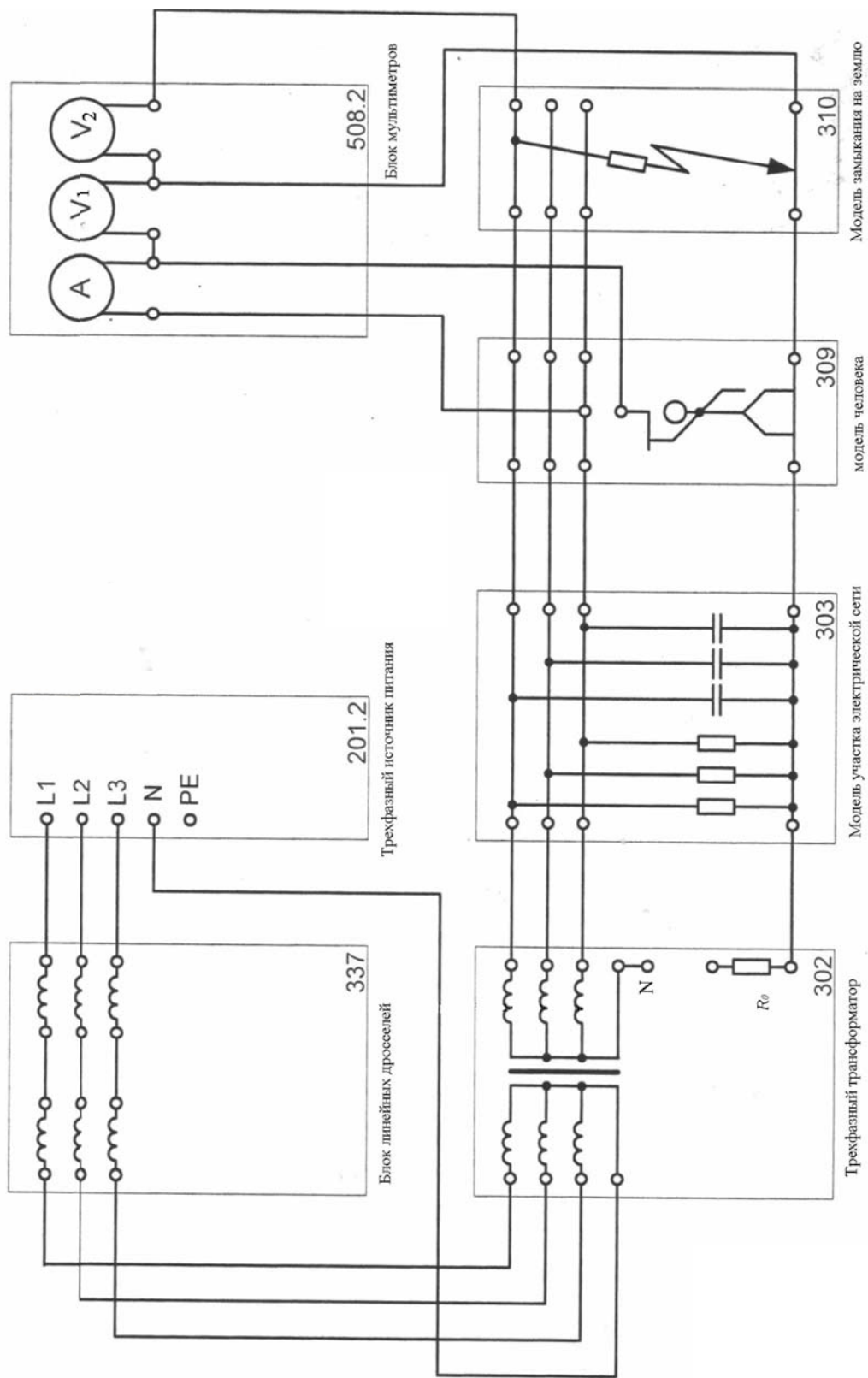


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки

Таблица 1.1

**Формулы для расчета параметров нормального и аварийного режимов работы сети с изолированной нейтралью (IT)**

Условия работы электроустановки	Расчетные формулы
Нормальный режим: $f = 50$ Гц	$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{ИЗ}(R_{ИЗ} + 6R_h)}{9 \cdot R_h^2 \cdot (1 + 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C^2 \cdot R_{ИЗ}^2)}}$ $U_{ИП} = I_h \cdot R_h$
Аварийный режим: Фаза <i>A</i> замкнута на «землю»	$I_h = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{R_h + r_{3М}}$ $U_{ИП} = I_h \cdot R_h$

Таблица 1.2

**Результаты измерений и вычислений в системе IT при нормальном и аварийном режимах**

Параметры сети			Параметры цепи протекания тока		Схема соединения по системе IT			
					Результаты измерений		Результаты расчетов	
$R_{ИЗ}$ , кОм	$C$ , мкФ	$R_{ЗАМ}$ , Ом	$R_{ОБУВ}$ , кОм	$R_{ПОЛА}$ , кОм	$I_h$ , мА	$U_{ИП}$ , В	$I_h$ , мА	$U_{ИП}$ , В
5 10 500	0,6	$\infty$	1	1				
500	0,1 0,3 0,5	$\infty$	1	1				
500	0,6	$\infty$	10 1	1 100				
$R_A = 5, R_B = 10, R_C = 100$	0	$\infty$	1	1				
$R_A = 10, R_B = 100, R_C = 500$	0	$\infty$	1	1				
500	0	2 200 500 1000	1	1				

7. Снимите в электрической сети с изолированной нейтралью **в аварийном режиме** с помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров следующие зависимости тока через тело человека:  $I_h = f(R_{ИЗ})$ ,  $I_h = f(C)$ ,  $I_h = f(R_{ОБУВИ})$ ,  $I_h = f(R_{ПОЛА})$ , для этого:

7.1. Установите  $R_{ИЗ} = const$ ,  $C_A, C_B, C_C = const$ ,  $R_{ПОЛА} = const$ ,  $R_{ОБУВИ} = const$ . Меняя  $R_{ЗАМ} = 2 - 1000$  Ом, снимите показания  $I_h, U_{ПР}$ ;

7.2. Занесите полученные результаты в табл. 1.2.

8. Смоделируйте электрическую сеть с глухозаземленной нейтралью (TN). Для этого соедините перемычкой гнездо нейтральной точки трансформатора (N) и гнездо сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора.

9. Рассчитайте напряжения прикосновения и ток протекающий через тело человека, для различных условий функционирования электрической цепи, пользуясь формулами табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Формулы для расчета параметров нормального и аварийного режимов работы сети с глухозаземленной нейтралью (TN)**

Условия работы электроустановки	Расчетные формулы
Нормальный режим: $R_0 = 4$ Ом	$I_{h\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{R_h + r_0},$ $U_{пр} = I_{h\Phi} \cdot R_h$
Аварийный режим: Фаза A замкнута на «землю»	$I_{нав} = \frac{U_{\Phi} (r_{3М} + \sqrt{3}r_0)}{r_{3М}r_0 + R_h (r_{3М} + r_0)},$ $U_{пр.ав} = I_{нав} \cdot R_h$

10. Снимите аналогичные ранее снятым для электрической сети с изолированной нейтралью зависимости тока через тело человека для электрической сети с глухозаземленной нейтралью (6.1 – 6.5 и 7.1 – 7.2).

11. Занесите полученные результаты в табл. 1.4.

12. По данным измерений постройте график зависимости тока, проходящего через тело человека  $I_h$ , от величины электрического сопротивления изоляции фаз  $R_{ИЗ}$  и график зависимости  $I_h$  от величины ёмкости фаз относительно «земли» при постоянном электрическом сопротивлении изоляции фаз, а также график зависимости  $I_h$  от сопротивления  $R_{ЗАМ}$ .

13. Проведите анализ полученных результатов и сделайте выводы о степени опасности прикосновения человека к фазе электрической сети с изолированной нейтралью:

- с различным электрическим сопротивлением изоляции проводов фаз электрической сети;
- с различной емкостью проводов относительно «земли»;
- сравните степень опасности ситуации прикосновения при нормальном и аварийном режимах электроустановки;
- сравните протекающие через тело человека при случайном прикосновении к электроустановке токи с нормируемыми по ГОСТ 12.1.038-82 (Приложение 1);
- сравните расчетные и экспериментальные данные.

Таблица 1.4

**Результаты измерений и вычислений  
в системе TN при нормальном и аварийном режимах**

Параметры сети			Параметры цепи протекания тока		Схема соединения по системе TN			
					Результаты измерений		Результаты расчетов	
$R_{\text{ИЗ}}$ , кОм	$C$ , мкФ	$R_{\text{ЗАМ}}$ , Ом	$R_{\text{ОБУВИ}}$ , кОм	$R_{\text{ПОЛА}}$ , кОм	$I_h$ , мА	$U_{\text{ПР}}$ , В	$I_h$ , мА	$U_{\text{ПР}}$ , В
5 10 500	0,6	$\infty$	1	1				
500	0,1 0,3 0,5	$\infty$	1	1				
500	0,6	$\infty$	10 1	1 100				
$R_A = 5, R_B = 10,$ $R_C = 100$	0	$\infty$	1	1				
$R_A = 10, R_B = 100,$ $R_C = 500$	0	$\infty$	1	1				
500	0	2 200 500 1000	1	1				

14. Сопоставьте ситуации прикосновения в электрических сетях с глухозаземлённой и изолированной нейтралью, проанализируйте табл. 1.2. и табл. 1.4. Сделайте выводы о степени опасности этих ситуаций:

- при однофазном прикосновении и нормальном режиме работ электрической сети;
- при однофазном прикосновении к одной из фаз электрической сети и одновременном аварийном замыкании другой фазы электрической сети на «землю».



## Лабораторная работа №2

### Исследование аварийных режимов работы трехфазных асинхронных двигателей

**Цель работы** – экспериментальное исследование основных аварийных режимов работы асинхронных двигателей и определение их пожарной опасности.

#### **Задачи исследования:**

1. Получить зависимость величины тока  $I$  в обмотках статора, активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  от параметров нагрузки на вал ротора асинхронного двигателя (холостой ход, номинальный режим работы, работа в режиме перегрузки, с заблокированным валом ротора).

2. Получить зависимость величины тока  $I$  в обмотках статора, активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  при работе асинхронного двигателя в неполнофазном режиме (с отключенной одной фазой).

3. Получить зависимость величины тока  $I$  в обмотках статора, активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  при работе на различных пониженных напряжениях источника тока при различных аварийных режимах работы асинхронного двигателя.

4. Снятие и определение характеристик короткого замыкания  $I_K=f(U)$ ,  $P_K=f(U)$ ,  $Q_K=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

5. Экспериментальное определение необходимости применения нейтрального провода при соединении обмоток статора по схеме «звезда».

### **ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Около 65% электрической энергии в промышленности, электроэнергетике и других отраслях используются асинхронными электродвигателями. Асинхронный двигатель считается самой надежной электрической машиной. Вместе с тем на практике наблюдается сравнительно высокий процент их выхода из строя, в том числе с последующим возгоранием. Объясняется это, главным образом, тем, что в процессе эксплуатации возникают такие условия, на которые машина не рассчитана при проектировании.

*Аварийным режимом работы электродвигателя* будем называть любой режим работы, увеличивающий температуру нагрева электродвигателя выше допустимой. Необнаруженный аварийный режим работы электродвигателя может привести к его загоранию. Аварийные режимы работы электродвигателей возникают из-за снижения или увеличения питающего

напряжения при номинальной нагрузке на валу, увеличении нагрузки на валу выше номинальной, обрыве одной фазы, снижении межвиткового сопротивления изоляции статорных обмоток; ухудшении вентиляции, увеличении числа включений выше допустимого.

Различают *три вида повреждения изоляции двигателя*: сгорание изоляции из-за перегрева обмоток, пробой изоляции и механические повреждения. Чаще всего встречаются повреждения первых двух видов.

*Механические повреждения* (главным образом износ подшипников) возникают, как правило, после длительной эксплуатации. 2 – 5 % электродвигателей отказывают из-за повреждения подшипников. Более 80 % подшипников качения выходят из строя вследствие разрушений усталостного характера, а в подшипниках скольжения может быть выплавлена баббита. Все это приводит к нарушению соосности валов электродвигателя и механизма, к появлению эксцентриситета ротора. Нередко отказ подшипниковых узлов приводит к пожароопасному температурному перегреву этих узлов и всего корпуса электродвигателя. Кроме того, возникающие в подшипниках большие трения увеличивают тормозной момент (нагрузку) на валу, отчего возрастает ток в обмотках статора и температура нагрева возрастает до пожароопасной.

*Основные отказы обмоток* обусловлены межвитковыми замыканиями – 93 %.

*Пробой изоляции обмотки ротора на корпус* приводит к медленному увеличению частоты вращения при пуске асинхронного двигателя. Ротор сильно нагревается даже при небольшой нагрузке. К таким же явлениям приводит *нарушение изоляции между контактными кольцами* и валом ротора у асинхронного двигателя с фазным ротором.

*Пробой изоляции между фазами* приводит к короткому замыканию (КЗ) в обмотке статора. При КЗ обмотки статора наблюдаются сильные вибрации двигателя переменного тока, сильное гудение, несимметрия токов в фазах, быстрый нагрев отдельных участков обмотки и как результат – загорание изоляции обмотки.

*Межвитковое короткое замыкание* обмотки статора или ротора приводит к чрезмерному нагреву электродвигателя даже при номинальной нагрузке.

Отрыв стержня короткозамкнутой обмотки ротора приводит к повышенным вибрациям, уменьшению частоты вращения под нагрузкой, пульсациям тока статора последовательно во всех фазах.

*Нарушение контактов пазных или сварных соединений* в асинхронных двигателях эквивалентно по своему проявлению обрыву витков, стержней короткозамкнутых обмоток или фазы обмотки в зависимости от места нахождения данного соединения.

*Нарушение контакта в цепи щеток* приводит к повышенному искрению между контактными кольцами и щетками. А в электродвигателях коллекторных переменного тока и машинах постоянного тока такое искрение имеет место между щетками и коллектором. Выработка коллектора и контактных колец приводит к ухудшению коммутации, быстрому износу щеток и повышенному нагреву контактных колец и коллектора и сильному искрению (вплоть до «кругового огня»).

Недопустимое *снижение сопротивления изоляции* может быть в результате сильного загрязнения изоляции, увлажнения и частичного разрушения, вызванных старением изоляции, и как следствие – ее пробой и короткое замыкание.

*Нарушение межлистовой изоляции сердечников магнитопроводов* приводит к недопустимому повышению температуры отдельных участков и всего магнитопровода в целом, повышенному нагреву обмоток, выгоранию части магнитопровода (пожар в стали).

*Причинами перегрева обмоток* могут быть следующие аварийные режимы:

- 1) перегрузка рабочей машины;
- 2) работа в однофазном режиме при отключении одной фазы;
- 3) затяжной пуск;
- 4) работа под пониженным напряжением;
- 5) работа при асимметрии напряжения;
- 6) высокая частота включения;
- 7) остановка (блокирование) ротора;
- 8) понижение сопротивления изоляции;
- 9) ухудшение охлаждения.

Первые семь режимов сопровождаются повышением тока во всех или двух фазах.

### **Перегрузки рабочей машины**

Обычно электродвигатели выбирают с некоторым запасом по мощности. Кроме того, большую часть времени машины работают с недогрузкой. В результате ток двигателя часто значительно ниже номинального значения. *Перегрузки* возникают, как правило, при нарушениях технологии, поломках, заедании и заклинивании в рабочей машине. Такие машины, как вентиляторы, центробежные насосы, ленточные и шнековые транспортеры, имеют спокойную постоянную или слабо изменяющуюся нагрузку. Иное дело, если нарушения нормальных условий работы остаются на длительное время.

С точки зрения влияния длительных превышений тока на изоляцию следует различать два вида перегрузок по величине: сравнительно небольшие (до 50%) и большие (более 50%).

Если превышение температуры над допустимым значением невелико, то старение изоляции происходит медленно. Небольшие изменения в структуре изолирующего материала накапливаются постепенно. По мере возрастания температуры процесс старения значительно ускоряется.

При больших перегрузках (более 50%) изоляция быстро разрушается под действием высокой температуры.

Из приведенной характеристики можно сформулировать одно из основных требований к защите от перегрузок, действующей в зависимости от тока. Она должна срабатывать в зависимости от величины перегрузки. Это дает возможность исключить ложные срабатывания при неопасных бросках тока, возникающие, например, при пуске двигателя. Защита должна срабатывать только при попадании в область недопустимых значений тока и длительности его протекания.

### **Затяжной пуск двигателя**

*Пусковой ток асинхронных двигателей* в обычно в 6 – 7 раз превышает номинальный. Известно, что нагрев проводников зависит от квадрата тока, согласно закона Джоуля-Ленца, поэтому резко увеличивается выделение тепла в обмотках. Интенсивность нагрева характеризуется скоростью нарастания температуры обмоток статора. У асинхронных короткозамкнутых двигателей она находится в пределах 5 – 7 °С в секунду. Поэтому при пуске из холодного состояния через 10 – 12 секунд температура обмоток достигает допустимого значения. Дальнейшее протекание пускового тока может вызвать перегрев и обгорание изоляции.

При пуске под пониженным напряжением разность моментов снижается, а длительность разбега увеличивается. Расчеты показывают, что при пуске с небольшим моментом сопротивления снижение напряжения практически не влияет на нагрев двигателя. Увеличение длительности разбега компенсируется уменьшением пускового тока. При пуске под нагрузкой длительность разбега растет значительно быстрее, чем снижается пусковой ток. Поэтому такой пуск сопровождается интенсивным нагревом.

Во время пуска выделяется большое количество тепла. Оно не успевает рассеиваться в окружающую среду. Более того, оно не успевает распространиться на все части машины. Почти вся тепловая энергия, выделяемая в обмотках в течение нескольких секунд, расходуется на нагрев проводов и изоляции и лишь небольшая ее часть передается в сталь статора и ротора. Происходит быстрый местный нагрев.

Пользуясь приведенными выше положениями, можно приближенно подсчитать допустимое время пуска двигателя. Будем считать, что во время пуска все тепло, выделяемое в двигателе, идет на нагрев обмоток. Как уже указывалось выше, при пуске под номинальным напряжением допустимое время пуска двигателя 10 – 12 с. Количество энергии выделяемой в проводниках трехфазной обмотки можно подсчитать по формуле:

$$Q = 3I_{\text{п}}^2 R t_{\text{п}},$$

где  $I_{\text{п}}$  – пусковой ток;  $R$  – сопротивление обмоток;  $t_{\text{п}}$  – время пуска.

Для того чтобы при пуске под пониженным напряжением обмотка не нагревалась свыше допустимого значения, нужно, чтобы количество выделяемого тепла не превышало величины, получаемой при номинальном напряжении:

$$3I_{\text{п}}^2 R t_{\text{п}} = 3I_{\text{пп}}^2 R t_{\text{пп}},$$

где  $I_{\text{пп}}$  – пусковой ток;  $t_{\text{пп}}$  – допустимое время разгона при пониженном напряжении.

Из последнего уравнения допустимое время разгона при пуске под пониженным напряжением

$$t_{\text{пп}} = \frac{I_{\text{п}}^2}{I_{\text{пп}}^2} t_{\text{п}}.$$

Принимая во внимание, что величина пускового тока пропорциональна напряжению, имеем

$$t_{\text{пп}} = \left( \frac{U}{U_{\text{п}}} \right)^2 t_{\text{п}}.$$

где  $U_{\text{п}}$  — напряжение двигателя при его пуске.

Если принять, что  $U_{\text{п}} = 0,85 U_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{п}} = 10$  с, то допустимое время разгона будет равно:

$$t_{\text{пп}} = \frac{10}{0,85^2} = 14 \text{ с.}$$

При пуске вхолостую время разгона не будет превышать эту величину, но при пуске под нагрузкой оно может оказаться больше. Поэтому пуск с пониженным напряжением с нагрузкой может вызвать перегрев обмоток.

Интенсивный нагрев наблюдается при частых или повторных пусках. В этом случае неостывший двигатель вновь включается под напряжение. Под действием пусковых токов температура двигателя быстро растет. Многократное повторение такого режима работы может резко сократить срок службы изоляции. В то же время считается, что редкие (например, один раз в сутки) повторные пуски не оказывают влияния на срок службы изоляции.

## Остановка (блокирование) ротора двигателя

Он возникает при заклиниваниях ротора или рабочих органов машины. По обмоткам протекает пусковой ток, который нагревает их со скоростью до  $7 - 8 \text{ }^\circ\text{C}$  в секунду. Особенно опасна остановка ротора в процессе работы двигателя, так как в этом случае обмотка уже была нагрета. Время срабатывания защиты должно быть больше времени пуска двигателя, в противном случае пуск невозможен. Вместе с тем оно не должно быть настолько большим, чтобы возникла опасность перегрева изоляции при остановке ротора.

## Работа под пониженным напряжением

Здесь имеются в виду не кратковременные колебания напряжения, как это бывает, например, при пуске сравнительно мощных двигателей, а длительная работа под пониженным напряжением. По сравнению с промышленностью, где допустимы отклонения напряжения  $\pm 5\%$ , в сельских электроустановках эти пределы расширены до  $\pm 7,5\%$ . Нередки случаи, когда минусовые отклонения превышают нормы.

На рис. 2.1 приведены графические зависимости температуры обмотки статора электродвигателя от напряжения питающей сети при номинальной нагрузке на валу.

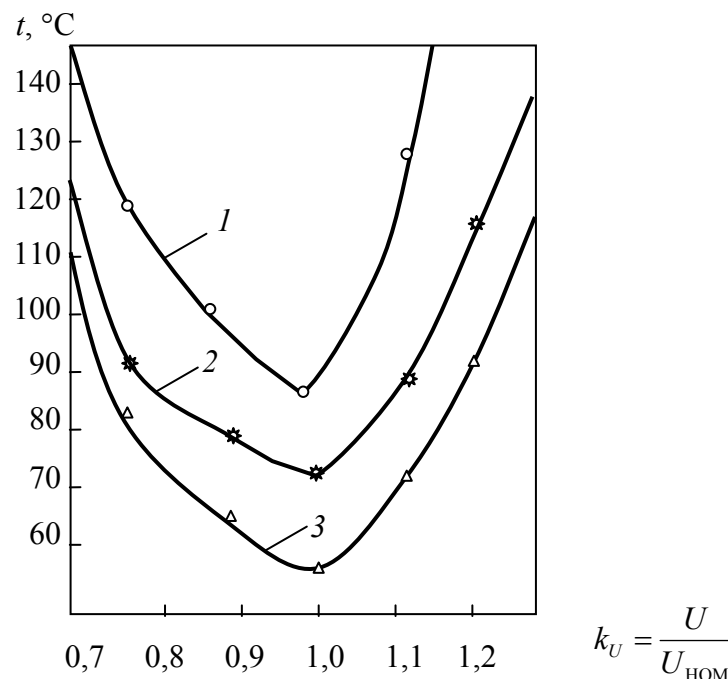


Рис. 2.1. Зависимость перегрева обмотки статора двигателя от напряжения электросети при номинальной нагрузке:  
1 – 4AX80B2Y3; 2 – 4AX80A4Y3; 3 – 4A100Y3

Из рисунка видно, что снижение питающего напряжения и увеличение его приводят к возрастанию температуры электродвигателя. Поясним физическую сущность этих явлений. Для обеспечения вращающего момента двигателя, преодолевающего номинальную механическую нагрузку на валу, требуется номинальная электрическая мощность, потребляемая обмотками статора из сети трехфазного тока. При снижении напряжения питания статорных обмоток электрическая мощность уменьшится, вращающий момент также уменьшится, ротор сбавит число оборотов, в результате чего в обмотке ротора возрастает наводимая ЭДС индукции и увеличивается соответственно ток, который, в свою очередь, увеличит свой магнитный поток. А так как магнитный поток ротора направлен навстречу магнитному потоку статора, результирующий магнитный поток должен уменьшиться, и ЭДС самоиндукции в обмотках статора также уменьшится. Следовательно, ток в статорных обмотках увеличится на величину, необходимую для компенсации потерянной электрической мощности из-за снижения питающего напряжения статорных обмоток. За счет большего тока статора результирующий магнитный поток возрастает до прежней величины. Момент, вращающий электродвигатель, станет равным моменту нагрузки на валу; двигатель будет работать с меньшим числом оборотов.

Снижение напряжения, питающего обмотки статора, на 20 - 25 % приводит к пожароопасному увеличению тока в обмотках статора. При увеличении напряжения, питающего статорные обмотки, ток в них также увеличится, а, следовательно, увеличится и температура нагрева электродвигателя.

Как правило, двигатели редко имеют номинальную нагрузку. Поэтому снижения напряжения сверх нормы при спокойной равномерной нагрузке не приводят к опасным превышениям тока. Однако при неравномерной нагрузке с периодическими пиками момента сопротивления могут возникать опасные перегревы обмоток.

### **Потеря фазы (однофазный режим работы)**

Под потерей фазы понимают однофазный режим работы в результате отключения питания по одному из проводов трехфазной системы. Причинами потери фазы могут быть: обрыв одного из проводов; сгорание одного из предохранителей; нарушение контакта в одной из фаз. В зависимости от обстоятельств, при которых произошла потеря фазы, могут быть разные режимы работы двигателя и последствия, сопутствующие этим режимам. При этом следует принимать во внимание следующие факторы:

- схему соединения обмоток двигателя («звезда» или «треугольник»);

– рабочее состояние двигателя в момент потери фазы (потеря фазы может произойти до или после включения двигателя, во время работы под нагрузкой);

– степень загрузки двигателя и механическую характеристику рабочей машины;

– число электродвигателей, работающих при потере фазы, и их взаимное влияние.

На рис. 2.2 приведены зависимости температуры электродвигателя для случая обрыва одной фазы и при перегрузке.

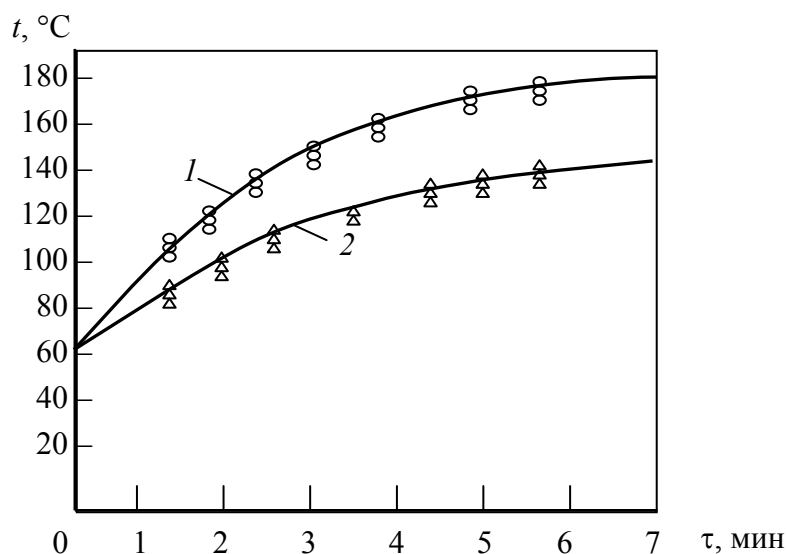


Рис. 2.2. Превышение температуры асинхронного двигателя 4АХ80А4УЗ:  
1 – при обрыве фазы; 2 – при перегрузке ( $I_{п} = 2I_{ном}$ )

В трехфазном режиме по каждой фазе обмотки протекает ток, сдвинутый по времени на одну треть периода. При потере фазы по двум обмоткам протекает один и тот же ток, в третьей фазе ток отсутствует. Несмотря на то, что концы обмоток присоединены к двум фазным проводам трехфазной системы, токи в обеих обмотках совпадают по времени. Такой режим работы называется однофазным.

Магнитное поле, образованное однофазным током, в отличие от вращающегося поля, образованного трехфазной системой токов, является пульсирующим. Оно изменяется во времени по величине и знаку, но не перемещается по окружности статора. Круговое поле сплющивается до прямой линии.

Пульсирующее магнитное поле можно рассматривать состоящим из двух вращающихся навстречу друг другу равных по величине полей. Каждое поле взаимодействует с обмоткой ротора и образует вращающий момент. Их суммарное действие создает вращающий момент на валу двигателя.



В том случае, когда потеря фазы произошла до включения двигателя в сеть, на неподвижный ротор действуют два магнитных поля, которые образуют два противоположных по знаку, но равных по величине момента. Их сумма будет равна нулю. Поэтому при пуске двигателя в однофазном режиме он не может начать вращение даже при отсутствии нагрузки на валу.

Если потеря фазы произошла в то время, когда ротор двигателя вращался, то на его валу образуется вращающий момент. Это можно объяснить следующим образом. Вращающийся ротор по-разному взаимодействует с вращающимися навстречу друг другу полями. Одно из них, вращение которого совпадает с вращением ротора, образует положительный (совпадающий по направлению) момент, другое – отрицательный. В отличие от случая с неподвижным ротором эти моменты будут разными по величине. Их разность будет равна моменту на валу двигателя. Переход в однофазный режим сопровождается перераспределением токов и напряжений между фазами.

В отличие от трехфазного симметричного режима появляется характерное гудение. В остальном внешние проявления аварийного режима не наблюдаются. Человек, не имеющий опыта работы с асинхронными двигателями, может не заметить изменения характера работы.

Если обмотки двигателя соединены по схеме «звезда», то после потери фазы образуется схема, показанная на рис. 2.3.

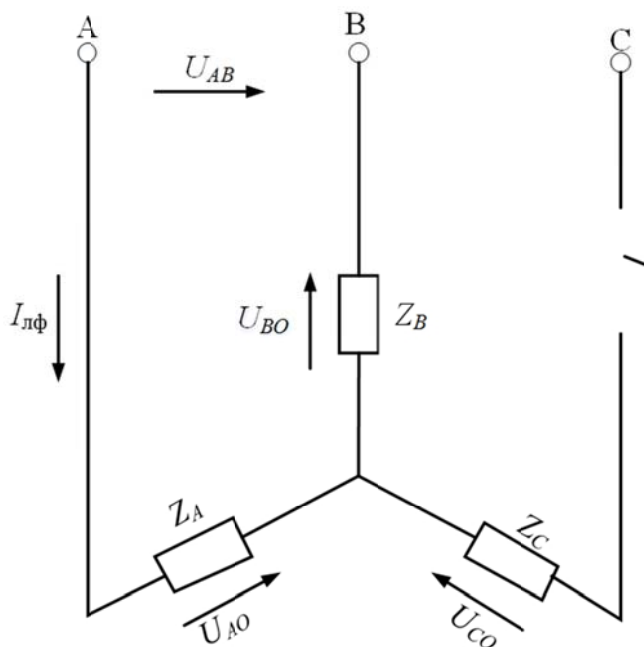


Рис. 2.3. Соединение обмоток двигателя по схеме «звезда» после потери фазы

Две последовательно соединенные обмотки двигателя оказываются включенными на линейное напряжение  $U_{AB}$ , двигатель при этом оказывается в однофазном режиме работы. Определим токи, протекающие по обмоткам двигателя, и сравним их с токами при трехфазном питании.

Так как сопротивления  $Z_A$  и  $Z_B$  соединены последовательно, напряжения на фазах  $A$  и  $B$  будут равны половине линейного:

$$U_{AO} = U_{BO} = \frac{U_{AB}}{2}.$$

Приблизительно величину тока можно определить исходя из следующих соображений. Пусковой ток фазы  $A$  при потере фазы

$$I_{1\phi} = \frac{U_{AO}}{Z_A} = \frac{U_{AB}}{2Z_A}.$$

Пусковой ток фазы  $A$  при трехфазном режиме

$$I_{3\phi} = \frac{U_{AO}}{Z_A} = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}Z_A},$$

где  $U_{AO}$  – фазное напряжение сети.

После деления выражений получим отношение пусковых токов

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86.$$

Из соотношения следует, что при потере фазы пусковой ток составляет 86% от величины пускового тока при трехфазном питании. Если учесть, что пусковой ток короткозамкнутого асинхронного двигателя в 6–7 раз больше номинального, то получается, что по обмоткам двигателя протекает ток

$$I_{1\phi} = 0,86 \cdot 6 = 5,16I_{к},$$

т. е. в пять с лишним раз превышающий номинальный. За короткий промежуток времени такой ток перегреет обмотку.

Из приведенного расчета видно, что рассматриваемый режим работы весьма опасен для двигателя и в случае его возникновения защита должна сработать с незначительной выдержкой времени.

*Потеря фазы может произойти и после включения двигателя*, когда его ротор будет иметь скорость вращения, соответствующую рабочему режиму.

Рассмотрим токи и напряжения обмоток в случае перехода в однофазный режим при вращающемся роторе. Будем считать, что как в трехфазном, так и в однофазном режиме двигатель развивает одинаковую мощность. Независимо от схемы включения электродвигателя рабочая машина требует ту же самую мощность, которая необходима для выполнения технологического процесса. Полагая мощности на валу двигателя равными для обоих режимов, будем иметь: при трехфазном режиме

$$I_{3\phi} = \frac{P}{3U_A \cos \varphi_3 \eta_3}$$

при однофазном режиме

$$I_{1\phi} = \frac{P}{2U_{A0} \cos \varphi_1 \eta_1},$$

где  $U_A$  – фазовое напряжение сети;  $U_{A0}$  – напряжение на фазе  $A$  в однофазном режиме;  $\cos \varphi_3$  и  $\cos \varphi_1$  – коэффициенты мощности при трехфазном и однофазном режимах соответственно;  $\eta_3$  и  $\eta_1$  – коэффициенты полезного действия при трехфазном и однофазном режимах соответственно.

Для приближенных расчетов можно принять  $\cos \varphi_3 = \cos \varphi_1$ ;  $\eta_3 = \eta_1$ . В выражении для определения величины при трехфазном режиме – тройка в знаменателе учитывает работу трех обмоток, в выражении при однофазном режиме – двойка в знаменателе – двух обмоток. После деления этих выражений получим

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \frac{3U_A}{2U_{A0}} = 0,86.$$

Учитывая, что

$$U_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{2U_{A0}}{\sqrt{3}},$$

то получим

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} = \sqrt{3} = 1,73.$$

Таким образом, приближенный расчет показывает, что при переходе двигателя из трехфазного режима работы в однофазный величина тока увеличивается приблизительно на 70 – 75%. Опыты с асинхронным двигателем показывают, что фактически ток возрастает почти вдвое. С некоторым запасом можно считать

$$\frac{I_{1\phi}}{I_{3\phi}} \approx 2.$$

Для того чтобы судить о степени опасности однофазного режима работы, нужно также знать загрузку двигателя. В первом приближении будем считать ток двигателя в трехфазном режиме пропорциональным его

нагрузке на валу. Такое допущение справедливо при нагрузках более 50 % от номинального значения. Тогда можно написать

$$I_{3\phi} = k_3 I_n,$$

где  $k_3$  – коэффициент загрузки двигателя;  $I_n$  – номинальный ток двигателя.

Ток при однофазном режиме

$$I_{1\phi} = 2k_3 I_n,$$

т. е. ток при однофазном режиме будет зависеть от загрузки двигателя. При номинальной нагрузке он равен двойному номинальному току. При нагрузке менее 50 % потеря фазы при соединении обмоток двигателя в «звезду» не создает опасного для обмоток превышения тока. В большинстве случаев коэффициент загрузки двигателя меньше единицы. При его значениях порядка 0,6 – 0,75 следует ожидать небольшого превышения тока (на 20 – 50 %) по сравнению с номинальным. Это существенно для работы защиты, так как именно в этой области перегрузок она действует недостаточно четко.

Рассчитать заранее токи и напряжения в однофазном режиме с тем, чтобы точно отрегулировать защиту, может оказаться весьма трудно из-за влияния большого числа различных факторов. Токи, протекающие по обмоткам, могут изменяться в значительных пределах.

### Асимметрия напряжений

Трехфазная система напряжений считается симметричной, если напряжения на всех фазах одинаковы по величине и по фазе. В реальных условиях существуют некоторые отклонения от симметрии: в одних случаях они больше, в других меньше. Причиной асимметрии обычно является неравномерное распределение нагрузки по фазам, создаваемое однофазной нагрузкой.

При несимметричном напряжении нагрев двигателя оказывается выше, чем при той же нагрузке и питании от сети с симметричным напряжением. Ухудшение работы двигателя связано с тем, что токи в фазах становятся неодинаковыми по величине, увеличиваясь в одних и уменьшаясь в других фазах по сравнению с симметричным режимом при той же нагрузке. Величина допустимой нагрузки на валу зависит от величины тока в наиболее нагруженной фазе. При номинальной нагрузке одна из фаз может оказаться перегруженной.

Расчеты показывают, что длительная допустимая мощность для двигателей до 7 кВт при асимметрии напряжений 5% снижается по сравнению с номинальной на 10 – 15%, а при асимметрии 10% – на 25 – 45%. При асимметрии напряжений 1 – 2 % длительная допустимая мощность ниже номинальной на 3 – 4 %.

Другое отрицательное действие асимметрии напряжения выражается в возникновении дополнительной вибрации, вследствие чего сокращается срок службы отдельных деталей двигателя, в том числе и его обмотки. В симметричном режиме основная причина вибрации – неуравновешенность вращающихся частей, несоосность валов.

### Ухудшение охлаждения

Тепло, выделяемое в двигателе, должно отводиться в окружающую среду. Двигатель охлаждается его вентилятором, который прогоняет воздух через его внутренние полости. Часть тепла отводится через поверхность корпуса. Засорение охлаждающих (вентиляционных) каналов приводит к ухудшению охлаждения и к недопустимому нагреву электродвигателя или отдельных его частей.

Условия нагрева различных частей электродвигателей разные: нагрев подшипников определяется в основном потерями энергии в них и мало зависит от нагрева обмоток; нагрев обмотки статора определяется не только потерями энергии в самой обмотке, но и потерями в обмотке ротора и в стали магнитопроводов. Для приближенной оценки нагрева электродвигателя можно воспользоваться упрощенной моделью нагрева однородного тела, потери энергии в котором равны потерям в данном электродвигателе.

Предположим, потери мощности в электродвигателе, включая все потери, равны  $P$ . Тогда за элементарный промежуток времени потери энергии составят  $Pdt$ . При теплоемкости электродвигателя  $c$  энергия, идущая на нагрев тела от повышения температуры на  $dT$ , составит  $cdT$ . Другая часть этой энергии отдается в окружающую среду, например, окружающему воздушному пространству путем прямой теплопередачи, излучения и конвекции.

Отдача тепла зависит от разности температур нагретого тела и окружающего пространства, превышения температуры  $T$  и площади охлаждаемой поверхности  $S$ . Отдача теплоты прямой теплопередачей пропорциональна  $T$ . Количество теплоты, отдаваемой излучением, для абсолютно черного тела пропорционально разности температур нагретого тела и окружающей среды в четвертой степени. В узком диапазоне температур можно считать отдачу теплоты приблизительно  $T$ . Отдача теплоты конвекцией изменяется по сложному закону с изменением  $T$ . В узком диапазоне температур можно также считать отдачу теплоты пропорциональной  $T$ . При этих упрощениях можно определить отдачу теплоты телом за элементарный промежуток времени  $kSTdt$ , где  $k$  – коэффициент теплоотдачи, равный количеству энергии в джоулях, отдаваемой с охлаждающейся поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  при превышении температуры на один градус.

Уравнение нагрева однородного тела выглядит так:

$$Pdt = cdT + kSTdt.$$

Разделив обе части уравнения на  $kSdt$ , получим

$$T + (c/kS) (dT/dt) = P/kS.$$

По окончании процесса изменения температуры  $dT/dt = 0$  и  $T_{уст} = P/(kS)$ , т.е. правая часть последнего выражения при  $P = \text{const}$  определяет установившееся превышение температуры  $T_{уст}$ .

Величину  $c/(kS)$ , измеряемую в Дж $\cdot$ °С $\cdot$ с, назовем постоянной времени нагрева  $\tau_n$ . С учетом этих замечаний получим

$$T + [\tau_n(dT/dt)] = T_{уст}.$$

Решение этого уравнения будет иметь следующий вид:

$$T = T_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + T_2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где  $T_1$  – начальное превышение температуры тела;  $T_2$  – конечное установившееся превышение температуры при данных потерях  $P$ .

Если  $T_1 = 0$ , т.е. температура электродвигателя в начале работы не отличалась от температуры окружающей среды, электродвигатель к началу работы полностью охладился, и выражение для  $T$  имеет вид

$$T = T_2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

Превышение температуры при работе возрастает по экспоненциальному закону; постоянная времени  $\tau_n$  может быть определена графическим построением. Установившееся превышение температуры достигается при  $t \rightarrow \infty$ , практически температура устанавливается по истечении времени  $t \leq (3 - 4)\tau_n$ . Постоянные времени нагрева имеют значение от нескольких минут, для электродвигателей малой мощности, до нескольких часов, для мощных электродвигателей.

Нарушение процесса теплообмена чаще всего происходит из-за загрязнения поверхности корпуса или из-за забивания пылью и грязью внутренних протоков для воздуха. Соответствующие мероприятия, проводимые в процессе эксплуатации, обеспечивают надлежащий уровень теплоотдачи.

Как видно из краткой характеристики отказов двигателей, их можно разделить на две категории (по причине появления отказа) – электрические и механические. Все они могут обуславливать аварийные пожароопасные режимы их работы.

Взрывозащищенные электродвигатели имеют худшие условия охлаждения. Поэтому контроль и профилактика условий и режимов эксплуатации взрывозащищенных электродвигателей должны быть безупречными в соответствии с установленными для конкретных условий регламентами и требованиями.

Разработку и применение средств защиты следует рассматривать как важнейшую часть мероприятий повышения надежности и срока службы и безопасности электродвигателей. Однако применение защитных устройств полностью не решает проблемы повышения надежности. Оно должно быть дополнено системой мероприятий по выполнению планово-предупредительных осмотров и обслуживания.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытуемый асинхронный двигатель  $M1$  получает питание через выключатель  $A6$  и трехфазную трансформаторную группу  $A2$  от трехфазного источника  $G1$ .

Преобразователь угловых перемещений  $G5$  генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения  $P3$  электромашинного агрегата.

С помощью мультиметров блока  $P1$  контролируются ток статорной обмотки и линейное напряжение испытуемого двигателя  $M1$ .

С помощью измерителя  $P2$  контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые одной фазой испытуемого двигателя  $M1$ .

Источник питания  $G2$  двигателя постоянного тока используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока  $G4$ , работающей в режиме генератора с независимым возбуждением и выступающей в качестве нагрузочной машины. Перечень необходимой аппаратуры и ее характеристики приведены в табл. 2.1.


## Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.2	~ 400 В / 16 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	104	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин <sup>-1</sup>
M2	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A2,A7	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 ВА; 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трёхполюсный выключатель	301.1	~ 400 В / 10 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра ≅ 0...1000 В / ≅ 0...10 А / 0...20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
P3	Указатель частоты вращения	506.2	-2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>

В лабораторной работе рассматриваются и сравниваются параметры при различных аварийных режимах работы асинхронного двигателя:

1. Определение зависимости величины тока в обмотках статора от величины напряжения трехфазного источника тока в режиме холостого хода.

1.1. Вычертить и собрать схему лабораторной установки (рис. 2.4) в соответствии с электрической схемой соединений (вариант 1 для пуска двигателя с короткозамкнутым ротором) / (вариант 2 для пуска двигателя с фазным ротором).

Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты для асинхронного двигателя с фазным ротором (рис. 2.5).



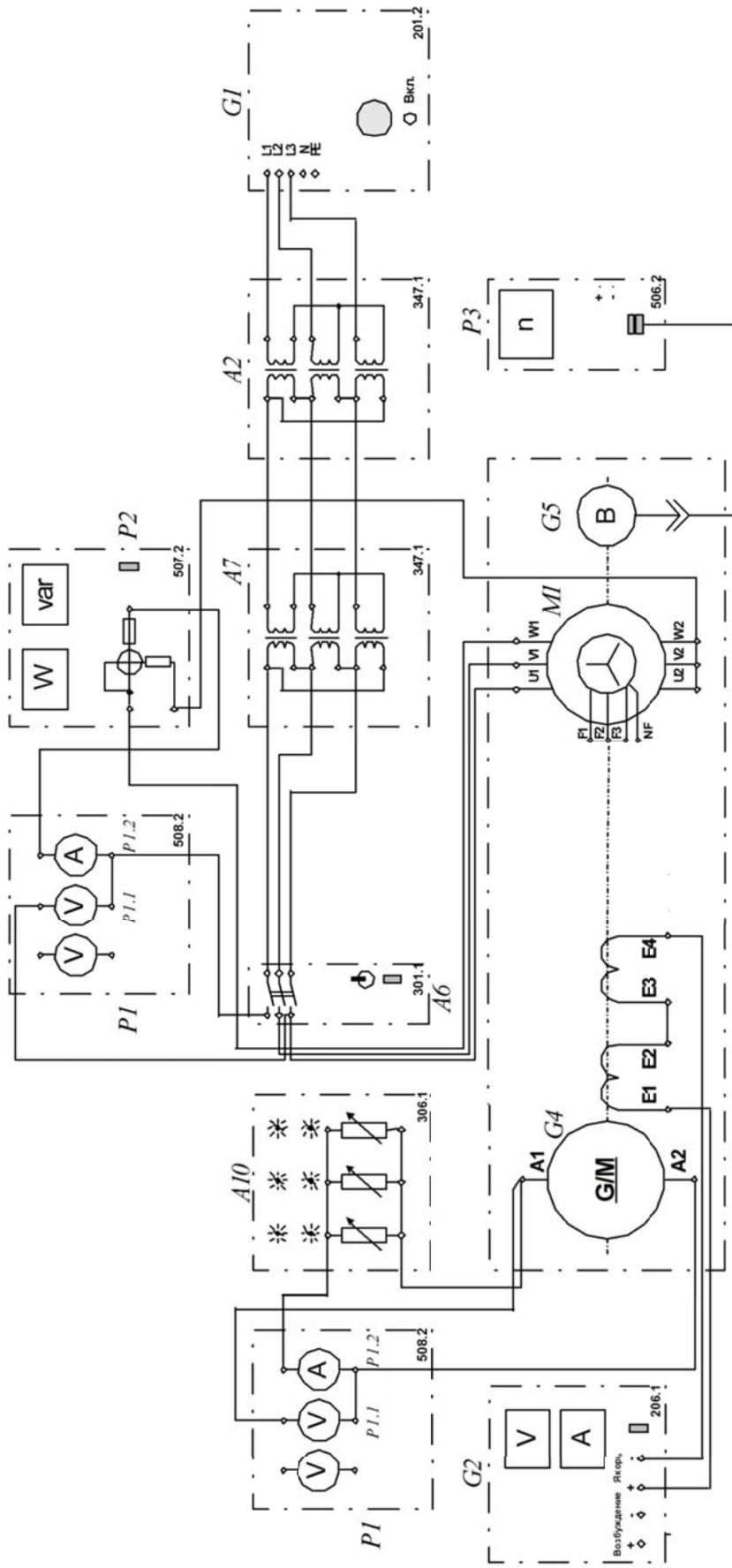


Рис. 2.4. Схема лабораторной установки

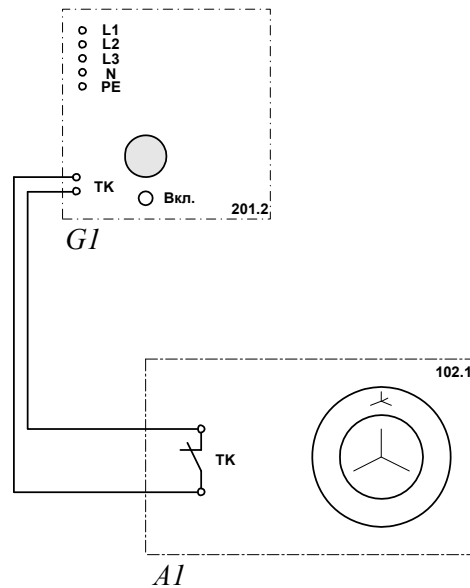


Рис. 2.5. Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока:  
*G1* – трехфазный источник питания; *A1* – машина переменного тока

1.2. Выключатель *A6* установите в положение "РУЧН.". Включите источник синусоидального напряжения промышленной частоты *G1* (201.2). О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

1.3. Контролируя линейное напряжение, подаваемое на трехполюсный выключатель *A6* (301.1) с помощью блока мультиметров *P1* (508.2) используя переключатели на трехфазных трансформаторах *A2*, *A7* (347.1) установить выходное линейное напряжение равным 115 В.

1.4. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя *A6* подключите двигатель *M1* к электрической сети.

1.5. Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформаторных групп *A2* и *A7*, варьируйте подводимое к двигателю *M1* линейное напряжение  $U$  в диапазоне 115...150 В и заносите показания вольтметра *P1.1* (напряжение  $U$ ), амперметра *P1.2* (фазный ток  $I_0$  двигателя *M1*), ваттметра и варметра измерителя *P2* (активная  $P_{01}$  и реактивная  $Q_{01}$  мощности, потребляемые одной фазой двигателя *M1*), а также указателя частоты вращения *P1* в таблицу 2.2.

1.6. По завершении эксперимента отключите выключатель *A6* нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник *G1* нажав на кнопку-гриб.

1.7. Используя полученные экспериментально данные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  полные активную  $P_0$  и реактивную  $Q_0$  и комплексную мощности, потребляемые двигателем *M1*, по формулам:

$$S_{01} = IU, P_0 = 3P_{01}, Q_0 = 3Q_{01}, S_0 = 3S_{01}.$$

Таблица 2.2

## Результаты измерений

Режим работы двигателя	Измерено					Вычислено				
	$U$ , В	$I_0$ , А	$n$ , об./мин	$P_{01}$ , Вт	$Q_{01}$ , Вар	$S_{01}$ , ВА	$\cos\varphi_0$	$P_0$ , Вт	$Q_0$ , Вар	$S_0$ , ВА
1. Холостой ход	115									
	120									
	125									
	130									
	135									
	140									
	145									
2. Номинальный	150									
	115									
	120									
	125									
	130									
	135									
	140									
3. Перегрузка	145									
	150									
	115									
	120									
	125									
	130									
	135									
4. Короткое замыкание (заблокирован вал ротора)	140									
	145									
	150									
	115		-							
	120		-							
	125		-							
	130		-							
5. Несимметрия линейных напряжений	135		-							
	140		-							
	145		-							
6.1 Потеря фазы во время работы двигателя	150		-							
	115		-							
	120		-							
6.2 Пуск двигателя в неполнофазном режиме работы	125		-							
	130		-							
	135		-							

Занести расчетные данные в табл. 2.2. Выполните проверку:

$$S_0^2 = P_0^2 + Q_0^2.$$

Используя полученные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения коэффициента мощности по формуле:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}},$$

и занесите полученные результаты в табл. 2.2.

1.8. Используя данные табл. 2.2 постройте искомые характеристики холостого хода  $I_0=f(U)$ ,  $n=f(U)$ ,  $P_0=f(U)$ ,  $Q_0=f(U)$ ,  $S_0=f(U)$ ,  $\cos\varphi_0=f(U)$  трехфазного асинхронного двигателя и сделайте соответствующие выводы.

2. Определение зависимости величины тока  $I_0$  в обмотках статора от величины напряжения  $U$  трехфазного источника тока в номинальном режиме работы и в режиме перегрузки. Источник питания двигателя постоянного тока  $G2$  используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока  $G4$ , работающей в режиме генератора с независимым возбуждением. Регулируя сопротивление реостата  $A9$  можно изменять нагрузку на вал асинхронного двигателя.

2.1. Выполните действия указанные в п.1.1 – 1.3.

2.2. Переключатели режима работы источника  $G2$  (206.1) установите в положение "РУЧН.". Регулировочные рукоятки источника поверните против часовой стрелки до упора.

2.3. Включите в сеть блок мультиметров  $P3$  для измерения напряжения на роторе машины постоянного тока (в режиме генератора).

2.4. Установите реостат  $A9$  на максимальное сопротивление.

2.5. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя  $A6$  подключите двигатель  $M1$  к электрической сети.

2.6. Включите источник питания двигателя постоянного тока. Установите напряжение якоря обмотки равным 220 В.

2.7. Уменьшите сопротивление реостата. (Звук вращения ротора асинхронного двигателя должен незначительно измениться).

2.8. Выполните действия указанные в п.1.5.

2.9. Еще уменьшите сопротивление реостата до остановки вала и сразу вернитесь на одно-два деления шкалы реостата, так чтобы вал мог вращаться.

2.10. Быстро (в течении 30 сек) выполните действия указанные в п.1.5.

2.11. По завершении эксперимента у источника  $G2$  поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель  $A6$

нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник  $G1$  нажав на кнопку-гриб.

2.12. Выполните действия указанные в п.1.7, 1.8.

3. Определение зависимости величины тока в обмотках статора от величины напряжения трехфазного источника тока в режиме короткого замыкания (с заблокированным валом ротора).

3.1. Выполните действия указанные в п.1.1 – 1.3.

3.2. Под руководством преподавателя заблокируйте вал ротора установки, используя специальное приспособление.

3.3. Меняя положение регулировочных рукояток трехфазных трансформаторных групп  $A2$  и  $A7$ , установите подводимое к двигателю  $M1$  линейное напряжение  $U$  в равным  $115$  В.

3.4. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя  $A6$  подключите двигатель  $M1$  к электрической сети не более чем на **10 сек. И быстро запишите** показания вольтметра  $P1.1$  (напряжение  $U$ ), амперметра  $P1.2$  (фазный ток  $I_0$  двигателя  $M1$ ), ваттметра и варметра измерителя  $P2$  (активная  $P_{01}$  и реактивная  $Q_{01}$  мощности, потребляемые одной фазой двигателя  $M1$ ) и сразу после этого нажатием кнопки «ОТКЛ» выключателя  $A6$  отключите двигатель  $M1$  от электрической сети.

3.6. По завершении эксперимента отключите выключатель  $A6$  нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник  $G1$  нажав на кнопку-гриб.

3.7. Выполните действия указанные в п.1.7, 1.8.

4. Определение величины тока  $I$  в обмотках статора, активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  при работе асинхронного двигателя при несимметрии линейных напряжениях.

4.1. Выполните действия указанные в п.1.1- 1.3. Отключите одну фазу, вынув провод из клеммы на корпусе двигателя. В разрыв цепи включите реостат. Переключатель сопротивления реостата установите на минимальное значение. Подключите вольтметры (мультиметры) к точкам  $U1 - V1$ ,  $V1 - W1$ ,  $U1 - W1$  для контроля симметрии линейного напряжения.

4.2. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя  $A6$  подключите двигатель  $M1$  к электрической сети. Ротор двигателя должен набрать номинальные обороты в трехфазном симметричном режиме работы.

4.3. Постепенно увеличивайте сопротивление реостата (до появления ощутимой вибрации двигателя).

4.4. Занесите показания вольтметров  $P1.1$  (линейное напряжение  $U$ ), амперметра  $P1.2$  (фазные токи  $I_0$  двигателя  $M1$ ), ваттметра и варметра измерителя  $P2$  (активная  $P_{01}$  и реактивная  $Q_{01}$  мощности, потребляемые двигателем  $M1$ ), а также указателя частоты вращения  $P1$  в таблицу 1.

4.5. По завершении эксперимента отключите выключатель  $A6$  нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник  $G1$  нажав на кнопку-гриб.

4.6. Используя полученные экспериментально данные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  между точками  $U1-V1$ ,  $V1-W1$ ,  $U1-W1$  полные активную  $P_0$  и реактивную  $Q_0$  и комплексную мощности, потребляемые двигателем  $M1$ , по формулам:

$$S_{01}=IU, S_{01(Umin)}=IU, P_0=2 \cdot P_{01} + P_{01(Umin)}, Q_0=2 \cdot Q_{01} + Q_{01(Umin)}, S_0=2 \cdot S_{01} + S_{01(Umin)}.$$

Занести расчетные данные в табл. 2.2. Выполните проверку:

$$S_0^2 = P_0^2 + Q_0^2.$$

Используя полученные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}},$$

и занесите полученные результаты в табл. 2.2.

4.7. Выполните действия указанные в п.1.8.

5. Определение величины тока  $I$  в обмотках статора, активной  $P$  и реактивной мощности  $Q$  при работе асинхронного двигателя в неполнофазном режиме (с отключенной одной фазой).

5.1. Потеря фазы во время работы двигателя.

5.1.1. Выполните действия указанные в п.1.1 – 1.3. Установите выходное линейное напряжение равным 150 В.

5.1.2. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя  $A6$  подключите двигатель  $M1$  к электрической сети. Ротор двигателя должен набрать номинальные обороты в трехфазном режиме работы.

5.1.3. Отключите одну фазу, вынув провод из клеммы на корпусе двигателя, после чего быстро (в течении 20 сек) занесите показания вольтметра  $P1.1$  (напряжение  $U$ ), амперметра  $P1.2$  (фазный ток  $I_0$  двигателя  $M1$ ), ваттметра и варметра измерителя  $P2$  (активная  $P_{01}$  и реактивная  $Q_{01}$  мощности, потребляемые одной фазой двигателя  $M1$ ), а также указателя частоты вращения  $P1$  в табл. 2.2.

5.1.4. По завершении эксперимента отключите выключатель  $A6$  нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник  $G1$  нажав на кнопку-гриб.

5.1.5. Используя полученные экспериментально данные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  полные активную  $P_0$  и реактивную  $Q_0$  и комплексную мощности, потребляемые двигателем  $M1$ , по формулам:

$$S_{01}=IU, P_0=2 \cdot P_{01}, Q_0=2 \cdot Q_{01}, S_0=2 \cdot S_{01}.$$

Занести расчетные данные в табл. 2.2. Выполните проверку:

$$S_0^2 = P_0^2 + Q_0^2.$$

Используя полученные, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}},$$

и занесите полученные результаты в табл. 2.2.

5.1.6. Выполните действия указанные в п.1.8.

5.2. Пуск двигателя в неполнофазном режиме работы.

5.2.1. Выполните действия указанные в п.1.1 – 1.3. Отключите одну фазу, вынув провод из клеммы на корпусе двигателя.

5.2.2. Нажатием кнопки «ВКЛ.» выключателя  $A6$  подключите двигатель  $M1$  к электрической сети на 10 секунд. Ротор двигателя не должен вращаться.

5.2.3. Быстро (в течении 10 сек) занесите показания вольтметра  $P1.1$  (напряжение  $U$ ), амперметра  $P1.2$  (фазный ток  $I_0$  двигателя  $M1$ ), ваттметра и варметра измерителя  $P2$  (активная  $P_{01}$  и реактивная  $Q_{01}$  мощности, потребляемые одной фазой двигателя  $M1$ ), в табл. 2.2.

5.2.4. По завершении эксперимента отключите выключатель  $A6$  нажатием кнопки "ОТКЛ.", затем отключите источник  $G1$  нажав на кнопку-гриб.

5.2.5. Выполните действия указанные в п. 5.1.5.

5.2.6. Выполните действия указанные в п. 1.8.

## Лабораторная работа №3

### Исследование эффективности защитного заземления электроустановок

**Цель работы** – экспериментальное исследование зависимостей, характеризующих явления при стекании тока в землю через различные виды заземлителей.

#### Задачи исследования:

1. Получить зависимость потенциала основания электрооборудования от расстояния  $\varphi_{\text{осн}} = f(x)$ .
2. Получить зависимость напряжения прикосновения от расстояния  $U_{\text{пр}} = f(x)$ .
3. Получить зависимость шагового напряжения от расстояния  $U_{\text{ш}} = f(x)$ .

### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одной из основных причин несчастных случаев от электрического тока является появление напряжения на металлических конструктивных частях электрооборудования, которые нормально не находятся под напряжением, – на корпусах, кожухах, ограждениях и т. п. Напряжение на этих частях может появиться как результат: повреждения изоляции токоведущих частей электрооборудования (вследствие механических воздействий, электрического пробоя, естественного старения и т. п.); падения провода, находящегося под напряжением, на конструктивные части электрооборудования; замыкания фазы сети на землю. Опасность поражения током в этих случаях устраняется с помощью защитного заземления, зануления, защитного отключения, выравнивания потенциала, двойной изоляцией, а также благодаря применению малых напряжений и специальных защитных средств – переносных приборов и приспособлений.

Защитным заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам (индуктивное влияние, вынос потенциала).

Принцип действия защитного заземления – снижение напряжения между корпусом, оказавшимся под напряжением, и землей до безопасного значения. Данное напряжение называется напряжением прикосновения  $U_{\text{пр}}$ . Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования, а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования, за счет появления потенциалов



на поверхности земли при стекании тока в землю. Данные потенциалы возникают из-за сравнительно большого удельного сопротивления грунта ( $10^3 - 10^4$  Ом м) и уменьшаются по мере удаления от места стекания тока в землю. В непосредственной близости от места стекания тока в землю потенциал основания, на котором стоит человек, практически равен потенциалу заземленного оборудования. При этом разность потенциалов, определяющая напряжение прикосновения, минимальна. По мере удаления данного основания от места стекания тока в землю указанная разность потенциалов возрастает, то есть эффект выравнивания потенциалов ослабевает. При удалении человека от места стекания тока в землю на 20 метров и более напряжение прикосновения практически равно потенциалу корпуса электроустановки оказавшейся под напряжением.

Если корпус электрооборудования не заземлен, и он оказался в контакте с фазой, то прикосновение человека к такому корпусу равносильно прикосновению к фазе. В этом случае величина тока, проходящего через тело человека, при определенных условиях может достигать опасных значений.

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя – металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей, и заземляющих проводников, соединяющих заземляющие части с заземлителем.

Заземлители бывают искусственные, предназначенные исключительно для целей заземления и естественные, находящиеся в земле металлические предметы иного назначения.

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляющего оборудования различают два типа заземляющих устройств (ЗУ) – выносное ЗУ и контурное ЗУ. У выносного ЗУ заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование. Это приводит к тому, что практически не происходит выравнивание потенциала основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования. Эффективность применения такого ЗУ обусловлена только снижением потенциала заземленного оборудования. При этом оказывается несущественным число и схема расположения заземляющих электродов (рис. 3.1).

При замыкании фазы на корпус и стекании тока  $I_3$  через заземлитель  $\varphi_3(x)$  достигает максимума в точке поверхности над заземлителем и практически затухает через 20 метров. При этом на руку человека, прикоснувшегося к корпусу электрооборудования, действует потенциал заземлителя  $\varphi_3$ , а ноги находятся под потенциалом, близким к нулю. Напряжение прикосновения  $U_{\text{пр}}$ , равное разности потенциалов руки и ног, в данном случае практически равно  $\varphi_3$ .

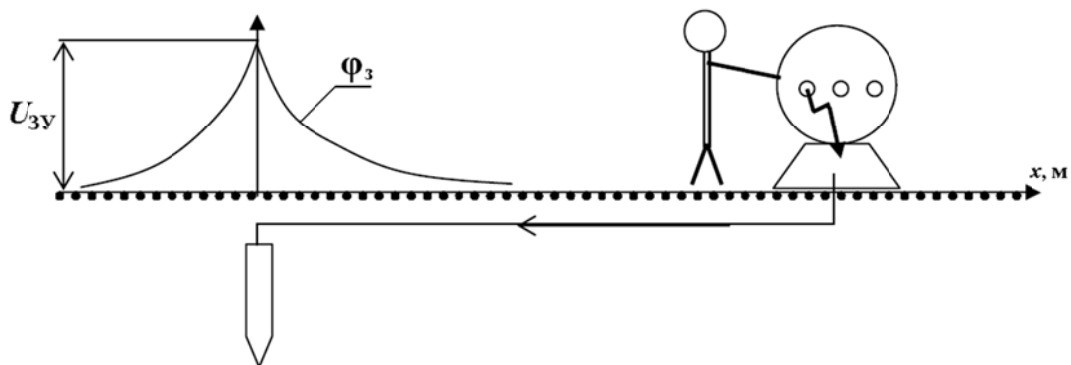


Рис. 3.1. Выносной (сосредоточенный) заземлитель

Контурные ЗУ характеризуются по возможности равномерным размещением заземляющих электродов по площадке, на которой установлено электрооборудование. Такое ЗУ называется распределенным. Снижение напряжения прикосновения в этом случае обусловлено не только перераспределением падения напряжения источника, но и выравниванием потенциалов заземленного корпуса электроустановки и основания, на котором стоит человек, как это показано на рис. 3.2. При этом распределения потенциалов отдельных заземлителей складываются, получается суммарное распределение потенциала  $\phi_{3\Sigma}(x)$ . Таким образом, потенциалы в точках рабочей площадки по своей величине приближаются к потенциалу заземленного корпуса оборудования, поэтому напряжение прикосновения  $U_{\text{ПР}}$  значительно уменьшается и составляет доли  $\phi_3$ .

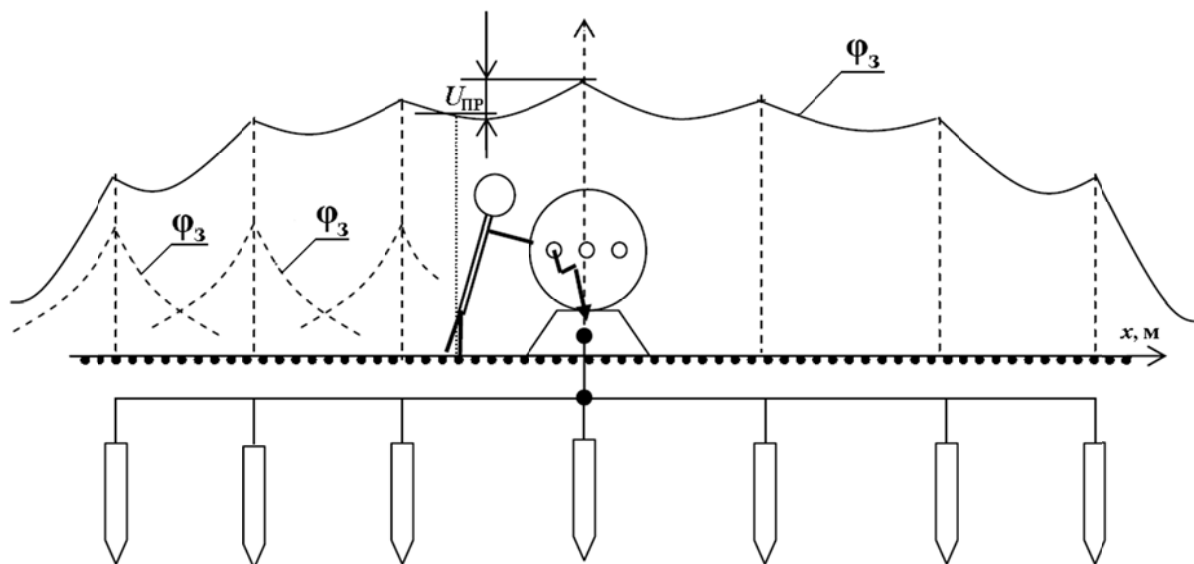


Рис. 3.2. Пример контурного (распределенного) заземлителя

В качестве естественных заземлителей могут использоваться: проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов); обсадные трубы артезианских колодцев, скважин, шурфов

и т.п.; металлические конструкции и арматура железобетонных конструкций зданий и сооружений, имеющие соединение с землей; металлические шпунты гидротехнических сооружений; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле. Алюминиевые оболочки кабелей и алюминиевые проводники не допускается использовать в качестве естественных заземлителей.

Естественные заземлители обладают, как правило, малым сопротивлением растеканию тока, поэтому использование их для целей заземления экономически весьма целесообразно.

Заземляющие проводники, т. е. проводники, соединяющие заземляемое оборудование с заземлителем выполняются обычно из полосовой стали. Прокладка их производится по стенам и другим конструкциям зданий. В качестве заземляющих проводников допускается использовать различные металлические конструкции.

Присоединение заземляемого оборудования к магистралям заземления, т. е. к основному заземляющему проводнику, идущему от заземлителя, осуществляется с помощью отдельных проводников. При этом последовательное включение заземляемого оборудования не допускается.

Отличительной окраской заземляющей сети является черный цвет, которым должны быть окрашены все открыто расположенные заземляющие проводники, конструкции и полосы сети заземления.

Область применения защитного заземления – трехфазные сети до 1 кВ с изолированной нейтралью и выше 1 кВ с любым режимом работы нейтрали.

Требования к устройству защитного заземления и зануления определены Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), в соответствии с которыми защитному заземлению или занулению подлежат все металлические и другие токопроводящие части электроустановок и оборудования, которые случайно в аварийном режиме могут оказаться под напряжением:

- при номинальном напряжении 380 В и выше переменного тока, 440 В и выше постоянного тока – во всех электроустановках;
- при номинальном напряжении выше 42 В, но ниже 380 В переменного тока и выше 110 В, но ниже 440 В постоянного тока – только в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных помещениях и в наружных электроустановках;
- во взрывоопасных помещениях необходимо заземлять все оборудование независимо от напряжения.

При номинальных напряжениях менее 42 В переменного тока или 110 В постоянного тока заземления или зануления электроустановок не требуется.

Для заземления установок, которые питаются от одной сети, целесообразно проектировать общее заземляющее устройство. Если имеется несколько заземляющих устройств, они должны быть электрически соединены между собой.

## МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В эксперименте используется три модели заземлителя: с полусферическим электродом (код 325), с вертикальным трубчатым электродом (код 326) и с протяженным трубчатым электродом на поверхности (код 327). Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо убедиться в том, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

1. Вычертить и собрать схему (рис. 3.3) с моделью заземлителя с полусферическим электродом (код 325).

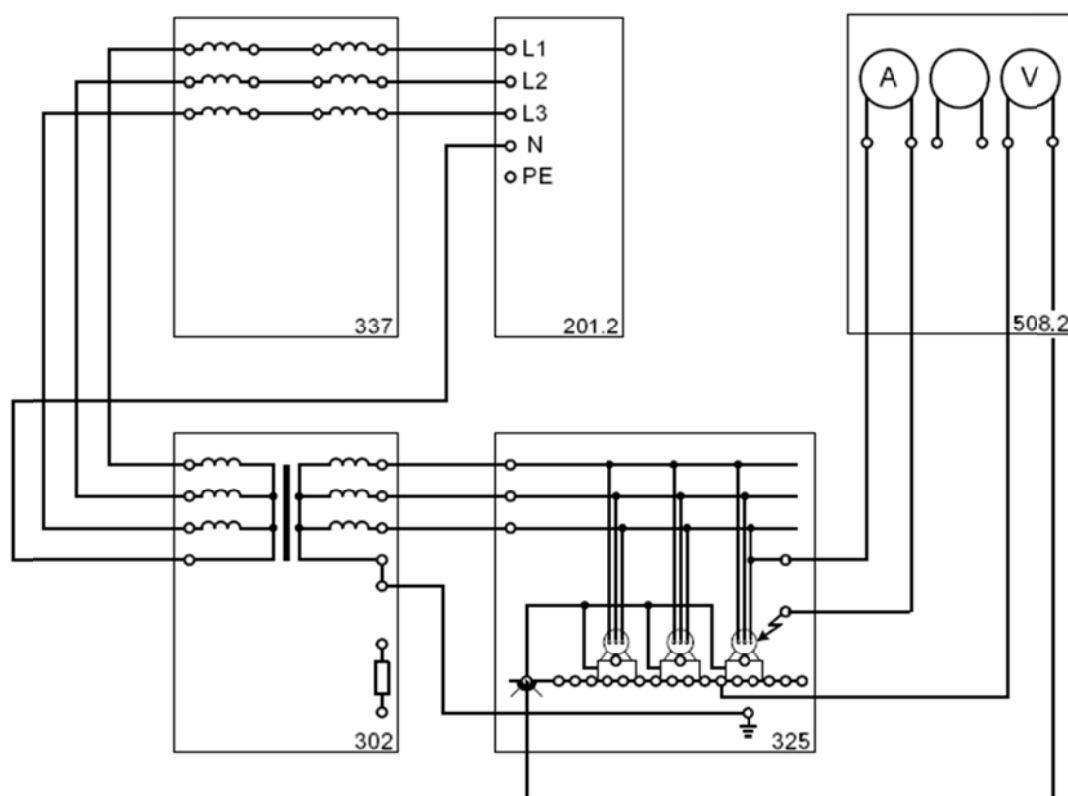


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки

2. Снять зависимость потенциала основания электрооборудования от расстояния  $\varphi_{\text{осн}} = f(x)$  (вольтметр включается между гнездом « $\perp$ » и гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ) при заданном сопротивлении грунта  $\rho$ . Показания приборов занести в табл. 3.1. Ток стекания в землю контролируется с помощью амперметра. Он не должен превышать 0,5 А.

## Результаты измерений

Вид заземлителя		Заземлитель с полусферическим электродом (325)		Заземлитель с вертикальным трубчатым электродом (326)		Заземлитель с протяженным трубчатым электродом (327)	
$\rho$ , Ом·м	$x$ , м	$\varphi_{осн}$ , В	$I$ , А	$\varphi_{осн}$ , В	$I$ , А	$\varphi_{осн}$ , В	$I$ , А
По заданию преподавателя	0						
	0,8						
	1,6						
	2,4						
	3,2						
	4						
	4,8						
	5,6						
	6,4						
	7,2						
	8						
	8,8						
	9,6						
	10,4						
	11,2						
12							

3. Снять зависимость напряжения прикосновения от расстояния  $U_{пр} = f(x)$  (вольтметр включается между гнездом «0» и гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ) при заданном сопротивлении грунта  $\rho$ . Показания приборов занести в табл. 3.2. Ток стекания в землю контролируется с помощью амперметра. Он не должен превышать 0,5 А.

## Результаты измерений

Вид заземлителя		Заземлитель с полусферическим электродом (325)		Заземлитель с вертикальным трубчатым электродом (326)		Заземлитель с протяженным трубчатым электродом (327)	
$\rho$ , Ом·м	$x$ , м	$U_{пр}$ , В	$I$ , А	$U_{пр}$ , В	$I$ , А	$U_{пр}$ , В	$I$ , А
По заданию преподавателя	0						
	0,8						
	1,6						
	2,4						
	3,2						
	4						
	4,8						
	5,6						
	6,4						
	7,2						
	8						
	8,8						
	9,6						
	10,4						
	11,2						
12							

4. Снять зависимость шагового напряжения от расстояния  $U_{ш} = f(x)$  (вольтметр включается между соседними гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ) при заданном сопротивлении грунта  $\rho$ . Показания приборов занести в табл. 3.3. Ток стекания в землю контролируется с помощью амперметра. Он не должен превышать 0,5 А.

## Результаты измерений

Вид заземлителя		Заземлитель с полусферическим электродом (325)		Заземлитель с вертикальным трубчатым электродом (326)		Заземлитель с протяженным трубчатым электродом (327)	
$\rho$ , Ом·м	$\Delta x$ , м	$U_{ш}$ , В	$I$ , А	$U_{ш}$ , В	$I$ , А	$U_{ш}$ , В	$I$ , А
По заданию преподавателя	0-0,8						
	0,8-1,6						
	1,6-2,4						
	2,4-3,2						
	3,2-4						
	4-4,8						
	4,8-5,6						
	5,6-6,4						
	6,4-7,2						
	7,2-8						
	8-8,8						
	8,8-9,6						
	9,6-10,4						
	10,4-11,2						
	11,2-12						

5. Произвести замену в электрической схеме: модель А6 заземлителя с полусферическим электродом (код 325) на модель А6 заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326) и снять зависимости  $\varphi_{осн} = f(x)$ ,  $U_{пр} = f(x)$ ,  $U_{ш} = f(x)$  в соответствии с п. 2 – 4.

6. Произвести замену в электрической схеме: модель заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326) на модель А6 заземлителя с протяженным трубчатым электродом на поверхности (код 327) и снять зависимости  $\varphi_{осн} = f(x)$ ,  $U_{пр} = f(x)$ ,  $U_{ш} = f(x)$  в соответствии с п. 2 – 4.

7. По результатам измерений построить графики изменения  $\varphi_{осн} = f(x)$ ,  $U_{пр} = f(x)$ ,  $U_{ш} = f(x)$  в одних осях для каждого типа заземлителя.

## Лабораторная работа №4

### Исследование зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека

**Цель работы** – экспериментальное исследование зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека при протекании через него электрического тока.

#### **Задачи исследования:**

1. Получить зависимость электрического сопротивления тела человека  $Z_h$  от площади контактной поверхности  $S$ .

2. Получить зависимость электрического сопротивления тела человека от частоты электрического тока  $f$ .

### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В Российской Федерации поражения электрическим током со смертельным исходом составляют порядка 3% от общего числа несчастных случаев.

Статистика показывает, что при работе с электроустановками напряжением до 1кВ (1000 В) несчастных случаев происходит примерно в 3 раза больше, чем в электроустановках напряжением выше 1кВ.

Причинами этого являются большая распространенность установок напряжением до 1кВ и работа с ними большого числа людей, не имеющих допуска на работу с электричеством или соответствующую специальность. В то время как к оборудованию с напряжением выше 1кВ допуск может получить только высококвалифицированный персонал.

Степень воздействия электрического тока на организм человека зависит в основном от следующих факторов:

- величины тока, проходящего через жизненно важные органы;
- длительности воздействия тока;
- частоты и рода тока;
- приложенного напряжения;
- пути прохождения тока через тело человека;
- состояния здоровья человека и фактора внимания.



Сопротивление тела человека между двумя касаниями (электродами) складывается из сопротивления внутренних тканей и органов  $R_{вн}$ , и сопротивления кожи. Наружный слой кожи, расположенный между электродом и хорошо проводящей внутренней областью кожи (рис. 4.1), можно представить в виде несовершенного конденсатора  $C_{вн}$ . Величина удельной емкости этого конденсатора колеблется в пределах  $(0,0047 \dots 0,0152) \cdot 10^{-4}$  мкФ/м<sup>2</sup> в зависимости от толщины наружного слоя кожи (эпидермиса) и его относительной диэлектрической проницаемости.

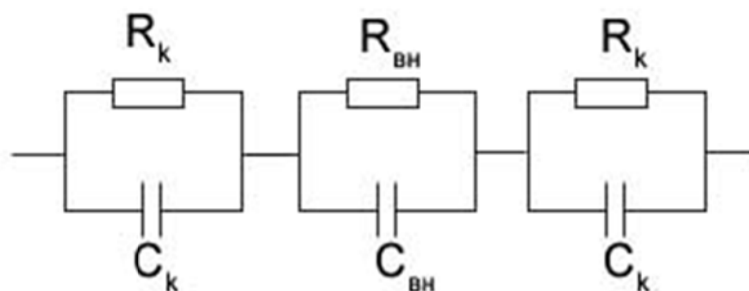


Рис. 4.1. Схема замещения тела человека.

Сопротивление  $R_{вн}$  внутренних тканей и органов слабо зависит от общего состояния человека, в расчётах принимают  $R_{вн} = 1$  кОм (для пути «ладонь-ступня»). Сопротивление кожи  $R_k$  при прохождении тока от её поверхности к внутренним тканям в десятки раз больше  $R_{вн}$ . Поэтому для постоянного и низкочастотного тока (50 – 60 Гц) сопротивление кожи при точечном контакте является определяющим фактором, который ограничивает ток. При высоких частотах (10 – 20 кГц) более существенным фактором является внутренне сопротивление тела. Следовательно, в большинстве ситуаций ток, протекающий через тело, в основном зависит от состояния тела в точке контакта. Сопротивление кожи  $R_k$  существенно зависит от внутренних и внешних причин (потливость, влажность, наличие раневого повреждения). Кроме того, на разных участках тела кожа имеет разную толщину и, следовательно, различное сопротивление.

При сухой неповрежденной коже сопротивление тела человека может достигать от 10 кОм до 100 кОм. Поэтому, учитывая изменчивость сопротивления кожи, её вообще при расчётах не учитывают, принимая  $R_k = 0$ . В практике сопротивление тела человека обычно считают активным и равным 1000 Ом. Ток, протекающий через тело человека, рассчитывают по формуле:  $I=U/R$  (Закон Ома).

Наиболее чувствительными к электрическому току частями организма являются мозг, грудные мышцы и нервные центры, которые контролируют дыхание и сердце.

В 1950-х годах было однозначно установлено, что при воздействии электрического тока на человека, наиболее уязвимым органом является его сердце.

**Фибрилляция** - беспорядочные сокращения сердечной мышцы - может возникать даже при малых значениях тока. Также было установлено, что результат воздействия электрического тока на организм человека зависит не только от значения тока, но и от продолжительности его протекания, пути тока через тело человека, а также, в меньшей степени, от частоты тока, формы кривой, коэффициента пульсации и некоторых других факторов.

Электрический ток, проходя через тело человека, производит тепловое, электролитическое и биологическое действие.

**Тепловое** действие приводит к повышению температуры тканей тела человека и, в ряде случаев, к их обгоранию. Кроме того, тепловое действие тока приводит к уменьшению электрического сопротивления тела человека, а значит, к усилению теплового, химического и биологического воздействий тока на человека.

**Электролитическое** действие тока ведет к электролизу крови и иных, содержащихся в организме растворов, что вызывает изменение их химического состава и, следовательно, к нарушению их функций.

**Биологическое** действие электрического тока проявляется в опасном возбуждении живых клеток организма, в частности, нервных клеток и всей нервной системы. Такое возбуждение тока в зависимости от времени воздействия может сопровождаться судорогами, явлениями паралича. В ряде случаев возможен паралич дыхательного аппарата и паралич сердца. Прекращение работы сердца в результате действия электрического тока может быть следствием непосредственного действия тока на сердечную мышцу, когда ток проходит через область сердца, или рефлекторным - вследствие нарушения функций центральной нервной системы.

Кратковременное действие больших токов не вызывает ни паралича дыхания, ни фибрилляции сердца. Сердечная мышца при этом резко сокращается и остается в таком состоянии до отключения тока, после чего продолжает работать.

Причинами смерти от воздействия электрического тока могут быть прекращение работы сердца, прекращение дыхания и электрический шок. При этом следует помнить, что прекращение дыхания примерно через 2 минуты приводит к остановке сердца, и, наоборот, прекращение кровообращения также быстро приводит к прекращению дыхания. Наступает кислородное голодание организма и смерть.

**Электрический шок** - это тяжелая нервно рефлекторная реакция организма, сопровождающаяся глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ. Длится он, как правило, от десятков минут до суток.

При параличе дыхания, как и при параличе сердца функции этих органов самостоятельно не восстанавливаются. В этом случае необходимо оказание первой помощи (искусственное дыхание и массаж сердца).

#### **Род и частота тока.**

Постоянный и переменный токи оказывают различные воздействия на организм главным образом при напряжениях до 500 В. При таких напряжениях степень поражения постоянным током меньше, чем переменным той же величины. Считается, что напряжение 120 В постоянного тока при одинаковых условиях эквивалентно по опасности напряжению 40 В переменного тока промышленной частоты. При напряжении 500 В и выше различий в воздействии постоянного и переменного токов практически не наблюдаются.

Увеличение частоты от 0 до 50 Гц повышает опасность поражения током. Дальнейшее увеличение частоты, несмотря на рост тока, проходящего через человека, сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте 500 кГц. При этом возможны лишь ожоги. Снижение опасности поражения током становится заметным при достижении частоты 1000 Гц.

#### **Величина тока.**

Человек начинает ощущать раздражающее действие переменного тока промышленной частоты при величине тока 1-1,5 мА и постоянного тока 5 - 7 мА. Эти токи называются пороговыми ощутимыми токами. Они не представляют серьезной опасности, и при таком токе человек может самостоятельно освободиться от воздействия.

При переменных токах 5-10 мА раздражающее действие тока становится более сильным, появляется боль в мышцах, сопровождаемая судорожным их сокращением.

При токах 10-15 мА боль становится трудно переносимой, а судороги мышц рук или ног становятся такими сильными, что человек не в состоянии самостоятельно освободиться от действия тока. Они называются не отпускающие токи.

Переменный ток промышленной частоты величиной 25 мА и выше воздействует не только на мышцы рук и ног, но также и на мышцы грудной клетки, что может привести к параличу дыхания и вызвать смерть.

Ток 50 мА при частоте 50 Гц вызывает быстрое нарушение работы органов дыхания, а ток около 100 мА и более при 50 Гц и 300 мА при постоянном напряжении за короткое время (1-2 с) поражает мышцу сердца и вызывает его фибрилляцию. Эти токи называются фибрилляционными.

Токи более 5 А вызывают паралич сердца и дыхания, минуя стадию фибрилляции сердца. Чем больше время протекания тока через тело человека, тем тяжелее его результаты и больше вероятность летального исхода.

#### **Пути движения тока.**

Наиболее опасным является прохождение тока через органы дыхания и сердце по продольной оси (от головы к ногам).

Доля общего тока, проходящего через сердце:

- путь «рука – рука» - **3,5 %** общего тока;
- путь «левая рука - ноги» - **4 %** общего тока;
- путь «правая рука - ноги» - **7 %** общего тока;
- путь «нога – нога» - **0,5 %** общего тока.

## **МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В эксперименте используется устройство для исследования сопротивления тела человека (код 341).

Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо убедиться в том, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

1. Подключите с помощью сетевого шнура устройство для исследования сопротивления тела человека к трехпроводной электрической сети 220 В и включите на его лицевой панели выключатель «СЕТЬ».

2. Оперирова кнопки на поле «ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ» по индикатору выставьте требуемое напряжение  $U$  и его частоту  $f$ .

2.1. Приложите ладони левой и правой руки к соответствующим электродам с площадью контактной поверхности  $S_1 = 1250 \text{ мм}^2$  и с верхнего индикатора снимите величину тока  $I_h$ , протекающего через тело человека;

2.2. Приложите ладони левой и правой руки к соответствующим электродам с площадью контактной поверхности  $S_2 = 2500 \text{ мм}^2$  и с верхнего индикатора считайте величину тока  $I_h$ , протекающего через тело человека;

2.3. Изменяя частоту  $f$  повторите измерения (2.1. - 2.2.);

2.4. Результаты измерений внесите в табл. 4.1.

3. Рассчитайте электрическое сопротивление тела человека  $Z_h = U/I_h$  и сделайте вывод о влиянии на него площади контактной поверхности и частоты  $f$ .

4. По завершении эксперимента отключите питание устройства для исследования сопротивления тела человека.

5. По результатам измерений постройте график зависимости сопротивления тела человека  $Z_h$  от логарифма частоты  $f$ .

Таблица 4.1

**Результаты измерения электрического сопротивления тела человека**

Частота		$U, \text{В}$	$S_1 = 1250 \text{ мм}^2$		$S_2 = 2500 \text{ мм}^2$	
$f, \text{Гц}$	$\lg f$		$I, \text{мА}$	$Z_h, \text{кОм}$	$I, \text{мА}$	$Z_h, \text{кОм}$
2	0,3					
10	1					
20	1,30					
30	1,48					
40	1,60					
50	1,70					
70	1,85					
100	2,00					
300	2,48					
500	2,70					
700	2,84					
1000	3,00					
2000	3,48					
5000	3,70					
7000	3,85					
10000	4,00					
20000	4,30					

## Литература

1. *Черкасов В.Н., Зыков В.Н.* Пожарная безопасность электроустановок. 5-е изд. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012.
2. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. – М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2003.
3. *Сенигов П.Н.* Основы электробезопасности. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ОЭБ.001 РБЭ (912). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2004. – 39 с.
4. *Дашковский А.Г., Бородин Ю.В., Сечин А.А., Гуляев М.В., Кагиров А.Г.* Комплект лабораторных работ: учебное пособие по практическому изучению средств защиты от электропоражения в сетях до 1 кВ для студентов всех специальностей. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 97 с.
5. ГОСТ 12.1.038-82 «ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» в ред. 1988г.
6. *Белинский С.О., Гимаев С.Р.* Лабораторные работы по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности». Часть II. Электробезопасность, Издательство УрГУПС, 2014. – 78 с.
7. *Маслов В. В., Мустафаев Х. М.* Электробезопасность: лабораторный практикум. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 109 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
(справочное)

Таблица 1

**Наибольшие допустимые напряжения прикосновения  $U_{ПР}$  и токи  $I_h$ ,  
проходящие через человека, при аварийном режиме производственных  
электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземлённой  
или изолированной нейтралью по ГОСТ 12.1.038-82**

Род и частота тока	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия, с							
		0,01-0,08	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	Более 1,0
Переменный, 50 Гц	$U_{ПР}$ , В	550	340	135	105	85	70	60	20
	$I_h$ , мА	650	400	160	125	90	65	50	6
Переменный, 400 Гц	$U_{ПР}$ , В	650	500	330	200	140	110	100	36
	$I_h$ , мА	650	500	330	200	140	110	100	8
Постоянный	$U_{ПР}$ , В	650	500	350	250	230	210	200	40
	$I_h$ , мА	650	500	350	250	230	210	200	15

## Содержание

Методика выполнения лабораторных работ и правила техники безопасности при работе в электрических лабораториях.....	3
Лабораторная работа № 1. Исследование влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности и пожарной опасности.....	5
Лабораторная работа № 2. Исследование аварийных режимов работы трехфазных асинхронных двигателей.....	17
Лабораторная работа № 3. Исследование эффективности защитного заземления электроустановок.....	40
Лабораторная работа № 4. Исследование зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека.....	48
Литература.....	54
Приложение 1 (справочное).....	55



# ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Методические указания

Составитель: Хрисониди В.А.

Редактор В.А. Хрисониди

Компьютерная верстка В.А. Хрисониди

---

Подписано в печать	2019 г.	Формат 60×84/16
Бумага офсетная		Офсетная печать
Печ. л.		Изд. № _____
Усл. печ. л.		Тираж _____ экз.
Уч.- изд. л.		Заказ № _____
	Цена	руб.

---

Филиал ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет» в поселке Яблоновском  
385140, пос. Яблоновский, ул. Связи, 11, корп. 2