

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра безопасности жизнедеятельности

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ
НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплинам
«Охрана труда», «Производственная безопасность»

Минск 2007

УДК 621.311:658.345(07)

ББК 31.29ня7

И 88

Рекомендовано научно-методическим советом факультета «Технический сервис в АПК» БГАТУ.

Протокол № 2 от 30 марта 2007 г.

Составители:

доц. кафедры безопасности жизнедеятельности, канд. техн. наук А.И. Федорчук;

ст. преподаватель В.Г. Андруш;

ст. преподаватель Л.Ю. Цвирко;

студентка 4 курса А.В. Гулая

Рецензенты:

главный инженер-госинспектор Государственной инспекции по охране труда, транспортной и пожарной безопасности Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь Н.А. Гордиенко;

зав. кафедрой электроснабжения БГАТУ, канд. техн. наук Н.Е. Шевчик

СОДЕРЖАНИЕ

Порядок выполнения работы.....	4
1 Общие положения.....	4
2 Факторы опасности поражения электрическим током	7
3 Моделирование ситуаций на стенде	11
3.1 Трехфазная четырехпроводная сеть ($TN - C - S$)	11
3.2 Трехфазная трехпроводная сеть (IT).....	13
4 Порядок проведения измерений и выполнение расчетов.....	17
Вопросы для контроля знаний.....	19
Литература	19

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Цель работы: исследовать влияние параметров трехфазной сети напряжением до 1000 В на величину тока, протекающего через тело человека в результате его прикосновения к открытым или сторонним проводящим частям, оказавшимся под напряжением.

Материалы и оборудование: стенд для исследования с измерительными приборами, методические указания к лабораторной работе.

Задание:

1. Изучить методические указания, уяснив особенности трехфазных сетей с различным режимом нейтрали по фактору опасности поражения электрическим током.
2. Подготовить схемы и таблицу для фиксации результатов измерений и расчетов.
3. Для рассмотренных ситуаций произвести расчеты токов, протекающих через тело человека, напряжений прикосновения и шага.
4. Произвести измерения и сопоставить их результаты с расчетными, сделать выводы.
5. Оформить отчет по лабораторной работе и ответить на контрольные вопросы.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Действие электрического тока на живую ткань, в отличие от действия других материальных факторов (пар, химические вещества, излучения и т. п.), носит своеобразный и разносторонний характер. В самом деле, проходя через организм человека, электрический ток производит термическое и электролитическое действия, являющиеся обычными физико-химическими процессами, присущими как живой, так и неживой материи; одновременно электрический ток производит и биологическое действие, которое является особым специфическим процессом, свойственным лишь живой ткани.

Многообразие действий электрического тока на организм нередко приводит к различным электротравмам, которые условно можно свести к двум видам: местные электротравмы, когда возникает местное повреждение орга-

низма, и общие электротравмы, так называемые электрические удары, когда поражается весь организм из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем.

Примерное распределение несчастных случаев от электрического тока по указанным видам травм следующее:

20 % — местные электротравмы;

25 % — электрические удары;

55 % — смешанные травмы, т.е. одновременно местные электротравмы и удары.

Местная электротравма — ярко выраженное местное нарушение целостности тканей тела, в том числе костных тканей, вызванное воздействием электрического тока или электрической дуги. Чаще всего это поверхностные повреждения, т.е. поражения кожи, а иногда других мягких тканей, а также связок и костей.

Опасность местных травм и сложность их лечения обуславливаются характером и степенью повреждения тканей, а также реакцией организма на это повреждение. Обычно местные травмы излечиваются и работоспособность пострадавшего восстанавливается полностью или частично. В редких случаях (при тяжелых ожогах) человек погибает. В таких случаях непосредственной причиной смерти является не электрический ток, а местное повреждение организма, вызванное током.

Под электрическим ударом следует понимать возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, сопровождающееся произвольными судорожными сокращениями мышц. Степень отрицательного воздействия на организм этих явлений может быть различной. В худшем случае электрический удар приводит к нарушению и даже полному прекращению деятельности жизненно важных органов — легких и сердца, т.е. к гибели организма. При этом внешних местных повреждений человек может и не иметь.

В зависимости от исхода поражения электрические удары можно условно разделить на следующие четыре степени:

- I — судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- II — судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимся дыханием и работой сердца;
- III — потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (или того и другого вместе);
- IV — клиническая смерть, т.е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Когда электрический удар не приводит к смерти, он тем не менее может вызвать серьезные расстройства в организме, которые проявляются сразу за воздействием тока или через несколько часов, дней и даже месяцев.

Так, в результате электрического удара, т.е. прохождения тока через тело человека, сопровождающегося произвольными судорожными сокращениями мышц, могут возникнуть или обостриться сердечно-сосудистые болезни — аритмия сердца, стенокардия, повышение или понижение артериального давления и др., а также нервные болезни — невроз, эндокринные нарушения и пр. Нередко у пострадавших появляется рассеянность, ослабевают память и внимание. Если подобных ярко выраженных заболеваний не наступает, то и в этом случае считается, что электрический удар резко ослабляет сопротивляемость организма к болезням, и в первую очередь к сердечно-сосудистым и нервным заболеваниям, которые могут возникнуть впоследствии по другим причинам.

Электрическим ударам подвергается обычно свыше 80 % пострадавших от тока (из числа учитываемых случаев поражения током). При этом большая часть их (55 %) сопровождается местными электротравмами, в первую очередь ожогами. Около 25 % случаев поражения током — это удары без местных травм, хотя на теле пострадавших можно обнаружить места входа и выхода тока — весьма незначительные участки поврежденной кожи, которые за их малость как травмы не учитываются.

Электрические удары являются грозной опасностью для жизни пострадавшего: они вызывают 85–87 % смертельных поражений (считая за 100 % все случаи со смертельным исходом от действия тока). Правда, большая часть смер-

тельных случаев (60–62 %) является результатом смешанных поражений, т.е. одновременного действия электрических ударов и местных электротравм (ожогов).

2 ФАКТОРЫ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Тяжесть поражения электрическим током зависит от ряда факторов и неодинакова в различных ситуациях. Известны, например, случаи гибели людей от слабых токов при напряжении 12 В и благополучного исхода при ударе напряжением 1000 В и более. Физически слабые, больные, утомленные люди, а также женщины хуже переносят действие электрического тока.

При устройстве и эксплуатации электроустановок, при проектировании способов и средств защиты от поражения электрическим током необходимо, чтобы *напряжение прикосновения* $U_{пр}$ (напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек) и величина тока I в аварийном режиме (работа неисправных электроустановок) не превышала значений, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Предельно допустимые напряжения прикосновения и токи

Род тока	Параметры	Предельно допустимые уровни (не более) при продолжительности воздействия, с					
		0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	Свыше 1,0
Переменный 50 Гц	$U_{пр}$, В	500	165	100	70	50	36
	I , мА	500	165	100	70	50	6
Постоянный	$U_{пр}$, В	500	350	250	230	200	40
	I , мА	500	350	250	230	200	15

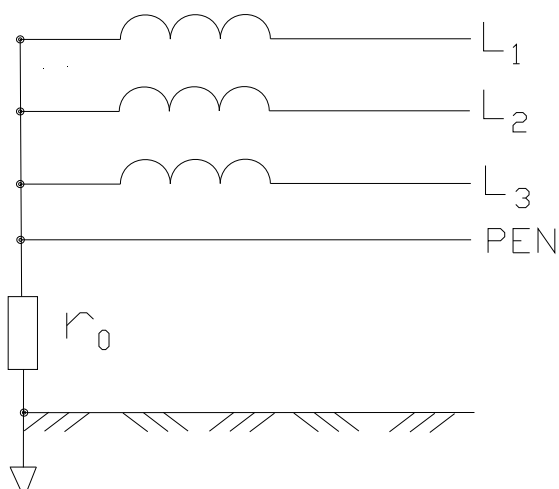
Напряжение прикосновения $U_{пр}$, под которым оказывается человек, а следовательно и величина тока, проходящего через тело человека I_h , зависит от ряда факторов:

- напряжения сети;
- схемы электросети и режима нейтрали источника питания;
- схемы включения человека в электрическую цепь;

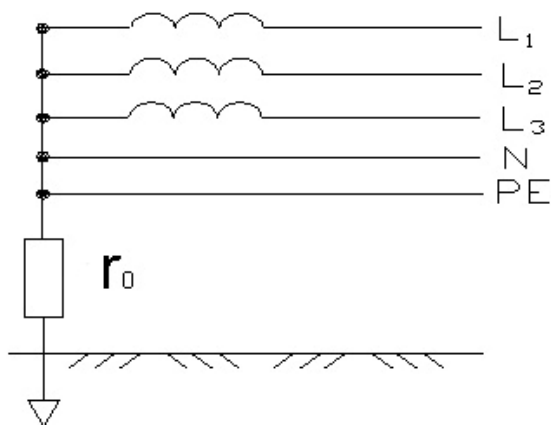
- степени изоляции токоведущих частей от земли;
- ёмкости токоведущих частей относительно земли и др.

В зависимости от режима нейтрали источника тока и наличия нулевого провода могут быть четыре основные схемы 3-фазной сети (рисунок 1):

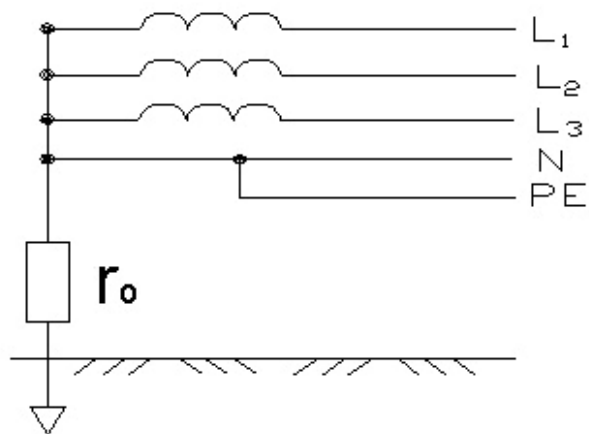
- четырёхпроводная с глухозаземленной нейтралью (система $TN-C$)
- пятипроводная с глухозаземленной нейтралью (система $TN-S$)
- четырёх-пятипроводная с глухозаземленной нейтралью (система $TN-C-S$)
- трехпроводная с изолированной нейтралью (система IT)



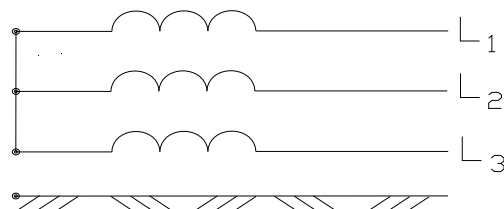
а



б



В



Г

Рисунок 1 Основные схемы трехфазной сети напряжением 0,38 кВ

Наибольшее распространение имеют электрические сети трехфазного тока с изолированной или глухозаземленной нейтралью источника тока (генератора, трансформатора). В настоящее время в сельском хозяйстве применяют в основном трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью (системы $TN - C$, $TN - C - S$), обеспечивающие питание установок напряжением 380 и 220 В.

Схемы включения человека в электрическую цепь могут быть различными. Чаще других происходит однофазное включение человека в цепь между фазным проводом и землей и двухфазное — между двумя фазными проводами. При однофазном прикосновении ток, проходящий через тело человека, может быть с достаточной для практики точностью определен по формуле:

$$I = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_0}, \quad (1)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение, В; $R_{\text{ч}}$ — расчетное сопротивление тела человека (≈ 1000 Ом); $R_{\text{об}}$ — сопротивление обуви, Ом; $R_{\text{п}}$ — сопротивление пола, Ом; R_0 — сопротивление глухозаземленной нейтрали, Ом.

Чем больше напряжение прикосновения и чем меньше сопротивление участков цепи замыкания, тем выше ток, проходящий через тело человека.

Если принять $U_{\phi} = 220$ В; а $R_{\text{об}} = 0$; $R_{\text{п}} = 0$ (при хорошем контакте человека с землей), $R_0 = 10$ Ом, то сила проходящего через человека тока будет равна 0,218 А (218 мА), что значительно превышает смертельный ток (90–100 мА).

Если принять, что человек стоит на сухом деревянном полу ($R_{\text{п}} = 10^5$ Ом) в резиновой обуви ($R_{\text{об}} = 45 \times 10^3$ Ом), то сила тока будет равна 0,0015 А (1,5 мА). Такой ток не опасен.

При двухфазном включении напряжение прикосновения в 1,73 раза больше, чем при однофазном. Сопротивление пола, обуви в этом случае не влияет на ток, а его величина определяется выражением:

$$I = \sqrt{3} \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ч}}}. \quad (2)$$

При $U_{\phi} = 220$ В и $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом сила тока, проходящего через человека, составит 0,38 А (380 мА), что значительно больше, чем при однофазном включении. Следовательно, двухфазное включение человека в электрическую цепь наиболее опасно.

При обрыве электрического провода, пробое изоляции на заземленный корпус машины и при другой прямой утечке электроэнергии в землю (например, от молниеотвода) человек может оказаться в зоне растекания тока в земле под напряжением, называемым *шаговым*.

В зоне контакта электрического проводника с землей потенциал земли φ наибольший и равен потенциалу проводника, а на расстоянии 20 м он уже практически равен нулю. При нахождении человека в зоне растекания тока его ноги могут оказаться разноудаленными от зоны контакта, в точках с разными потенциалами. Разница этих потенциалов и создает шаговое напряжение. Оно максимально вблизи зоны контакта и убывает при удалении от нее. На расстоянии 20 м и более шаговое напряжение практически равно нулю. С увеличением ширины шага оно возрастает, поэтому выходить из зоны шагового напряжения надо короткими шагами или прыжками на двух ногах.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИТУАЦИЙ НА СТЕНДЕ

На стенде приведены схемы трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью (рисунок 2) и трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью (рисунок 3).

3.1 Трехфазная четырехпроводная сеть ($TN-C-S$)

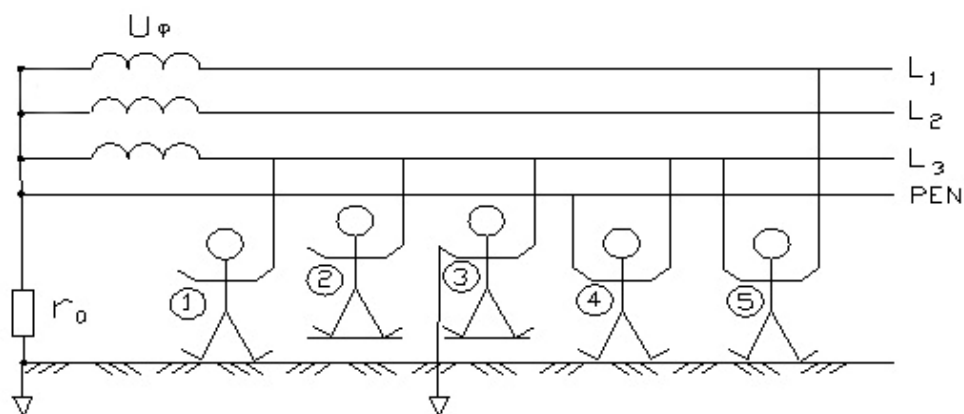


Рисунок 2 Возможные ситуации прикосновения человека в электрической сети $TN-C-S$

При нормальном режиме работы проводимости фазных и нулевого провода относительно земли имеют малые значения и с некоторым допуще-

нием могут быть приравнены к нулю (рисунок 2). В этом случае выражения для определения напряжения прикосновения и тока через тело человека при прикосновении его к сети значительно упрощается.

Рассмотрим возможные ситуации (рисунок 2).

Ситуация 1. Человек, стоящий на земле прикасается к фазному проводу. В этом случае

$$U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_h + R_0} R_h, \quad (3)$$

$$I_h = \frac{U_{\text{ф}}}{R_h + R_0}, \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжения прикосновения, В;

$U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение, В;

R_h — сопротивление тела человека, Ом;

R_0 — сопротивление заземления нейтрали источника питания.

В этой ситуации путь тока — «от руки к ногам».

Ситуация 2. Человек, стоящий на изолированном коврик (деревянной подставке), прикасается к фазному проводу. В этом случае

$$I_h = \frac{U_{\text{ф}}}{R_h + R_0 + R_{\text{осн}}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{осн}}$ — сопротивление основания (подставки), на котором стоит человек.

Ситуация 3. Человек, стоящий на коврик (деревянной подставке), прикасается к фазному проводу, а другой рукой держится за металлоконструкцию, соединенную с землей (например, за радиатор отопления). В этом случае

$$I_h = \frac{U_{\text{ф}}}{R_h + R_0 + R_3}, \quad (6)$$

где R_3 — сопротивление растеканию тока естественного заземлителя (металлоконструкции).

В этой ситуации путь тока — «от руки к руке».

Ситуация 4. Человек, стоящий на земле, прикасается к фазному и нулевому проводу. Здесь можно использовать формулы, приведенные в ситуации 1, но $R_0 = 0$, т.е.

$$I_h = \frac{U_\Phi}{R_h}. \quad (7)$$

Ситуация 5. Человек попадает под линейное напряжение (U_Π), прикасаясь к двум фазным проводникам. В этом случае

$$I_h = \frac{U_\Pi}{R_h}. \quad (8)$$

3.2 Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью (IT)

В указанных сетях (рисунок 3) при нормальном режиме работы и сравнительно коротких воздушных линиях

$$\begin{aligned} r_1 = r_2 = r_3 = r, \\ C_1 = C_2 = C_3 = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где r — сопротивление изоляции проводов;

C — ёмкость проводов относительно земли.

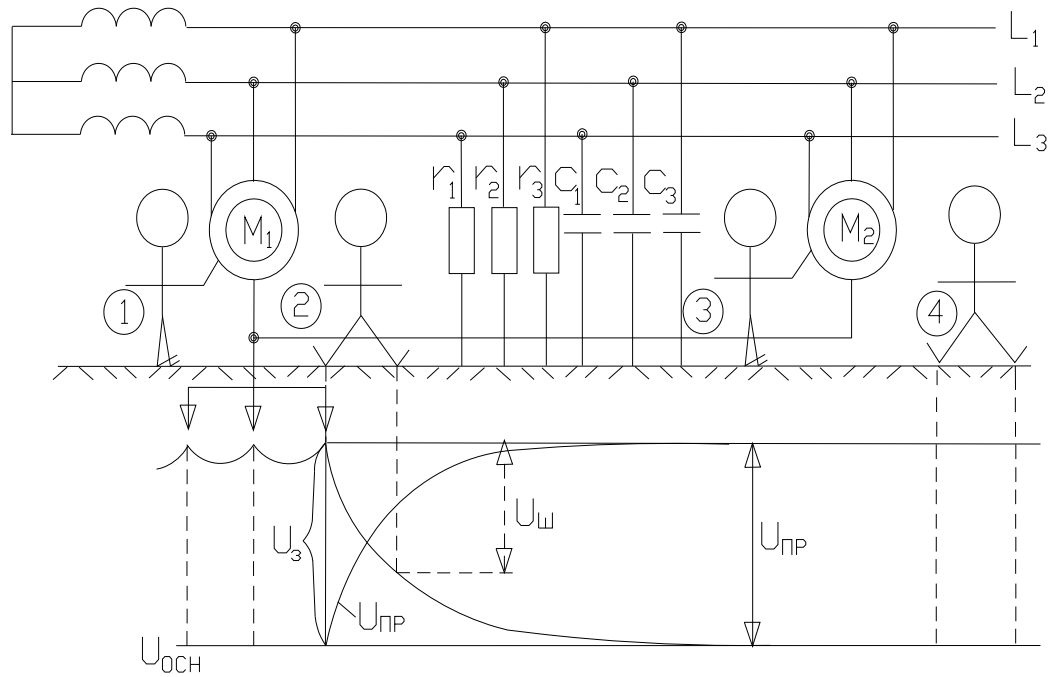


Рисунок 3 Факторы опасности поражения электрическим током трехфазной сети 0,38 кВ с изолированной нейтралью (IT)

Ток через человека, коснувшегося фазного провода, стоя на земле,

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r}{3}} \quad (10)$$

При нормальном режиме работы и очень больших сопротивлениях изоляции, например в кабельных сетях,

$$r_1 = r_2 = r_3 \approx \infty, \quad (11)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = C.$$

Ток, проходящий через тело человека при прикосновении к фазному проводу в этом случае,

$$I_h = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_h^2 + \left(\frac{X_c}{3}\right)^2}}, \quad (12)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C},$$

где X_c — ёмкостное сопротивление проводов относительно земли;

f — частота тока.

Таким образом, в сетях с изолированной нейтралью опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления изоляции и ёмкости проводов относительно земли: с увеличением сопротивления и уменьшением ёмкости опасность уменьшается.

Рассмотрим ситуации, связанные с опасностью поражения человека электрическим током в рассматриваемой сети (*ИТ*) в аварийных режимах.

Ситуация 1. Человек, стоящий непосредственно над групповым заземлителем, прикоснулся к корпусу асинхронного электродвигателя M_1 , оказавшемуся под напряжением и соединённому с указанным групповым заземлителем.

В этом случае потенциал земли над заземлителем в поле растекания тока будет практически равным потенциалу корпуса, а разность этих потенциалов, т.е. напряжение прикосновения $U_{пр}$ близка к нулю. Напряжение шага $U_{ш}$ также будет близко к нулю, т.к. ступни ног сомкнуты:

$$U_{пр} = \varphi_k - \varphi_3 \approx 0, \quad (13)$$

$$U_{ш} = \varphi_{3A} - \varphi_{3B} \approx 0,$$

где φ_k — потенциал корпуса электродвигателя;

$\varphi_з$ — потенциал земли (над заземлителем);

$\varphi_{зА}$ — потенциал земли в точке A (одна ступня ног);

$\varphi_{зВ}$ — потенциал земли в точке B (вторая ступня ног).

Таким образом, человек, стоя в непосредственной близости от корпуса электродвигателя над его заземлителем при пробое напряжения, попадает под неопасное напряжение прикосновения $U_{пр}$. Шаговое напряжение $U_{ш}$ будет зависеть от расстояния между ступнями ног и расстояния от заземлителя, т.к. потенциал земли по мере удаления от заземлителя уменьшается и соответственно разность этих потенциалов, т.е. напряжение шага уменьшается.

Ситуация 2. Человек, стоящий с определенным расстоянием между ступнями ног непосредственно над групповым заземлением, не касается корпуса электрического двигателя M_1 , оказавшегося под напряжением.

В этом случае человек попадает под шаговое напряжение $U_{ш}$, величина которого зависит от удельного электрического сопротивления грунта и расстояния между ступнями ног:

$$U_{ш} = \varphi_{зА} - \varphi_{зВ}, \quad (14)$$

$$U_{пр} = 0.$$

Ситуация 3. Человек прикоснулся к корпусу асинхронного электродвигателя M_2 , оказавшегося под напряжением, расположенного на расстоянии более 20 м от заземленного электродвигателя M_1 (рисунок 3).

В этом случае потенциал земли, где стоит человек вне поля растекания тока (более 20 м), равен нулю, и человек попадает под полное напряжение на корпусе электродвигателя M_2 . Шаговое напряжение будет равно нулю:

$$U_{пр} = \varphi_к - 0 = U_к, \quad (15)$$

$$U_{ш} = 0.$$

Ситуация 4. Человек, стоящий возле электродвигателя M_2 (рисунок 3), не прикасается к нему, ступни ног разомкнуты.

В этом случае шаговое напряжение $U_{ш}$ равно нулю, т.к. человек находится вне поля растекания тока:

$$\begin{aligned}U_{ш} &= 0, \\U_{пр} &= 0\end{aligned}\tag{16}$$

Таким образом, человек при прикосновении к электродвигателю (или иному электрооборудованию), установленному на токопроводящем основании, оказавшемуся под напряжением, должен находиться в поле растекания тока, т.е. вблизи от заземлителя. В данном случае, как показано на примере (рисунок 3), заземлять электродвигатель (M_2) на заземлитель другого электродвигателя (M_1) не рекомендуется.

4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ

Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и расчетов (таблица 2).

Подключите стенд к источнику питания напряжением 220 В. Смоделируйте для трехфазной четырехпроводной сети (рисунок 2) ситуацию 1, повернув переключатель № 1 на стенде в положение 1. Правильность переключения контролируйте загоранием лампочки на схеме стенда, соответствующей данной ситуации. Занесите в таблицу показания вольтметра и миллиамперметра.

Аналогичным образом путем поворота переключателя № 1 смоделируйте ситуации 2, 3, 4, 5; при этом загораются соответствующие лампочки на стенде. Данные измерений занесите в таблицу 2.

Произведите расчеты согласно формулам (1)–(8) и занесите в таблицу 2.

Получите для трехфазной сети с изолированной нейтралью (рисунок 3) ситуацию 1, повернув переключатель № 2 на стенде в положение 1. Правильность переключения контролируйте загоранием на стенде лампочки, соответствующей ситуации 1. Занесите в таблицу показания вольтметра и миллиамперметра.

Аналогичным образом путем поворота переключателя № 2 создайте последовательно ситуации 2, 3, 4; при этом загораются соответствующие лампочки на стенде. Данные измерений занесите в таблицу.

Произведите расчеты согласно формулам (9)–(16) и занесите в таблицу.

Проанализируйте полученные экспериментальные и расчетные результаты, сравните их и сделайте вывод об опасности поражения электрическим током в различных сетях при различных ситуациях.

Таблица 2

Результаты исследования электробезопасности в трехфазных сетях

Режим работы сети	Измеренные величины			Вычисленные значения	
Ситуации	$U_{ш}, В$	$U_{пр}, В$	$I_h, мА$	$I_h, мА$	$U_{ш}, В$
Четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью					
1					
2					
3					
4					
5					
Трехпроводная с изолированной нейтралью					
1					
2					
3					
4					

ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

1. Какое действие оказывает электрический ток на организм человека?
Что такое электрический удар?
2. Какие элементы включают системы электропитания $TN - C - S$, $TN - S$?
3. Что называется напряжением прикосновения и шаговым напряжением?
4. Какая ситуация наиболее опасна в сети $TN - C - S$ для человека и почему?
5. Какая ситуация наиболее опасна в сети IT для человека и почему?

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. — Москва: Энергоатомиздат, 1989.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — Москва: Энергоиздат, 1998.
3. ГОСТ 30331.3–95 (МЭК 364-4-41-92). Межгосударственный стандарт. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током.
4. Федорчук, А.И. Охрана труда при эксплуатации электроустановок / А.И. Федорчук, Л.П. Филянович, Е.А. Милаш. — Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2003.
5. Федорчук, А.И. Охрана труда конспект лекций / Федорчук А.И., Цвирко Л.Ю., Мисун Л.В. — Минск: БГАТУ, 2000.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ
НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Методические указания
к лабораторной работе по дисциплинам
«Охрана труда», «Производственная безопасность»

Составители:

Федорчук Александр Иванович

Андруш Виталий Григорьевич

Цвирко Леокадия Юльяновна

студентка 4 курса Гулая **А.В.**