

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

---

## **«ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ» КОМПЛЕКТ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Учебное пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 621.3: 658.382.(076.5)

ББК 31.29 ня 73

Э 455

- Э 455 «Электробезопасность». Комплект лабораторных работ: учебное пособие по практическому изучению средств защиты от электропоражения в сетях до 1 кВ для студентов всех специальностей: учебное пособие. А.Г. Дашковский, Ю.В. Бородин, А.А. Сечин, М.В. Гуляев, А.Г. Кагиров – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 97 с.

Рассмотрены терминология дисциплины, опасные факторы при работе с электроустановками, их воздействие на человека; методы и средства защиты от их воздействия на человека; организационные, правовые и социально-экономические знания в области электробезопасности. Предназначено для студентов ТПУ всех специальностей, изучающих дисциплину «Электробезопасность».

УДК 621.3: 658.382.(076.5)

ББК 31.29 ня 73

### *Рецензенты*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ХИТ-МСЭ

Северский государственный технологический институт,

*В.В. Гузеев*

кандидат физико-математических наук, начальник отдела государственной экспертизы условий труда Департамента по труду и занятости Томской области,

*М.В. Белов*

© Томский политехнический университет, 2009

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Электробезопасность» обусловлено существующей тенденцией электротравматизма, среди причин которого на одном из первых мест стоят ошибочные действия персонала, либо незнание правил безопасной эксплуатации электроустановок.

Дисциплина «Электробезопасность» предназначена для профессионального образования студентов направлений: 140600 – Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 – «Электроэнергетика».

Цель пособия не только оказать помощь в освоении студентами теоретического материала, но и сформировать навыки по чтению и сборке электрической схемы подключения различных видов электроустановок в процессе эксплуатации электрических сетей.

Учебное пособие содержит разделы:

- Электрический ток – опасный и вредный фактор
- Характеристика сетей с изолированной нейтралью
- Характеристика сетей с глухозаземленной нейтралью
- Лабораторные работы по дисциплине «Электробезопасность»:
  1. Определение влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности;
  2. Определение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока в землю через защитный заземлитель;
  3. Определение зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека;
  4. Натурное моделирование зануления электрооборудования;
  5. Контроль изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью;
  6. Измерение сопротивления заземления;
  7. Натурное моделирование защитного заземления/самозаземления электрооборудования;
  8. Натурное моделирование защитного отключения электрической сети.

В пособии изложены теоретические вопросы применения средств защиты от поражения электрическим током в электрических сетях до 1 кВ для различных режимов работы нейтрали электрической сети.

Учебное пособие в полной мере соответствует рабочей программе дисциплины «Электробезопасность» и может быть использовано для самостоятельной работы студентов и при решении индивидуальных заданий.

Авторы с благодарностью примут предложения и замечания, которые смогут улучшить и дополнить данное учебное пособие.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК – ОПАСНЫЙ И ВРЕДНЫЙ ФАКТОР

## 1.1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОТОКА НА ЧЕЛОВЕКА, ВИДЫ ЭЛЕКТРОТРАВМ

Факторами опасного и вредного воздействия на человека, связанными с использованием электрической энергии, являются:

- протекание электрического тока через организм человека;
- воздействие электрической дуги;
- воздействие биологически активного электрического поля;
- воздействие биологически активного магнитного поля;
- воздействие электростатического поля;
- воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ).

Биологически активными являются электрические и магнитные поля, напряженность которых превышает предельно допустимые уровни (ПДУ) – гигиенические нормативы условий труда.

Опасные и вредные последствия для человека от воздействия электрического тока, электрической дуги, электрического и магнитного полей, электростатического поля и ЭМИ проявляются в виде электротравм, механических повреждений и профессиональных заболеваний. Степень воздействия зависит от экспозиции фактора, в том числе от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути тока через тело человека, продолжительности воздействия электрического тока или электрического и магнитного полей на организм человека, условий внешней среды.

Экспозиция – продолжительность действия опасного или вредного фактора.

Электротравмы:

- локальные поражения тканей (металлизация кожи, электрические знаки и ожоги);
- органов (резкие сокращения мышц, фибриляция сердца, электроофтальмия, электролиз крови) являются результатом воздействия электрического тока или электрической дуги на человека (электрический удар).

По степени воздействия на организм человека различаются четыре стадии электрического удара:

I – слабые, судорожные сокращения мышц;

II – судорожные сокращения мышц, потеря сознания;

III – потеря сознания, нарушение сердечной и дыхательной деятельности;

IV – клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Механические повреждения, явившиеся следствием воздействия опасных факторов, связанных с использованием электрической энергии (падение с высоты, ушибы), также могут быть отнесены к электротравмам. Кроме того, электрический ток вызывает непроизвольное сокращение мышц (судороги), которое затрудняет освобождение человека от контакта с токоведущими частями.

Профессиональные заболевания проявляются, как правило, в нарушениях функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. У людей, работающих в зоне воздействия электрического и магнитного полей, электростатического поля, электромагнитных полей радиочастот, появляются раздражительность, головная боль, нарушение сна, снижение аппетита, нарушение репродуктивной функции и др. Следствием воздействия вредных факторов могут явиться болезни глаз или лейкемия (белокровие).

Переменный ток промышленной частоты человек начинает ощущать при 0,6–15 мА. Ток 12–15 мА вызывает сильные боли в пальцах и кистях. Человек выдерживает такое состояние 5–10 с и может самостоятельно оторвать руки от электродов. Ток 20–25 мА вызывает очень сильную боль, руки парализуются, затрудняется дыхание; человек не может самостоятельно освободиться от электродов. При токе 50–80 мА наступает паралич дыхания, а при 90–100 мА наступает паралич сердца и смерть.

Менее чувствительно человеческое тело к постоянному току. Его воздействие ощущается при 12–15 мА. Ток 20–25 мА вызывает незначительное сокращение мышц рук. Только при токе 90–110 мА наступает паралич дыхания.

Самый опасный – переменный ток частотой 50–60 Гц. С увеличением частоты токи начинают распространяться по поверхности кожи, вызывая сильные ожоги, но не приводя к электрическому удару.

Величина тока, проходящего через тело человека, зависит от сопротивления тела и приложенного напряжения. Наибольшее сопротивление току оказывает верхний роговой слой кожи, лишенный нервов и кровеносных сосудов. При сухой неповрежденной коже сопротивление человеческого тела электрическому току равно 40–100 кОм. Роговой слой имеет незначительную толщину (0,05–0,2 мм) и при напряжении 250 В мгновенно пробивается. Повреждение рогового слоя уменьшает сопротивление человеческого тела до 0,8–1 кОм. Сопротивление уменьшается также с увеличением времени воздействия тока. Поэтому

очень важно быстро устранить соприкосновение пострадавшего с токоведущими частями.

Исход поражения во многом зависит также от пути тока в теле человека. Наиболее опасны пути руки–ноги и рука–рука, когда наибольшая часть тока проходит через сердце.

На величину сопротивления, а, следовательно, и на исход поражения электрическим током большое влияние оказывает физическое и психическое состояние человека. Повышенная потливость кожного покрова, переутомление, нервное возбуждение, опьянение приводят к резкому уменьшению сопротивления тела человека (до 0,8–1 кОм). Поэтому даже сравнительно небольшие напряжения могут привести к поражению электрическим током.

Нужно обязательно помнить, что человеческий организм поражает не напряжение, а величина тока. При неблагоприятных условиях даже низкие напряжения (30–40 В) могут быть опасными для жизни. Если сопротивление тела человека равно 700 Ом, то опасным будет напряжение 35 В.

## **1.2. ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Освободить пострадавшего от воздействия электрического тока. Отключить электроэнергию, если нет возможности быстрого отключения электроэнергии, следует перерубить линию топором, либо другим инструментом с изолированными ручками. При отсутствии возможности отключить электроэнергию следует освободить пострадавшего от воздействия электрическим током. При этом следует иметь в виду, что прикасаться к человеку, находящегося под током, без применения мер предосторожности, опасно для жизни оказывающего помощь. Необходимо быстро отключить ту часть установки, которая касается пострадавшего. При этом необходимо учесть следующее:

- В случае нахождения пострадавшего на высоте, должны быть приняты меры, исключающие опасность падения пострадавшего.
- При отключении установки следует обеспечить освещение от другого источника (фонарь, аварийное освещение) не задерживая, однако, отключение установки и оказания помощи пострадавшему.
- Следует иметь в виду, что после отключения линии в ней может сохраняться электрический заряд.
- Для откидывания провода следует воспользоваться специальным приспособлением или другими подручными средствами (канатом,

палкой или каким либо другим сухим предметом), использовать для этой цели металлические или мокрые предметы не допускается.

- Для удаления пострадавшего от токоведущих частей можно также взяться за его одежду, если она сухая и отстает от тела.
- Для изоляции рук оказывающий помощь должен надеть диэлектрические перчатки или обмотать себе руки материей, можно также изолировать себя, став на сухую доску или какую-нибудь другую, не проводящую электрический ток подстилку, сверток одежды и т. д.
- При отделении пострадавшего от токоведущих частей рекомендуется действовать по возможности одной рукой.
- Для отделения пострадавшего от токоведущих частей, находящихся под высоким напряжением (1 кВ) следует надеть диэлектрические перчатки и боты и действовать штангой или клещами, рассчитанными на напряжение данной установки.

После освобождения пострадавшего, если он находится в сознании, следует уложить в удобное положение и накрыть одеждой до прибытия врачей, обеспечивать покой, наблюдать за дыханием и пульсом.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с устойчивым дыханием и пульсом, его следует ровно и удобно положить, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха, дать нюхать нашатырный спирт, обеспечить полный покой.

Если у пострадавшего отсутствует дыхание и пульс или дышит очень редко и судорожно, то ему следует делать искусственное дыхание и массаж сердца. Самым эффективным является способ искусственного дыхания «рот в рот», проводимый одновременно с непрямой массажем сердца. Начинать искусственное дыхание следует немедленно после освобождения пострадавшего от электрического тока, и производить непрерывно до прибытия врача.

Поражение молнией является разновидностью поражения электрическим током и первая помощь пострадавшему от молнии должна быть такой же, как при поражении электрическим током.

Местные повреждения обработать спиртом, раствором марганцовки, наложить стерильную повязку. Дать пострадавшему таблетку анальгина или амидопирина, настой валерианы, капли Зеленина. В тяжелых случаях провести искусственное дыхание методом «рот в рот», непрямой массаж сердца. Первая помощь при остановке сердца должна быть начата в течение 3 минут после несчастного случая.

Вызвать «скорую помощь», так как состояние пострадавшего может резко ухудшиться в ближайшие часы после травмы. При поражении молнией, если человек лишь оглушен, нужно дать ему доступ воздуха,

опрыскать или облить холодной водой, растереть конечности, грудь и спину спиртом, водой или уксусом, к носу поднести ватку с нашатырным спиртом или хрен, положить горчичники на икры ног.

Каждый должен быть знаком с основными признаками наличия жизни, к которым относятся:

– сердцебиение, определяемое плотным прикладыванием уха или ладони к грудной клетке в ее левой половине на уровне левого соска;

– пульсация артерий в левой или правой половине шеи» в области лучезапястного сустава; в середине паховой области по переднебрюшной поверхности, где располагается бедренная артерия (рис.1);

– дыхание, определяемое глазом или прикладыванием ладоней к груди и животу по движению грудной клетки или передней брюшной стенки, а также по у помутнению зеркала или какого-нибудь гладкого блестящего предмета и минимальному движению разволокненного кусочка ваты, поднесенного к носовым отверстиям и рту;

– реакция зрачков на свет, влажность и блеск роговиц, подтверждающие наличие жизни. Реакцию зрачков на свет проверяют, заслонив глаза от дневного света и резко отдернув ладони от глаз. При этом можно заметить сужение зрачка, что расценивается как положительная реакция.

Однако необходимо знать, что отсутствие вышеперечисленных признаков может быть при резко сниженных жизненных процессах в организме при так называемой клинической смерти, поэтому совершенно необходимо незамедлительно приступить к оказанию до врачебной помощи и продолжать ее в течение 2 ч и более, до появления явных признаков смерти.

Прекращать оказывать помощь следует только при появлении явных признаков смерти», к которым относятся:

- высыхание и помутнение роговицы глаз;
- возникновение деформации зрачка при сдавливании глазного яблока между пальцами;
- осязаемое снижение температуры (холодное) тела, легко осязаемое ладонями, и появление сине-фиолетовых (трупных) пятен на коже.

При положении на спине трупные пятна возникают в области ягодиц, лопаток, поясницы; на животе – в области лица, шеи, груди, передней брюшной стенки; на боку – в области крыльев таза, т. е. в местах соприкосновения с полом, землей и т. д.

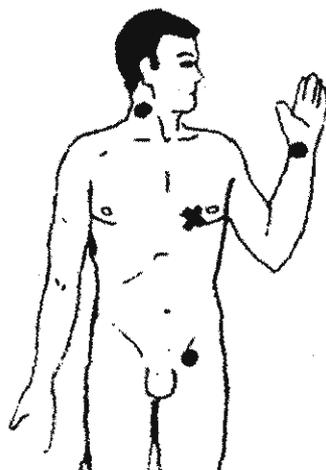


Рис. 1 – Места определения пульса на артериях шеи, руки и ноги

Самым достоверным признаком смерти, когда нет сомнения в бессмысленности дальнейшего оказания помощи, является развитие трупного окоченения, которое чаще всего возникает через 2–4 ч после смерти.

Приступая к оказанию первой помощи, нередко приходится снимать с пострадавшего одежду. Поэтому для того чтобы не причинить дополнительной боли, оказывающий помощь должен знать основные принципы и порядок снятия одежды и обуви. Прежде всего снимать их надо с неповрежденной части тела – это общее положение. Так, например, при повреждении руки или ноги начинать следует со здоровой конечности. Только после этого, осторожно потягивая за рукав или брючину и придерживая поврежденную конечность, освобождают ее от одежды. В том случае, если тяжело больной или пострадавший лежит на спине и посадить его невозможно, одежду начинают снимать с верхней половины туловища. При сильном кровотечении, ожогах, а также загорании одежды ее лучше разрезать. Обгоревшую и прилипшую к коже ткань не надо «отдирать» от кожи – ее либо оставляют на месте, либо обстригают ножницами вокруг обожженной кожи. В холодное время года одежду и обувь также следует разрезать или разорвать по швам.

Внезапная остановка сердца может произойти на улице дома, на производстве и т. д. В любом случае человек, оказывающий помощь до прихода врача, имеет в своем распоряжении для оценки состояния и восстановления кровообращения мозга не более 5 мин, поэтому нельзя терять время на поиск медицинского работника – необходимо немедленно приступите к проведению искусственного дыхания и наружному (непрямому) массажу сердца.

Искусственное дыхание. Искусственное дыхание имеет большое значение для пострадавшего, так как способствует насыщению крови

кислородом (из-за отсутствия самостоятельного дыхания). Прежде всего следует убедиться в проходимости воздухопроводящих путей больного и устранить механические причины, препятствующие дыханию. С этой целью осматривают полость рта и носа, которые при помощи пальца, носового платка или марлевого тампона должны быть быстро очищены, от слюны, слизи, рвотных масс, земли, ила, песка и других инородных тел. Необходимо устранить часто наблюдающееся западание языка, если искусственное дыхание будет производиться при положении больного на спине. Если же при этом больной лежит ничком, т. е. на животе, то нужно следить, чтобы его рот и нос не упирались в землю или подложенный под голову предмет. Кроме того, надо расстегнуть одежду больного, затрудняющую дыхание и кровообращение, а при оказании помощи утонувшему – освободить дыхательные пути и желудок от воды. Все эти подготовительные меры к искусственному дыханию должны проводиться с максимальной быстротой и занимать не более одной минуты.

Частота искусственного дыхания должна приближаться к физиологической, т. е. составлять 16–20 полных дыхательных циклов в минуту. Однако она должна меняться в зависимости от степени дыхательной недостаточности; стадии терминального состояния и способа искусственного дыхания. Длительность искусственного дыхания различна и зависит от характера причины, вызвавшей нарушение нормальной дыхательной деятельности, и ее тяжести. Однако во всех случаях следует руководствоваться общими правилами: искусственное дыхание необходимо продолжать до тех пор, пока не восстановится самостоятельное и нормальное по глубине, частоте и ритму дыхание или же не появятся явные признаки окончательной остановки сердечной деятельности, несмотря на применение мер для ее восстановления (массаж сердца и др.). Наиболее простым и эффективным способом искусственного дыхания является способ «рот в рот» и «рот в нос», который заключается в следующем. Больного кладут на спину с резко запрокинутой назад головой, для чего подкладывают под плечи валик или удерживают голову руками оказывающего помощь, который стоит на коленях сбоку от больного (рис. 2).



Рис. 2 – Искусственное дыхание «рот в рот»

При этом положении просвет глотки и воздухоносных путей значительно расширяются и обеспечивается их полная проходимость, что является основным условием успешного проведения такого способа. Всякое смещение головы способно нарушить проходимость дыхательных путей, и часть воздуха может попасть в желудок. Поэтому необходимо тщательно удерживать голову больного в запрокинутом к спине положении. Оказывающий помощь делает глубокий вдох, широко раскрывает рот, быстро приближает его ко рту больного и, плотно прижав свои губы вокруг рта больного, делает глубокий выдох в рот последнего, т. е. как бы вдувает воздух в его легкие и раздувает их. При этом становится заметным расширение грудной клетки больного (вдох). После этого оказывающий помощь откидывается назад и вновь делает глубокий вдох. В это время грудная клетка больного спадается – происходит пассивный выдох. Затем оказывающий помощь вновь выдыхает воздух в рот больного и т. д. При попадании воздуха в желудок (что легко заметить по раздуванию надчревной области) одной ладонью, положенной на темя, удерживают голову больного в запрокинутом положении, а другой – осторожно, но непрерывно надавливают на область расположения желудка.



Рис. 3 – Искусственное дыхание «рот в нос»

При вдувании воздуха его выход через нос не происходит, так как мягкое небо прижимается к задней стенке глотки. Если же выход воздуха через нос наблюдается, то при каждом вдувании воздуха в рот больного оказывающий помощь своей щекой должен закрывать или прижимать носовые отверстия больного. Аналогичными приемами можно выдыхать или вдувать воздух в нос (рис. 3). Для этого нос больного плотно охватывается губами оказывающего помощь. Во избежание выхода воздуха через рот следует приподнять подбородок больного и тем самым закрыть ему рот.

По гигиеническим соображениям лицо больного перед вдуванием воздуха через рот или нос можно покрыть чистым платком, куском марли или другой легкой материи. Можно производить вдувание воздуха в легкие больного, используя обычную резиновую трубку.

Наружный (непрямой) массаж сердца вместе с искусственным дыханием относятся к числу важнейших мероприятий, направленных на спасение жизни пострадавшего.

Наружный массаж сердца заключается в сильном и ритмичном сдавливании грудной клетки в направлении от грудины к позвоночнику, что вызывает сжатие и расправление сердца. В результате многократного сдавливания искусственно поддерживается кровообращение в организме.



Рис. 4 – Непрямой массаж сердца: а – положение сердца при поднятии рук; б – положение сердца при нажатии руками на область грудной клетки

Массаж сердца следует выполнять до восстановления самостоятельной сердечной деятельности, признаками которой являются появление пульсации на сонных или лучевых артериях, уменьшение синюшной или бледной окраски кожи, сужение зрачков и повышение артериального давления.

Наружный массаж сердца надо выполнять следующим образом: больного (или пострадавшего) укладывают на спину на плотное основание (пол, земля и др.); оказывающий помощь становится сбоку от него и ладонными поверхностями рук, наложенными одна на другую, ритмич-

но и сильно надавливает (50–60 раз в 1 мин) на область нижней поверхности груди, сдавливая грудную клетку по направлению к позвоночнику, используя собственную массу тела. Эту манипуляцию нужно выполнять прямыми руками (рис. 4).

Наружный массаж сердца у грудных детей надо проводить кончиками пальцев с частотой 100–120 раз в 1 мин в области нижнего края грудины, а у детей от 1 года до 12 лет так же, как у взрослых, но только одной рукой (рис. 5). Если реанимацию выполняет 1 человек, то рекомендуется после каждых 10–12 сдавливания груди делать 2 вдувания в легкие пострадавшего; если же 2 человека, то одно вдувание следует чередовать с 5–6 сдавливаниями грудной клетки. Искусственный массаж сердца требует большой выносливости и физического напряжения, так как иногда эту процедуру приходится выполнять больше 1,5–2 ч. Необходимо знать, что грубое выполнение может привести к перелому ребер с повреждением легких, сердца и др.

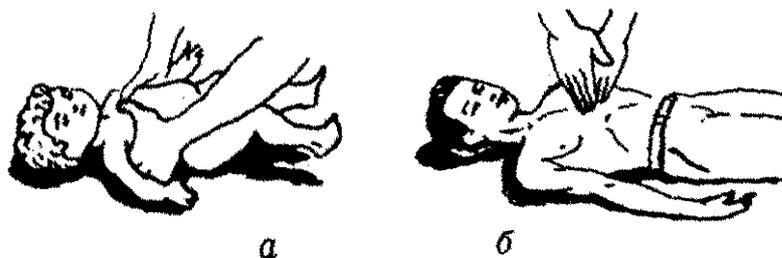


Рис. 5 – Непрямой массаж сердца: а – у ребенка; б – у подростка

Особую осторожность надо проявлять при оказании этого вида помощи детям и пожилым.

Эффективность проводимого непрямого массажа подтверждается появлением пульса на сонной или бедренной артерии. Через 1–2 мин кожа и слизистые оболочки губ пострадавшего принимают розовый оттенок, зрачки сужаются.

Сочетание непрямого массажа сердца с искусственным дыханием. Непрямой массаж сердца проводят одновременно с искусственным дыханием, так как не прямой массаж сердца сам по себе не вентилирует легкие. Если реанимацию проводят два человека, легкие раздувают в соотношении 1:5, т. е. на каждое раздувание легких производят 5 компрессий (сжатий) грудины (рис. 6)

Если помощь оказывает один человек, то легкие раздувают в соотношении 2:10, т. е. через каждые 2 быстрых вдувания воздуха в легкие пострадавшего выполняют 10 компрессий грудины с интервалом в 1 с.



Рис. 6 – Одновременное проведение искусственного дыхания и наружного массажа сердца

*Внимание! Искусственное дыхание и непрямой массаж сердца являются реанимационными мероприятиями. Их следует начинать немедленно и проводить до восстановления самостоятельного устойчивого пульса и дыхания, до прибытия врача или доставки пострадавшего в лечебное учреждение. При появлении явных признаков биологической смерти оказание помощи прекращают. Помните, что от быстроты и правильности ваших действий зависит жизнь человека!*

Следует подчеркнуть, что при внезапных заболеваниях и повреждениях особое значение приобретает общий и местный покой. Поэтому при оказании первой помощи необходимо больного (если это вызвано его общим состоянием) уложить в постель или на носилки. При наличии острых болей в животе запрещается прием пищи и питья, применение слабительных и клизм. Чтобы уменьшить боли, можно положить на живот больного пузырь со льдом, снегом или холодной водой, но не грелку. Для создания местного покоя (например, при повреждениях конечностей) прибегают к их иммобилизации (придание неподвижности, покоя) при помощи соответствующих шин и т.п. Иммобилизация конечностей при переломах имеет особое значение, если требуется транспортировка пострадавшего в лечебное заведение.

Также следует помнить, что эффективное оказание первой до врачебной помощи возможно лишь при наличии определенных знаний и навыков. Причем важно знать не только то, что нужно делать при данном внезапном заболевании или повреждении, но и то, чего нельзя делать в этих случаях. Например, до прихода врача не следует применять какие-либо наркотические, болеутоляющие средства или антибиотики, которые меняют картину заболевания и тем самым затрудняют его своевременное распознавание и лечение. Перевозка (транспортировка) больных и пострадавших в ближайшее лечебное заведение, где им будет оказана квалифицированная врачебная помощь, производится либо специализированным транспортом (санитарные автомашины «скорой по-

мощи», санитарные самолеты и др.), либо на любом случайном транспорте, в зависимости от местных условий. Однако всегда переноска и транспортировка больных должны производиться с соблюдением специальных правил.

## **2. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

### **2.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

Режим работы электрической сети, изолированной от земли (режим изолированной нейтрали, IT-системы), широко применяется в электроустановках, требующих повышенной надежности энергоснабжения, и особо опасных по условиям электропоражения.

К таким электроустановкам относятся системы энергоснабжения:

- медицинских учреждений, больниц, судов;
- железнодорожных предприятий;
- предприятий горной, нефтедобывающей, сталеплавильной, химической промышленности;
- испытательного, лабораторного, взрывоопасного производства и др.

В электрических сетях и электроустановках, изолированных от земли, условия электробезопасности и надежности энергоснабжения в значительной мере определяются состоянием изоляции, ее сопротивлением и емкостью относительно земли.

Для обеспечения требуемого уровня сопротивления изоляции в электрической сети или конкретной электроустановке правила предписывают ведение непрерывного автоматического контроля (мониторинга) сопротивления изоляции, осуществляемого устройствами контроля изоляции.

В IT-сетях условия электробезопасности обеспечиваются высоким сопротивлением изоляции относительно земли, однако при необходимости обеспечения высокой степени безопасности вполне оправдано применение УЗО.

Функции устройства контроля изоляции заключаются в измерении сопротивления изоляции сетей под рабочим напряжением и при включенных токоприемниках, оценке результатов измерения путем сравнения с уставкой, задаваемой, как правило, по условиям электробезопасности, и, в случае необходимости, включении сигнализации или воздействии на отключающий аппарат.

Таким образом, устройство контроля изоляции осуществляет «защиту человека изоляцией цепей электроустановки» путем ведения непрерывного измерения сопротивления изоляции с целью поддержания его значения на уровне, обеспечивающем условия электробезопасности.

Вышеизложенное означает, что контроль изоляции является, необходимым, но не достаточным условием обеспечения условий электробезопасности.

Достаточными условиями могут быть: поддержание сопротивления изоляции на уровне выше критического, защитное отключение и т. п.

## **2.2. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

По назначению устройства контроля изоляции можно разделить на группы:

А – устройства автоматического (непрерывного) контроля сопротивления изоляции сети или установки относительно земли;

Б – инспекторские приборы для периодических контрольных измерений сопротивления изоляции в рабочем режиме сети;

В – устройства селективного обнаружения в разветвленных электрических сетях присоединения (фидера) с пониженным сопротивлением изоляции.

В настоящее время в России и за рубежом выпускаются устройства контроля изоляции, отличающиеся друг от друга принципом действия, конструктивными решениями, областью применения, надежностью работы.

Главными элементами таких устройств являются разделительный трансформатор с устройствами контроля перегрузки, температуры и сопротивления изоляции самого трансформатора, система автоматического включения резерва – АВР, система контроля изоляции электроустановки ответственного потребителя. При этом к разделительному трансформатору предъявляются высокие технические требования по сопротивлению изоляции между первичной и вторичной обмотками, по нагреву, по значению пускового тока, по исполнению и т. д.

Применение устройств контроля изоляции регламентируется ПУЭ (изд.6) п.1.6.12: «В сетях переменного тока выше 1 кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, в сетях переменного тока до 1 кВ с изолированной нейтралью и в сетях постоянного тока с изолированными полюсами или с изолированной средней точкой, как правило, должен выполняться автоматический контроль изоляции, действующий на сигнал при снижении сопротивления изоляции одной из фаз (или полюса) ниже заданного значения, с последующим контролем асимметрии напряжения при помощи показывающего прибора (с переключением)».

В ПУЭ 7-го издания в п. 1.7.166. предписывается обязательное применение контроля изоляции в передвижных электроустановках:

«Автономные передвижные источники питания с изолированной нейтралью должны иметь устройство непрерывного контроля сопротивления изоляции относительно корпуса (земли) со световым и звуковым сигналами. Должна быть обеспечена возможность проверки исправности устройства контроля изоляции и его отключения».

Выбор уставки устройств автоматического контроля сопротивления изоляции осуществляют по условиям электробезопасности или по устойчивому среднему уровню сопротивления изоляции сети относительно земли.

Одним из наиболее трудоемких и сложных мероприятий в практике эксплуатации сетей, изолированных от земли, переменного и постоянного тока (ИТ) является выявление фидера (присоединения), в котором произошло замыкание на землю или унизилось до недопустимого уровня сопротивление изоляции.

Существует класс приборов – **RCM** – residual current monitor – устройство контроля дифференциального тока по классификации МЭК.

Эти приборы обеспечивают селективный контроль изоляции. По исполнению они могут быть стационарными, с центральным блоком управления и опроса токовых датчиков, установленных на присоединениях, и переносными, в виде токоискательных клещей, позволяющими оператору проследить всю трассу возникшей утечки тока на землю.

Селективным (избирательным) принято называть действие защитного устройства, обеспечивающее отключение только поврежденного участка сети или элемента электрооборудования посредством ближайших к нему выключателей. Алгоритм селективного отключения присоединений должен быть составлен с учетом конфигурации сетей, их разветвленности, категории электроснабжения и т.д.

Также следует отметить, что в последнее время стала очевидной тенденция широкого применения сетей типа ИТ в комплексе с устройством контроля изоляции и в электроустановках бытового назначения – с целью достижения максимально возможной надежности и безопасности электроснабжения.

### **2.3. ЗАЗЕМЛЕНИЕ КАК СРЕДСТВО ЗАЩИТЫ**

*Назначение, принцип действия, область применения.* Защитное заземление – 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 соседних токоведущих частей, вынос потенциала, разряд молнии и т. п.). Эквивалентом земли может быть вода реки или моря, каменный уголь в карьерном залегании и т. п.

Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Защитное заземление следует отличать от других видов заземления, например, рабочего заземления и заземления молниезащиты.

Рабочее заземление – преднамеренное соединение с землей отдельных точек электрической цепи, например нейтральных точек обмоток генераторов, силовых и измерительных трансформаторов, дугогасящих аппаратов, реакторов поперечной компенсации в дальних линиях электропередачи, а также фазы при использовании земли в качестве фазного или обратного провода. Рабочее заземление предназначено для обеспечения надлежащей работы электроустановки в нормальных или аварийных условиях и осуществляется непосредственно (т. е. путем соединения проводником заземляемых частей с заземлителем) или через специальные аппараты – пробивные предохранители, разрядники, резисторы и т. п.

Заземление молниезащиты – преднамеренное соединение с землей молниеприемников и разрядников в целях отвода от них токов молнии в землю.

Принцип действия защитного заземления – снижение до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования).

Рассмотрим два случая. Корпус электроустановки не заземлен. В этом случае прикосновение к корпусу электроустановки также опасно, как и прикосновение к фазному проводу сети.

Корпус электроустановки заземлен. В этом случае напряжение корпуса электроустановки относительно земли уменьшится и станет равным:

$$U_3 = I_3 R_3 \quad (1)$$

Напряжение прикосновения и ток через тело человека в этом случае будут определяться по формулам:

$$U_h = I_3 K_3 \alpha_1, \quad I_h = \frac{R_3}{R_h} \cdot \alpha_1, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент напряжения прикосновения.

Уменьшая значение сопротивления заземлителя растеканию тока  $R_3$ , можно уменьшить напряжение корпуса электроустановки относительно земли, в результате чего уменьшаются напряжение прикосновения и ток через тело человека.

Заземление будет эффективным лишь в том случае, если ток замыкания на землю  $I_3$  практически не увеличивается с уменьшением сопротивления заземлителя. Такое условие выполняется в сетях с изолированной нейтралью (типа IT) напряжением до 1 кВ, так как в них ток замыкания на землю в основном определяется сопротивлением изоляции проводов относительно земли, которое значительно больше сопротивления заземлителя.

В сетях переменного тока с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ защитное заземление в качестве основной защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении не применяется, т.к. оно не эффективно.

В соответствии с главой 1.7 ПУЭ (седьмого издания) питание электроустановок напряжением до 1 кВ переменного тока от источника с глухозаземленной нейтралью и заземлением открытых проводящих частей при помощи заземлителя, не присоединенного к нейтрали (система TT), допускается только в тех случаях, когда условия электробезопасности в системе TN не могут быть обеспечены.

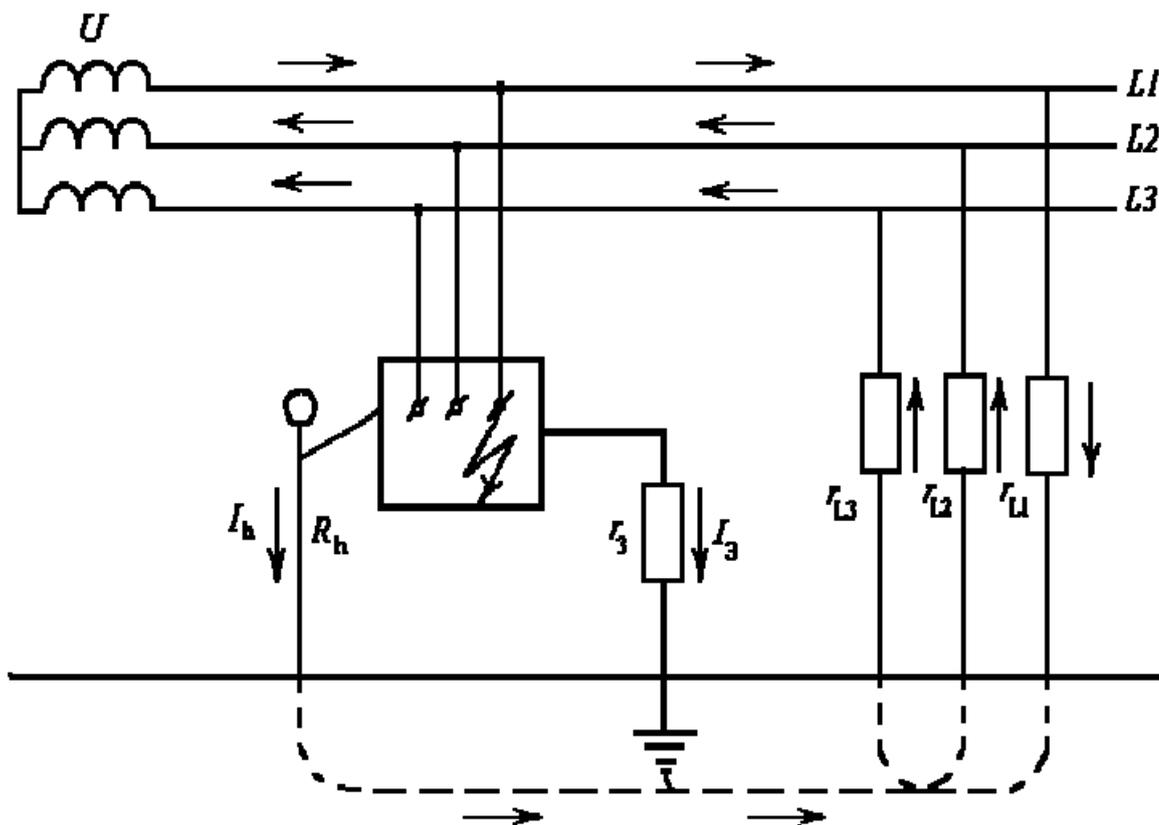


Рис. 7 – Схема сети с изолированной нейтралью (типа IT) и защитным заземлением электроустановки

Для защиты при косвенном прикосновении в таких электроустановках должно быть выполнено автоматическое питание с обязательным применением УЗО дифференциального типа. При этом должно быть соблюдено условие:

$$I_A R_A < 50B, \quad (3)$$

где  $I_a$  – ток срабатывания защитного устройства.

$R_a$  – суммарное сопротивление заземлителя и заземляющего проводника, при применении УЗО для защиты нескольких электроприемников – заземляющего проводника наиболее удаленного электроприемника.

## 2.4. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОПОРАЖЕНИЯ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Для трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью типа IT, напряжением до 1 кВ (рис. 8)

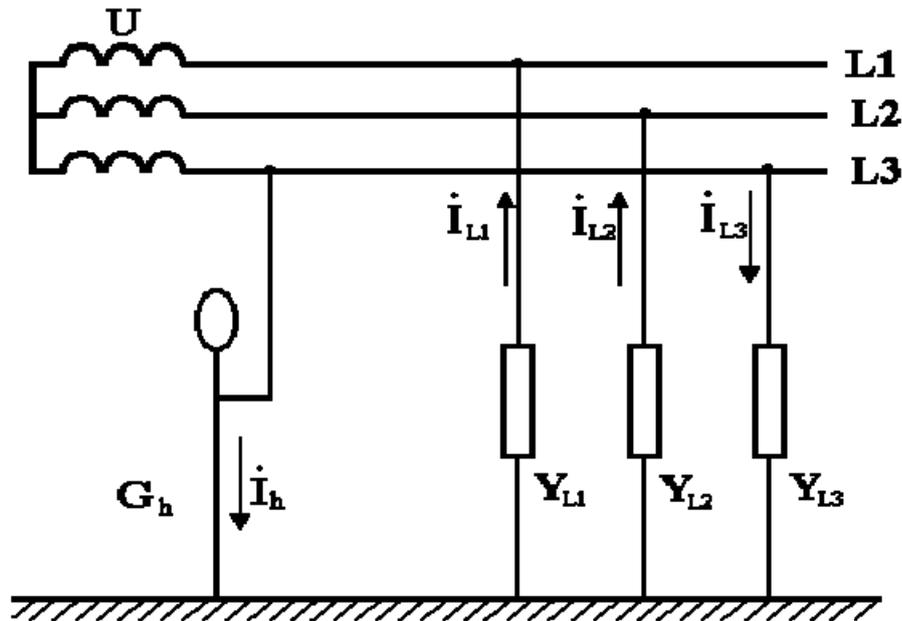


Рис. 8 – Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа IT при нормальном режиме работы

При однофазном прикосновении значение тока, проходящего через тело человека при нормальном режиме работы сети, тем меньше, чем меньше рабочее напряжение сети (фазное напряжение) и чем больше значение сопротивления изоляции проводов относительно земли. Действительно, ток через тело человека и напряжение прикосновения описываются следующими выражениями [3], при условии, что  $Y_0 = 0$ ;  $Y_{PEN} = 0$ :

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{Y_{L_2}(1-\alpha^2) + Y_{L_3}(1-\alpha)}{Y_{L_1} + Y_{L_2} + Y_{L_3} + G_h}, \quad \dot{U}_h = U \frac{Y_{L_2}(1-\alpha^2) + Y_{L_3}(1-\alpha)}{Y_{L_1} + Y_{L_2} + Y_{L_3} + G_h}, \quad (4)$$

где  $Y_{L1}$ ,  $Y_{L2}$ ,  $Y_{L3}$  – полные проводимости изоляции фазных проводов относительно земли в комплексной форме,  $U$  – действующее значение фазного напряжения сети,  $G_h$  – проводимость тела человека,  $\alpha$  – фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз.

При равенстве проводимостей фазных проводов относительно земли (т. е. при равенстве сопротивлений изоляции и емкостей фазных проводов относительно земли), ток через тело человека и напряжение прикосновения определяется по формуле:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{3Y}{3Y + G_h}; \quad (5)$$

или

$$I_h = \frac{U}{R_h + Z/3}, \quad (6)$$

где  $Z$  – полное сопротивление фазного провода относительно земли в комплексной форме,  $R$  – активное сопротивление изоляции фазного провода относительно земли;  $C$  – емкость фазного провода относительно земли.

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C}, \quad (7)$$

В действительной форме этот ток равен

$$I_h = \frac{U}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R(R+6R_h)}{9R_h^2(1+R^2\omega^2C^2)}}} \quad (8)$$

При равенстве сопротивлений изоляции фазных проводов относительно земли  $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$  и отсутствии емкостей, т. е.  $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = 0$ , выражение (2.7) упрощается:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3}. \quad (9)$$

Таким образом, в сетях с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы опасность для человека при прямом однофазном прикосновении зависит от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли. С увеличением сопротивления изоляции и уменьшении емкости фазных проводов относительно земли ток уменьшается, что иллюстрируется графиками зависимости  $I_h = f(R)$  при  $C = 0$  (короткие сети) и  $I_h = f(C)$  при  $R = \text{const}$ , представленными на рис. 9.

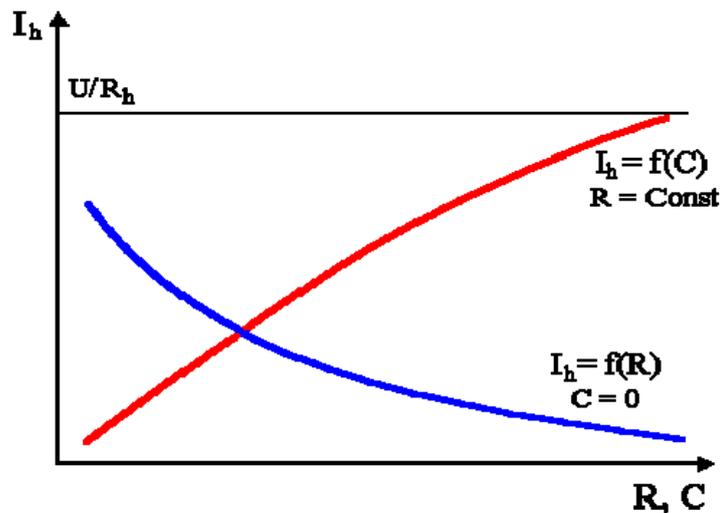


Рис. 9 – Зависимость значения тока,  $I_h$  при касании фазного провода в нормальном режиме работы

При аварийном режиме работы сети (рис. 10), когда один из фазных проводов, например, провод  $L_2$ , замкнулся на землю, опасность поражения током человека, прикоснувшегося к исправному фазному проводу, значительно возрастает.

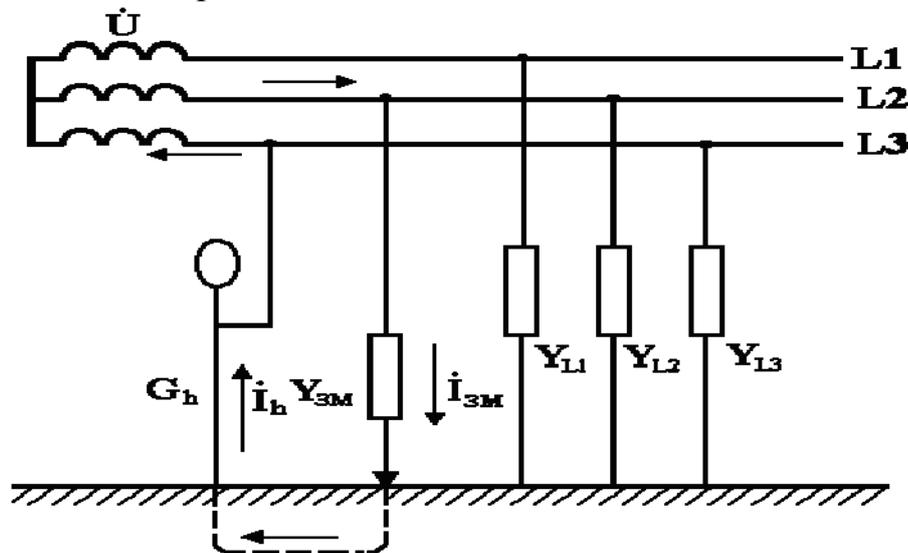


Рис. 10 – Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

В этом случае ток через тело человека будет равен:

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h + R_{3M}}, \quad (10)$$

где  $R_{3M}$  – сопротивление растеканию тока в месте замыкания фазного провода на землю (на рис. 11 – фазного провода  $L_2$ ).

Так как обычно выполняется условие  $R_{3M} \ll R_h$ , то:

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h}; \quad U_h = U\sqrt{3} \quad (11)$$

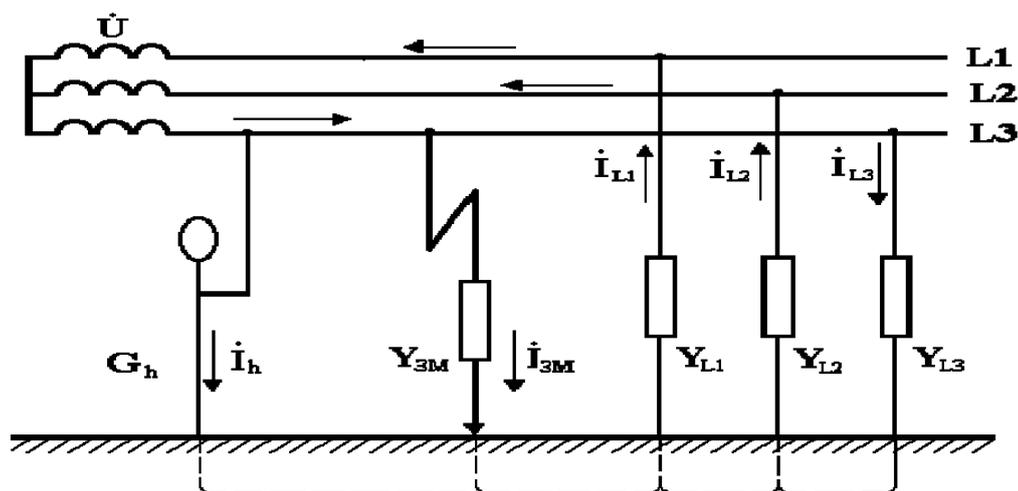


Рис. 11 – Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа IT, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю ток через тело человека будет определяться падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю  $R_{3M}$ :

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h} \alpha_1 \alpha_2, \quad (12)$$

где  $I_{3M}$  – ток замыкания на землю;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты напряжения прикосновения. При  $\alpha_1, \alpha_2 = 1$ .

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h}. \quad (13)$$

Ток замыкания на землю в сети IT зависит от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли, сопротивления растеканию  $R_{3M}, R_h$ . Если принять во внимание, что обычно  $R_{3M} \ll R_h$ , то

$$I_{\text{ЗМ}} = \frac{U}{(R_{\text{ЗМ}} + Z/3)}. \quad (14)$$

В действительности ток замыкания на землю будет меньше, что более безопасно для человека. Таким образом, прикосновение к неисправному фазному проводу (замкнувшемуся на землю) в сети **IT** значительно менее опасно, чем к исправному. Значение тока, протекающего через тело человека, в этом случае меньше, чем при прямом однофазном прикосновении в нормальном режиме работы.

## 3. СЕТИ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

### 3.1 ЗАЩИТНОЕ ЗАНУЛЕНИЕ

Зануление – это преднамеренное электрическое соединение открытых проводящих частей электроустановок с глухозаземленной нейтральной точкой генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной точкой источника в сетях постоянного тока, выполняемое в целях электробезопасности.

Для соединения открытых проводящих частей потребителя электроэнергии с глухозаземленной нейтральной точкой источника используется нулевой защитный проводник.

Нулевым защитным проводником (РЕ – проводник в системе TN – S) называется проводник, соединяющий зануляемые части (открытые проводящие части) с глухозаземленной нейтральной точкой источника питания трехфазного тока или с заземленным выводом источника питания однофазного тока, или с заземленной средней точкой источника питания в сетях постоянного тока.

Нулевой защитный проводник следует отличать от нулевого рабочего и PEN – проводников.

Нулевой рабочий проводник (N – проводник в системе TN – S) – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, предназначенный для питания электроприемников соединенный с глухозаземленной нейтральной точкой генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в сетях постоянного тока.

Совмещенный (PEN – проводник в системе TN – C) нулевой защитный и нулевой рабочий проводник – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, совмещающий функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника.

Зануление необходимо для обеспечения защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении за счет снижения напряжения корпуса относительно земли и быстрого отключения электроустановки от сети.

Область применения зануления:

- электроустановки напряжением до 1 кВ в трехфазных сетях переменного тока с заземленной нейтралью (система TN – S; обычно это сети 220/127, 380/220, 660/380 В);

- электроустановки напряжением до 1 кВ в однофазных сетях переменного тока с заземленным выводом;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях постоянного тока с заземленной средней точкой источника.

Принцип действия зануления. При замыкании фазного провода на зануленный корпус электропотребителя (рис. 4.12) образуется цепь тока однофазного короткого замыкания (то есть замыкания между фазным и нулевым защитным проводниками). Ток однофазного короткого замыкания вызывает срабатывание максимальной токовой защиты, в результате чего происходит отключение поврежденной электроустановки от питающей сети. Кроме того, до срабатывания максимальной токовой защиты происходит снижение напряжения поврежденного корпуса относительно земли, что связано с защитным действием повторного заземления нулевого защитного проводника и перераспределением напряжений в сети при протекании тока короткого замыкания.

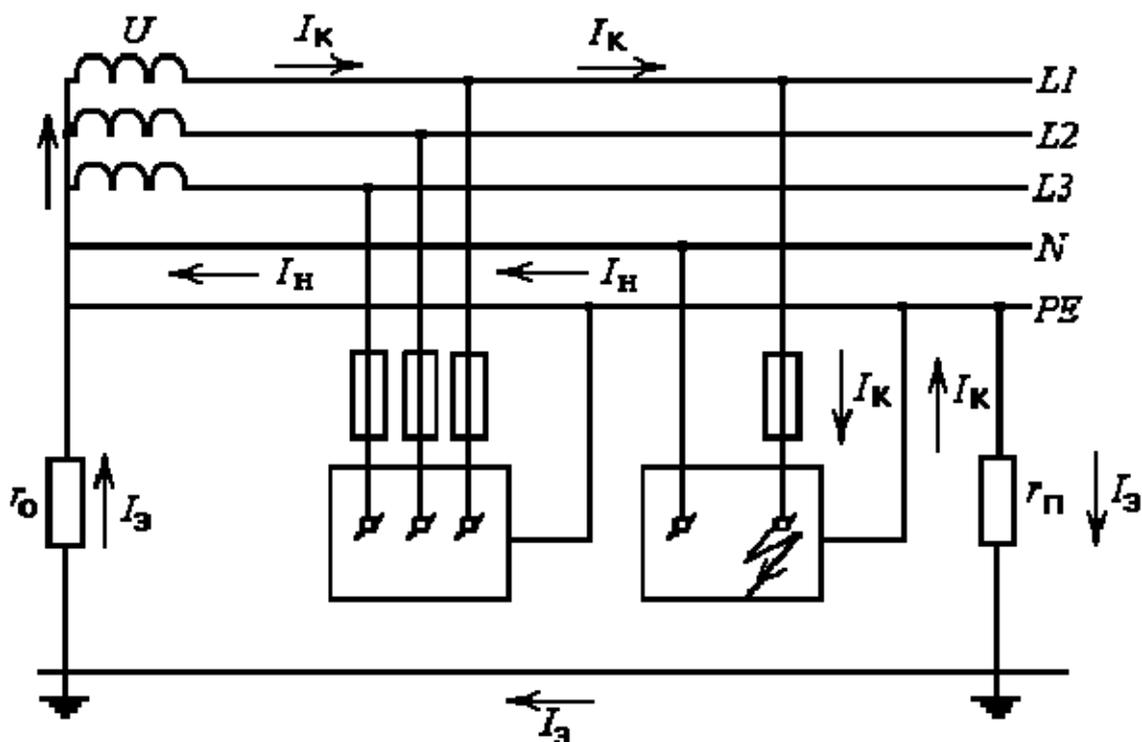


Рис. 12 – Принципиальная схема зануления в системе TN-S:

$r_0$  – сопротивление заземления нейтрали обмотки источника тока;

$RП$  – сопротивление повторного заземления нулевого защитного проводника;

$I_k$  – ток КЗ;  $I_n$  – часть тока КЗ, протекающего через нулевой защитный проводник;  $I_z$  – часть тока КЗ, протекающего через землю.

Следовательно, зануление обеспечивает защиту от поражения электрическим током при замыкании на корпус за счет ограничения времени

прохождения тока через тело человека и за счет снижения напряжения прикосновения.

В качестве максимальной токовой защиты, обеспечивающей быстрое отключение электроустановки в аварийном режиме могут использоваться плавкие предохранители и автоматические выключатели, устанавливаемые для защиты от токов короткого замыкания, магнитные пускатели со встроенной тепловой защитой, контакторы в сочетании с тепловыми реле, осуществляющие защиту от перегрузки, автоматы с комбинированными расцепителями, осуществляющие защиту одновременно от токов короткого замыкания и перегрузки и др.

Назначение отдельных элементов схемы зануления. Из рис. 13 видно, что для схемы зануления необходимы нулевой защитный проводник, глухое заземление нейтрали источника тока и повторное заземление нулевого защитного проводника.

Рассмотрим назначение этих элементов применительно к наиболее распространенным электрическим сетям – трехфазным переменного тока.

Назначение нулевого защитного проводника в схеме зануления: обеспечить необходимое для отключения установки значение тока однофазного короткого замыкания путем создания для этого тока цепи с малым сопротивлением.

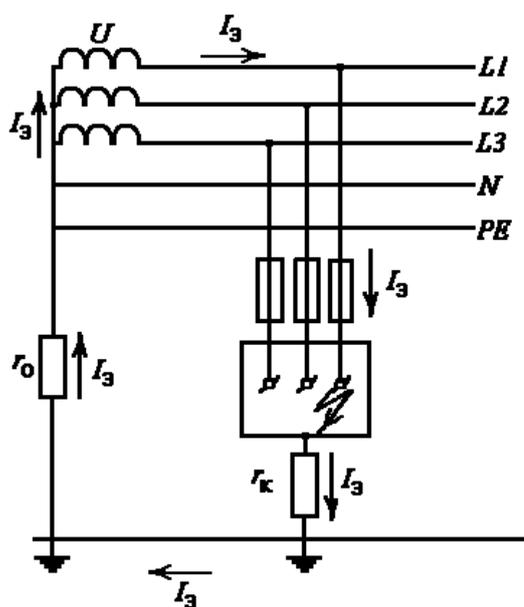


Рис. 13 – К вопросу о необходимости нулевого защитного проводника в трехфазной сети до 1 кВ с заземленной нейтралью

Пусть мы имеем схему без нулевого защитного проводника, роль которого выполняет земля. Будет ли работать такая схема?

При замыкании фазы на корпус по цепи, образовавшейся через землю, будет проходить ток:

$$I_3 = \frac{U}{r_o + r_k}, \quad (15)$$

где  $U$  – фазное напряжение сети, В;  $r_o$ ,  $r_k$  – сопротивления заземления нейтрали и корпуса, Ом.

Сопротивления обмоток источника тока (например, трансформатора, питающего данную сеть) и проводов сети малы по сравнению с  $r_o$  и  $r_k$ , поэтому их в расчет не принимаем.

В результате протекания тока через сопротивление  $r_k$  в землю на корпусе возникает напряжение относительно земли  $U_k$  равное падению напряжения на сопротивлении  $r_k$ :

$$U_k = I_3 r_k = \frac{U r_k}{r_o + r_k}, \quad (16)$$

Ток  $I_3$  может оказаться недостаточным, чтобы вызвать срабатывание максимальной токовой защиты, т. е. установка может не отключиться.

Чтобы устранить эту опасность, надо обеспечить быстрое автоматическое отключение установки, т. е. увеличить ток, проходящий через защиту, что достигается уменьшением сопротивления цепи этого тока путем введения в схему нулевого защитного проводника соответствующей проводимости.

Следовательно, из сказанного вытекает еще один вывод: в трехфазной сети напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью без нулевого защитного проводника невозможно обеспечить безопасность при косвенном прикосновении, поэтому такая сеть применяться не должна.

Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока. Рассмотрим четырехпроводную сеть, изолированную от земли, т. е. с изолированной нейтралью обмоток источника тока и без повторного заземления нулевого защитного проводника (рис. 14). Будет ли работать система зануления в такой сети?

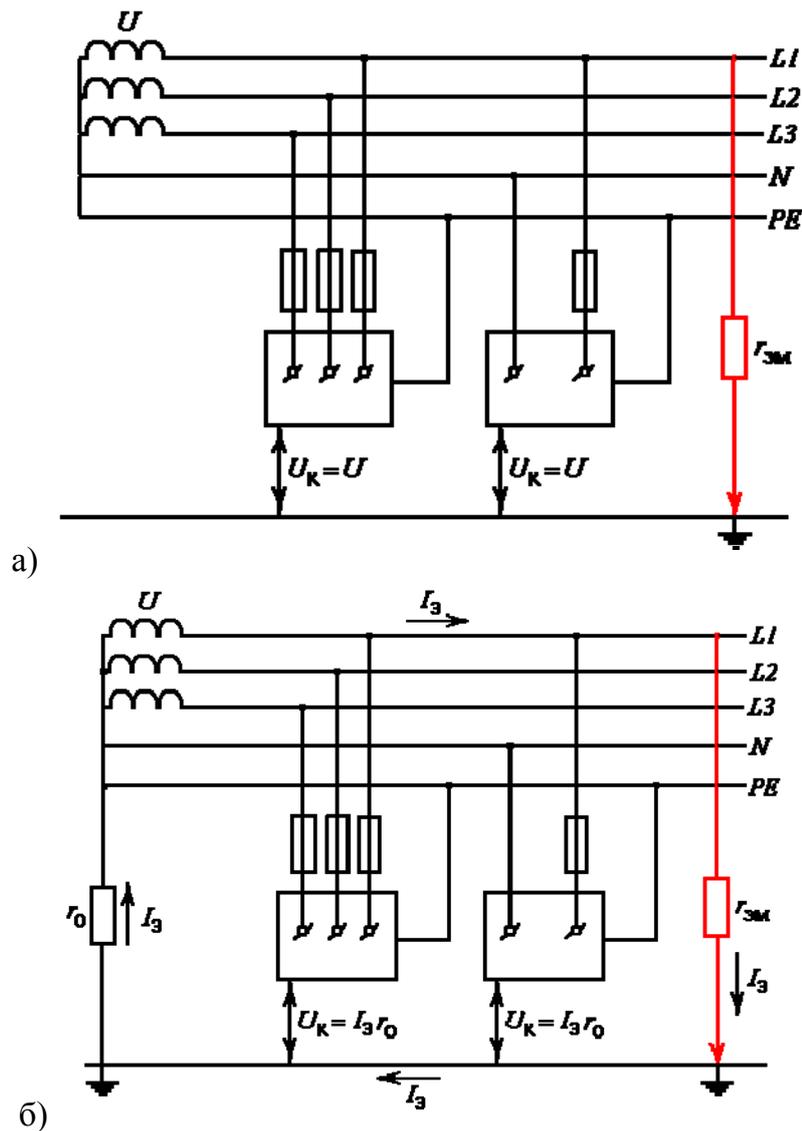


Рис. 14 – Случай замыкания фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью

Нетрудно видеть что в этой сети зануление обеспечит отключение поврежденной установки так же надежно, как и в сети с заземленной нейтралью. С этой точки зрения режим нейтрали не имеет значения. Однако при замыкании фазы на землю (рис. 14а), что может иметь место в результате обрыва и падения на землю провода, а также при замыкании фазного провода на неизолированный от земли корпус и т.п., земля приобретает потенциал фазы и между зануленным оборудованием, имеющим нулевой потенциал, и землей возникает напряжение  $U_k$ , близкое по значению к фазному напряжению сети  $U$ . Оно будет существовать до отключения всей сети вручную или до ликвидации замыкания на землю, так как максимальная токовая защита при этом повреждении не сработает. Указанная ситуация очень опасна.

В сети с заземленной нейтралью при таком повреждении будет практически безопасная ситуация. В этом случае фазное напряжение  $U$  разделится пропорционально сопротивлениям замыкания фазы на землю  $r_{3M}$  и заземления нейтрали  $r_0$  (рис. 14б), благодаря чему  $U_k$  уменьшится и будет равно падению напряжения на сопротивлении заземления нейтрали:

$$U_k = I_{3M} r_0 = \frac{U r_0}{r_{3M} + r_0}, \quad (17)$$

где  $I_{3M}$  – ток замыкания на землю, А.

Как правило, сопротивление растеканию тока в месте замыкания на землю  $r_{3M}$ , которое оказывает грунт току при случайном замыкании фазы на землю, во много раз больше сопротивления специально выполненного заземления нейтрали  $r_{3M}$ . Поэтому  $U_k$  оказывается незначительным.

Например, при  $U = 220$  В,  $r_0 = 4$  Ом и  $r_{3M} = 100$  Ом:

$$U_k = \frac{220 \times 4}{4 + 100} = 8,5 \text{ В.} \quad (18)$$

Таким образом, заземление нейтрали обмоток источника тока, питающего сеть напряжением до 1 кВ, предназначено для снижения напряжения зануленных корпусов (а, следовательно, нулевого защитного проводника) относительно земли до безопасного значения при замыкании фазы на землю.

Повторное заземление нулевого защитного проводника практически не влияет на время отключения электроустановки от сети. Однако, при эксплуатации зануления могут возникнуть такие ситуации, когда повторное заземление нулевого защитного проводника необходимо, например, при обрыве нулевого защитного проводника.

Назначение повторного заземления нулевого защитного проводника

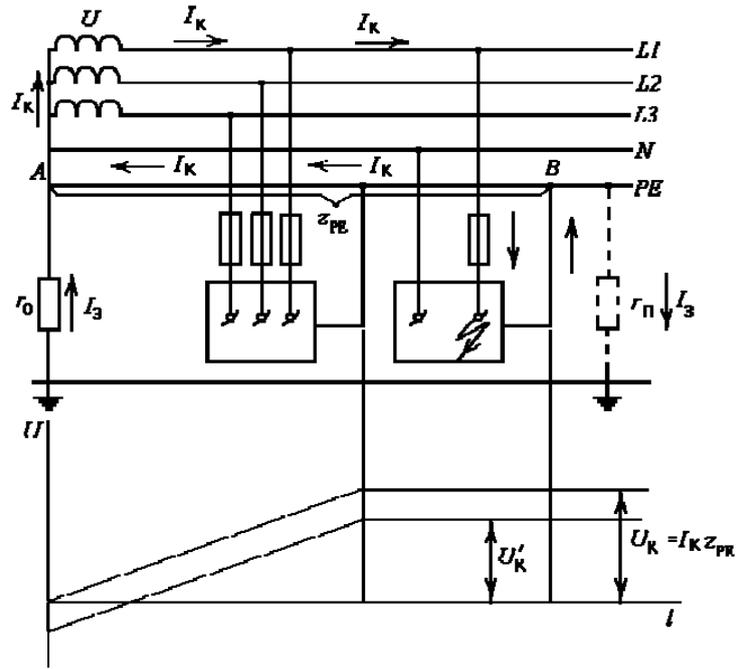


Рис. 15 – Замыкание на корпус в системе TN–S

При замыкании фазы на корпус в сети, не имеющей повторного заземления нулевого защитного проводника (рис. 15), участок нулевого защитного проводника, находящийся за местом замыкания, и все присоединенные к нему корпуса окажутся под напряжением относительно земли  $U_k$ , равным:

$$U_k = I_k Z_{PE}, \quad (19)$$

где  $I_k$  – ток КЗ, проходящий по петле фаза-нуль, А;  $z_{PEN}$  – полное сопротивление участка нулевого защитного проводника, обтекаемого током  $I_k$ , Ом (т. е. участка АВ).

Напряжение  $U_k$  будет существовать в течение аварийного периода, т. е. с момента замыкания фазы на корпус до автоматического отключения поврежденной установки от сети.

Если для упрощения пренебречь сопротивлением обмоток источника тока и индуктивным сопротивлением петли фаза-нуль, а также считать, что фазный и нулевой защитный проводники обладают лишь активными сопротивлениями  $R_{L1}$  и  $R_{PE}$ , то (4.3) примет вид:

$$U_k = I_k R_{PE} = \frac{U R_{PE}}{R_{L1} + R_{PE}}. \quad (20)$$

Если нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление с сопротивлением  $r_{\Pi}$  (на рис. 15 это заземление показано пунктиром), то  $U_k$  снизится до значения, определяемого формулой:

$$U_k = I_k r_{\Pi} = \frac{U_{AB} \cdot r_{\Pi}}{r_{\Pi} + r_0}, \quad (21)$$

где  $I_k$  – ток, стекающий в землю через сопротивление  $r_{\Pi}$ , А;  $U_{AB}$  – падение напряжения в нулевом защитном проводнике на участке АВ;  $r_0$  – сопротивление заземления нейтрали источника тока, Ом.

Итак, повторное заземление нулевого защитного проводника снижает напряжение на зануленных корпусах в период замыкания фазы на корпус.

При случайном обрыве нулевого защитного проводника и замыкании фазы на корпус за местом обрыва (при отсутствии повторного заземления) напряжение относительно земли участка нулевого защитного проводника за местом обрыва и всех присоединенных к нему корпусов, в том числе корпусов исправных установок, окажется близким по значению фазному напряжению сети (рис. 16а). Это напряжение будет существовать длительно, поскольку поврежденная установка автоматически не отключится, и ее будет трудно обнаружить среди исправных установок, чтобы отключить вручную.

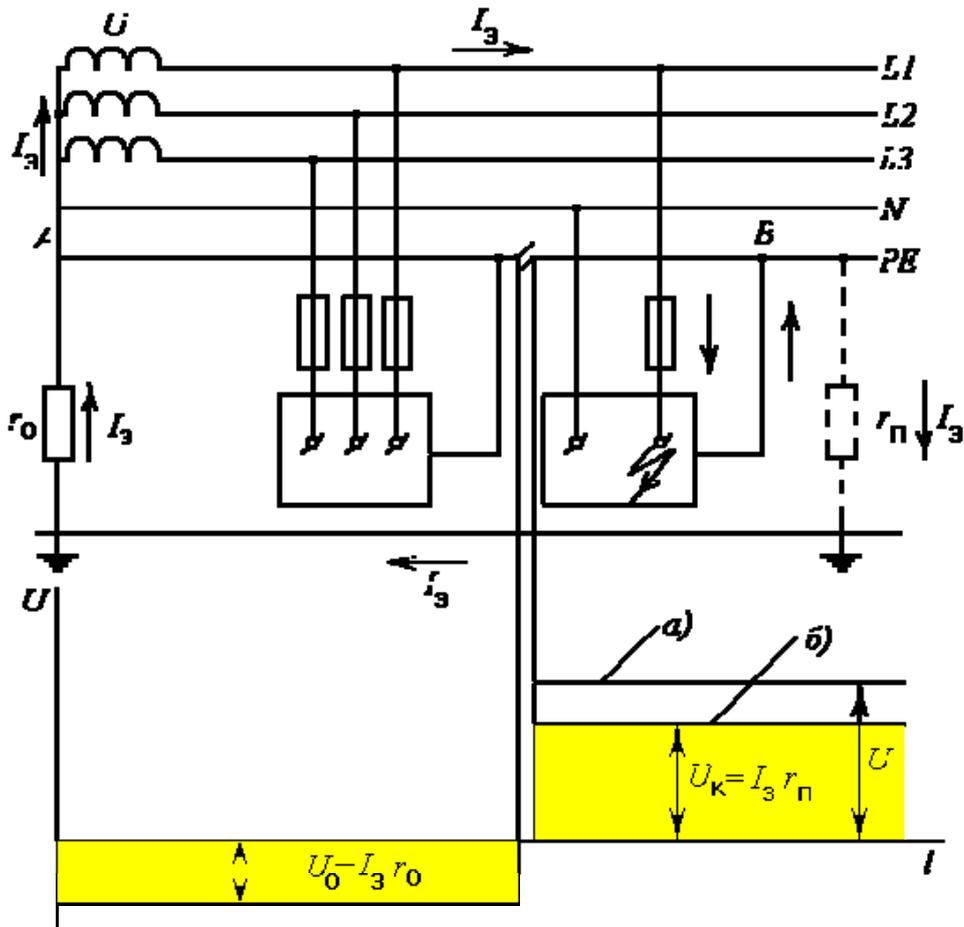


Рис. 16 – Замыкание на корпус при обрыве нулевого защитного проводника:  
а – в сети без повторного заземления нулевого защитного проводника,  
б – в сети с повторным заземлением нулевого защитного проводника.

Если же нулевой защитный проводник будет иметь повторное заземление, то при обрыве его сохранится цепь тока  $I_3$ , А, через землю (рис 16б), благодаря чему напряжение зануленных корпусов, находящихся за местом обрыва, снизится до значений, определяемых формулой:

$$U_k = I_3 r_{\Pi} = \frac{U r_{\Pi}}{r_{\Pi} + r_o}, \quad (22)$$

При этом корпуса установок, присоединенных к нулевому защитному проводнику до места обрыва, приобретут напряжение относительно земли:

$$U_o = I_3 r_o = \frac{U r_o}{r_{\Pi} + r_o}, \quad (23)$$

где  $r_0$  – сопротивление заземления нейтрали источника тока, Ом.

Итак, повторное заземление нулевого защитного проводника значительно уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате обрыва нулевого защитного проводника и замыкания фазы на корпус за местом обрыва, но не может устранить ее полностью, т. е. не может обеспечить тех условий безопасности, которые существовали до обрыва.

При применении системы TN рекомендуется выполнять повторное заземление PE – и PEN – проводников на вводе в электроустановки зданий, а также в других доступных местах. Для повторного заземления нулевых защитных проводников следует в первую очередь использовать естественные заземлители. В этом случае сопротивление растеканию тока заземлителя повторного заземления не нормируется. Внутри больших и многоэтажных зданий аналогичную функцию выполняет уравнивание потенциалов посредством присоединения нулевого защитного проводника к главной заземляющей шине.

Повторному заземлению подвергаются нулевые рабочие провода воздушных линий, которые одновременно используются как нулевые защитные проводники (PEN – проводники). При этом в соответствии с главой 1.7 ПУЭ для воздушных линий электропередач общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе, естественных) всех повторных заземлителей PEN – проводника каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380, 220 В источника трехфазного тока или 320, 220, 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30, 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

При удельном сопротивлении грунта более 100 Ом м допускается увеличивать указанные нормы в  $0,01 \times \rho$  раз, но не более десятикратного.

Повторные заземления выполняются на концах линий или ответвлений длиной более 200 м. При этом в первую очередь следует использовать естественные заземлители, например, подземные части опор, а также заземляющие устройства, предназначенные для грозовых перенапряжений.

Надежность зануления определяется в основном надежностью нулевого защитного проводника. В связи с этим требуется тщательная прокладка нулевого защитного проводника, чтобы исключить возможность его обрыва. Кроме того, в нулевом защитном проводнике запрещается ставить выключатели, предохранители и другие приборы, способные нарушить его целостность.

При соединении нулевых защитных проводников между собой должен обеспечиваться надежный контакт. Присоединение нулевых защитных проводников к частям электроустановок, подлежащих занулению, осуществляется сваркой или болтовым соединением, причем, значение сопротивления между зануляющим болтом и каждой доступной прикосновению металлической нетоковедущей частью электроустановки, которая может оказаться под напряжением, не должно превышать 0,1 Ом. Присоединение должно быть доступно для осмотра.

Нулевые защитные провода и открыто проложенные нулевые защитные проводники должны иметь отличительную окраску: по зеленому фону желтые полосы.

В процессе эксплуатации зануления сопротивление петли «фаза-нуль» может меняться, следовательно, необходимо периодически контролировать значение этого сопротивления. Измерения сопротивления петли «фаза-нуль» проводят как после окончания монтажных работ, то есть при приемо-сдаточных испытаниях, так и в процессе эксплуатации в сроки, установленные в нормативно технической документации, а также при проведении капитальных ремонтов и реконструкций сети.

Расчет зануления имеет целью определить условия, при которых оно надежно выполняет возложенные на него задачи быстро отключает поврежденную установку от сети и в то же время обеспечивает безопасность прикосновения человека к зануленному корпусу в аварийный период. В соответствии с этим зануление рассчитывают на отключающую способность.

К расчету зануления на отключающую способность.

Значение тока короткого замыкания  $I_k$  зависит от фазного напряжения сети  $U$  и сопротивлений цепи, в том числе от полных сопротивлений трансформатора  $z_m$ , фазного проводника  $z_{L1}$ , нулевого защитного проводника  $z_{PE}$ , внешнего индуктивного сопротивления петли (контура) фазный проводник – нулевой защитный проводник (петли фаза – нуль)  $x_{II}$ , а также от активных сопротивлений заземлений нейтрали обмоток источника тока (трансформатора)  $r_0$  и повторного заземления нулевого защитного проводника  $r_{II}$ .

Поскольку  $r_0$  и  $r_{II}$ , как правило, велики по сравнению с другими сопротивлениями цепи, можно не принимать во внимание параллельную ветвь, образованную ими. Тогда выражение для тока короткого замыкания  $I_k$  в комплексной форме будет иметь вид:

$$I_{-k} = \frac{U}{\frac{Z_T}{3} + Z_{-L_1} + Z_{-PE} + jX_{II}}, \quad (24)$$

где  $U$  фазное напряжение сети, В;  $z_m$  – комплекс полного сопротивления обмоток трехфазного источника тока (трансформатора), Ом;  $z_{LI}$  – комплекс полного сопротивления фазного провода, Ом;  $z_{PE}$  – комплекс полного сопротивления нулевого защитного проводника, Ом.

При расчете зануления допустимо применять приближенную формулу для вычисления действительного значения (модуля) тока короткого замыкания  $I_k$ , в которой модули сопротивлений трансформатора и петли фаза – нуль  $z_m$  и  $z_{II}$  складываются арифметически:

$$I_k = \frac{U}{\frac{Z_T}{3} + Z_{II}}. \quad (25)$$

Некоторая неточность (около 5%) этой формулы ужесточает требования безопасности и поэтому считается допустимой.

Полное сопротивление петли фаза – нуль в действительной форме равно:

$$Z_{II} = \sqrt{(R_{L_1} + R_{PE})^2 + (X_{L_1} + X_{PE} + X_{II})^2} \quad (26)$$

Расчет зануления на отключающую способность является проверочным расчетом правильности выбора проводимости нулевого защитного проводника, а точнее, достаточности проводимости петли фаза – нуль.

Значение  $z_m$  зависит от мощности трансформатора, напряжения и схемы соединения его обмоток, а также от конструктивного исполнения трансформатора. При расчетах зануления значение  $z_m$  берется из таблиц.

Значения  $R_{LI}$  и  $R_{PE}$  для проводников из цветных металлов (медь, алюминий) определяют по известным данным сечению  $s$ , длине  $l$ , и материалу проводников. При этом искомое сопротивление:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (27)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, равное для меди  $1,8 \times 10^{-8}$  Ом м, а для алюминия  $2,8 \times 10^{-8}$  Ом м.

Если нулевой защитный проводник стальной, то его активное сопротивление  $R_{PE}$  определяется с помощью таблиц, в которых приведены

значения сопротивлений 1 км различных стальных проводников при разной плотности тока частотой 50 Гц.

Для этого необходимо задаться профилем и сечением проводника, а также знать его длину и ожидаемое значение тока  $I_k$ , который будет проходить по этому проводнику в аварийный период. Сечением проводника задаются из расчета, чтобы плотность тока в нем была в пределах примерно 0,5–2,0 А/мм<sup>2</sup>.

Значения  $x_{LI}$  и  $x_{PE}$  медных и алюминиевых проводников сравнительно малы, поэтому ими можно пренебречь. Для стальных проводников внутренние индуктивные сопротивления оказываются достаточно большими, и их определяют с помощью таблиц. При этом также необходимо знать профиль и сечение проводника, его длину и ожидаемое значение тока  $I_k$ .

Значение  $x_{II}$  может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формуле для индуктивного сопротивления двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра:

$$X_{II} = \omega L = \omega \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} l \ln \frac{2D}{d}, \quad (28)$$

где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с,  $L$  – индуктивность линии, Гн;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $l$  – длина линии, м;  $D$  – расстояние между проводами линии, м.

При малых значениях  $D$ , соизмеримых с диаметром проводов  $d$ , т.е. когда фазный и нулевой проводники расположены в непосредственной близости один от другого, сопротивление  $X_{II}$  незначительно (не более 0,1 Ом на км) и им можно пренебречь.

При этом в соответствии с ПУЭ должны выполняться следующие требования.

В системе TN время автоматического отключения питания не должно превышать значений, указанных в табл. 1.

**Наибольшее допустимое время защитного автоматического отключения питания**

Номинальное фазное напряжение U, В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

Приведенные в таблице 1 значения времени отключения питания считаются достаточными для обеспечения электробезопасности, в том числе и в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники и ручной электроинструмент класса I.

В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и другие щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с.

Допускаются значения времени отключения более указанных в таблице 1, но не более 5 с в цепях, питающих только стационарные электроприемники от распределительных щитков или щитов при выполнении одного из следующих условий:

1) полное сопротивление защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком не превышает значения, Ом

$$50 \frac{Z_{\Sigma}}{U}, \quad (29)$$

где  $Z_{\Sigma}$  – полное сопротивление цепи «фаза – нуль», Ом;  $U$  – номинальное фазное напряжение сети, В; 50 – падение напряжения на участке защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком, В.

2) к шине РЕ распределительного щита или щитка присоединена дополнительная система уравнивания потенциалов, охватывающая те же сторонние проводящие части, что и основная система уравнивания потенциалов.

Расчет зануления на отключающую способность заключается в определении параметров нулевого защитного проводника (длина, сечение, материал) и максимальной токовой защиты, при которых ток однофазного короткого замыкания, возникающий при замыкании фазного про-

вода на зануленный корпус, вызвал бы срабатывание максимальной токовой защиты за время, указанное в таблице 1.

## 3.2. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

**Защитное автоматическое отключение питания** – автоматическое размыкание цепи одного или нескольких фазных проводников (и, если требуется, нулевого рабочего проводника), выполняемое в целях электробезопасности.

Для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты от прямого прикосновения:

- основная изоляция токоведущих частей;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;
- применение сверхнизкого (малого) напряжения.

Для дополнительной защиты от прямого прикосновения в электроустановках напряжением до 1 кВ, следует применять устройства защитного отключения (УЗО) с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА.

Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

Применение двух и более мер защиты в электроустановке не должно оказывать взаимного влияния, снижающего эффективность каждой из них.

Электроустановки напряжением до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий и наружных установок должны, как правило, получать питание от источника с глухозаземленной нейтралью с применением системы *TN*. Для защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в таких электроустановках должно быть выполнено автоматическое отключение питания.

При выполнении автоматического отключения питания в электроустановках напряжением до 1 кВ все открытые проводящие части должны быть присоединены к глухозаземленной нейтрали источника питания, если применена система *TN*, и заземлены, если применены системы *IT* или *TT*. При этом характеристики защитных аппаратов и параметры защитных проводников должны быть согласованы, чтобы обеспечивалось нормированное время отключения поврежденной цепи защитно-коммутационным аппаратом в соответствии с номинальным фазным напряжением питающей сети.

В системе *TN* время автоматического отключения питания не должно превышать значений, указанных в табл. 2

Таблица 2

**Наибольшее допустимое время защитного автоматического отключения для системы *TN***

Номинальное фазное напряжение <i>U<sub>0</sub></i> , В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

Приведенные значения времени отключения считаются достаточными для обеспечения электробезопасности, в том числе в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники и ручной электроинструмент класса 1. В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с. Также допускается применение УЗО, реагирующих на дифференциальный ток.

В системе *IT* время автоматического отключения питания при двойном замыкании на открытые проводящие части должно соответствовать табл. 3

**Наибольшее допустимое время защитного автоматического  
отключения для системы IT**

Номинальное линейное напряжение $U_0$ , В	Время отключения, с
220	0,8
380	0,4
660	0,2
Более 660	0,1

При выполнении мер защиты в электроустановках напряжением до 1 кВ классы применяемого электрооборудования по способу защиты человека от поражения электрическим током по ГОСТ 12.2.007.0 «ССБТ. Изделия электротехнические» представлены в табл. 4

**Применение электрооборудования в электроустановках напряжением до 1 кВ**

Класс по ГОСТ 12.2.007.0 Р МЭК536	Маркировка	Назначение защиты	Условия применения электрооборудования в электроустановке
Класс 0	-	При косвенном прикосновении	1. Применение в непроводящих помещениях. 2. Питание от вторичной обмотки разделительного трансформатора только одного электроприемника
Класс I	Защитный зажим - знак  или буквы PE, или желто-зеленые полосы	При косвенном прикосновении	Присоединение заземляющего зажима электрооборудования к защитному проводнику электроустановки
Класс II	Знак 	При косвенном прикосновении	Независимо от мер защиты, принятых в электроустановке
Класс III	Знак 	От прямого и косвенного прикосновений	Питание от безопасного разделительного трансформатора

При применении автоматического отключения питания металлические корпуса переносных электроприемников, за исключением электроприемников с двойной изоляцией, должны быть присоединены к нулевому защитному проводнику в системе TN или заземлены в системе IT, для чего должен быть предусмотрен специальный защитный (PE) проводник, расположенный в одной оболочке с фазными проводниками

(третья жила кабеля или провода – для электроприемников однофазного и постоянного тока, четвертая или пятая жила – для электроприемников трехфазного тока), присоединяемый к корпусу электроприемника и к защитному контакту вилки штепсельного соединителя. PE-проводник должен быть медным, гибким, его сечение должно быть равно сечению фазных проводников. Использование для этой цели нулевого рабочего (N) проводника, в том числе расположенного в общей оболочке с фазными проводниками, не допускается.

В случае питания передвижной электроустановки от стационарного источника питания для защиты при косвенном прикосновении должно быть выполнено автоматическое отключение питания с применением устройства защиты от сверхтоков. При этом время отключения, приведенное в табл. 5, должно быть уменьшено вдвое либо дополнительно к устройству защиты от сверхтоков должно быть применено устройство защитного отключения, реагирующее на дифференциальный ток. В специальных электроустановках допускается применение УЗО, реагирующих на потенциал корпуса относительно земли. При применении УЗО, реагирующего на потенциал корпуса относительно земли, уставка по значению отключающего напряжения должна быть равной 25 В при времени отключения не более 5 с.

При применении автоматического отключения питания в системе IT для защиты при косвенном прикосновении должны быть выполнены:

- защитное заземление в сочетании с непрерывным контролем изоляции, действующим на сигнал;
- автоматическое отключение питания, обеспечивающее время отключения при двухфазном замыкании на открытые проводящие части в соответствии с табл. 5

Таблица 5

**Наибольшее допустимое время защитного автоматического отключения для системы IT в передвижных электроустановках, питающихся от автономного передвижного источника**

Номинальное линейное напряжение, U, В	Время отключения, с
220	0,4
380	0,2
660	0,06
Более 660	0,02

Для обеспечения автоматического отключения питания должно быть применено: устройство защиты от сверхтоков в сочетании с УЗО, реагирующим на дифференциальный ток, или устройством непрерывно-

го контроля изоляции, действующим на отключение, или УЗО, реагирующим на потенциал корпуса относительно земли.

## **4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ»**

Лабораторные работы по курсу «Электробезопасность» предназначены для практического изучения и закрепления знаний в области электробезопасности при эксплуатации электрических сетей и электрооборудования студентами электропрофессий ЭЛТИ, а также на курсах повышения квалификации электротехнического персонала предприятий и организаций.

### **4.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

В лабораторных работах по электробезопасности используются лабораторные стенды производства Инженерно-производственного центра «Учебная техника» г. Челябинск.

Аппаратная часть лабораторных стендов выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- спроектированные с учебными целями натурные аналоги элементов электрической системы;
- источники питания;
- измерительные преобразователи и приборы;
- составной лабораторный стол с встроенными контейнерами для хранения проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков.

Питание комплекта осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

Потребляемая мощность В·А, не более ..... 200

Габариты (длина/ ширина / высота), мм ..... 3650×900×1600

Масса, кг, не более ..... 200

Методическая часть комплекта включает настоящее руководство как материалы для подготовки к проведению лабораторных работ.

Лабораторный стенд представляет собой комплект модулей, включающий оборудование, используемое в лабораторных работах (табл. 6,7).

Таблица 6

**Перечень лабораторных работ, выполняемых на лабораторном стенде**

№ ЛР	Наименование лабораторной работы (ЛР)
1	Определение влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности
2	Определение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока в землю через защитный заземлитель
3.	Определение зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека
4	Натурное моделирование зануления электрооборудования
5	Контроль изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью
6	Измерение сопротивления заземления
7	Натурное моделирование защитного заземления/самозаземления электрооборудования
8	Натурное моделирование защитного отключения электрической сети

Таблица 7

**Используемое оборудование в экспериментах на лабораторном стенде**

Наименование модуля	Тип	Номер ЛБ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Блок линейных дросселей	201.2	1	1		1	1	1	1	1
Трехфазный трансформатор	337	1	1		1	1	1	1	1
Модель участка электрической сети	302	1	1		1	1	1	1	1
Модель человека	303	1				1		1	1
Модель замыкания на землю	309	1							1
Модель сопротивления изоляции	310	1			1				
Модель измерения заземления МИЗ1	311					1			
Устройство контроля изоляции УКИ1	312						1		

Наименование модуля	Тип	Номер ЛБ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Устройство защитного отключения	316					1			
Модель заземлителя с полусферическим электродом	321								1
Модель заземлителя с вертикальным трубчатым электродом	325		1						
Модель заземлителя с протяженным трубчатым электродом на поверхности	326		1						
Модель защитного заземления/самозаземления	327		1						
Модель зануления	328							1	
Устройство для исследования сопротивления тела человека	329				1				
Блок мультиметров	341			1					
Блок мультиметров	508.2	1	1		1	1	1	1	1

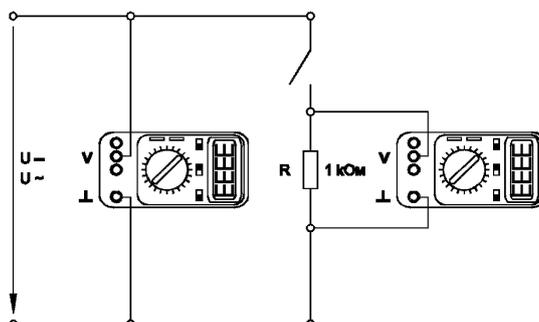
Электрическая схема собирается из модулей (оборудование), входящих в состав лабораторного стенда, посредством проводников согласно табл. 6, 7 и 8.

## Используемое оборудование в экспериментах на лабораторном стенде

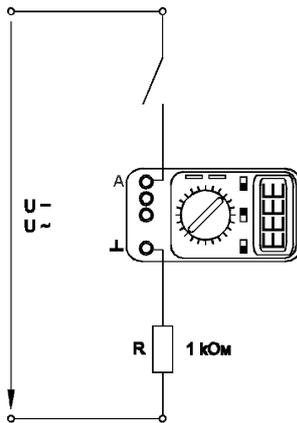
Тип модуля	Обозначение	Параметры (предельные)
201.2	G1	400 В ~; 16 А
337	A1	6x1,0 Гн; 0,5 А
302	A2	250 ВА, 380/380 В, Y-0/Y-0
303	A3	380 В ~; 3 × 0,5 А
309	A4	380 В ~; 3 × 0,5 А
310	A5	380 В ~; 3 × 0,5 А
311	A7	380 В ~
312	A9	220 В ~; 0,5 А
316	A8	380 В ~; 3 × 0,5 А
321	A11	380 В ~; 3 × 0,5 А
325	A6	380 В ~; 3 × 0,5 А
326	A6	380 В ~; 3 × 0,5 А
327	A6	380 В ~; 3 × 0,5 А
328	A10	380 В ~; 3 × 0,5 А
329	A7	380 В ~; 3 × 0,5 А
341		0...7 В ~; 0,03 А
508.2	P1	0...1000 В ~; 0...10 А ~; 0...20 МОм

#### 4.2 ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО МУЛЬТИМЕТРА

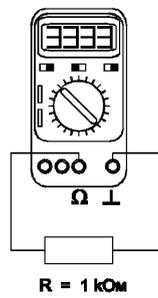
Для выполнения экспериментов в лабораторных работах необходимо использовать модуль блока мультиметров P1 (508.2), которые включаются в электрическую схему, один как амперметр, другой как вольтметр. В ходе их воспроизводится работа устройств, обеспечивающих безопасность электроустановок, с одновременной регистрацией тока, напряжения, а также измерения сопротивлений электрической схемы.



Присоединение мультиметра как вольтметра



**Присоединение мультиметра как амперметра**



**Присоединение мультиметра как омметра**

Рис. 17 – Схемы включения мультиметра

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЕЕ НЕЙТРАЛИ НА УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

### Цель работы

Оценить опасность поражения электрическим током в зависимости от:

- напряжения и схемы питания электроустановок,
- режима нейтрали,
- сопротивления элементов электрической сети,
- условий включения человека в цепь.

### Общие сведения

Режим нейтрали трехфазной сети выбирается по технологическим требованиям и условиям безопасности. Согласно ПУЭ, при напряжении выше 1 кВ применяются две схемы: трехпроводные сети с изолированной нейтралью и трехпроводные сети с эффективно заземленной нейтралью. При напряжении до 1 кВ применяются трехпроводные сети с изолированной нейтралью и четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью.

Нейтраль – это точка соединения обмоток питающего цепь трансформатора или генератора. Нейтраль может быть изолированной или заземленной.

Заземленной называется нейтраль, присоединенная к заземляющему устройству, либо непосредственно, либо через малое сопротивление.

Изолированной называется нейтраль либо не присоединенная к заземляющему проводу, либо соединенная с ним через большое сопротивление.

Анализируя различные случаи прикосновения человека к проводам трехфазных электрических сетей, можно сделать вывод, что наиболее опасным является двухфазное прикосновение при любом режиме нейтрали. В этом случае ток, проходящий через тело человека  $I_{\text{ч}}$ , определяется линейным напряжением  $U_{\text{л}}$  и сопротивлением его тела  $R_{\text{ч}}$ :

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{л}} / R_{\text{ч}} \quad (30)$$

$$U_{\text{л}} = 1,73U_{\text{ф}} \quad (31)$$

В трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью силу тока, проходящего через тело человека, при прикосновении к одной из фаз сети в период ее нормальной работы, определяют следующим выражением в комплексной форме:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ч}} + Z/3}, \quad (32)$$

где  $Z$  – комплекс полного сопротивления одной фазы относительно земли, Ом;  $r$  – сопротивление изоляции провода относительно земли, Ом;  $C$  – емкость изоляции провода относительно земли, Ф.

Ток в действительной форме составит:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ч}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2(r^2\omega^2C^2)}}} \quad (33)$$

Если емкость проводов относительно земли мала, что обычно имеет место в воздушных сетях небольшой протяженности, то уравнение примет вид

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ч}} + r/3} = \frac{3U_{\Phi}}{3R_{\text{ч}} + r}, \quad (34)$$

где  $r$  – сопротивление изоляции, Ом.

Если же емкость велика, а проводимость изоляции незначительна, что обычно имеет место в кабельных сетях, то сила тока, проходящего через тело человека, будет равна

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\Phi}}{\sqrt{R^2 + (\chi_c/3)^2}}, \quad (35)$$

где  $\chi_c$  – емкостное сопротивление, Ом;  $\omega$  – угловая частота, рад/с.

В сетях с изолированной нейтралью, обладающих незначительной емкостью между проводами и землей, опасность для человека, прикоснувшегося к одной из фаз в период нормальной работы сети, зависит от сопротивления проводов относительно земли: с увеличением сопротивления опасность уменьшается. Поэтому очень важно в таких сетях обеспечивать высокое сопротивление изоляции и контролировать ее состояние для своевременного выявления и устранения возникших неисправностей. Однако в сетях с большой емкостью относительно земли

роль изоляции проводов в обеспечении безопасности прикосновения утрачивается, что видно из уравнений.

В трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью проводимость изоляции и емкостная проводимость проводов относительно земли малы по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, поэтому при определении силы тока, проходящего через тело человека, касающегося фазы сети, ими можно пренебречь.

При нормальном режиме работы сети сила тока, проходящего через тело человека, будет равна:

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + r_o), \quad (36)$$

где  $r_o$  – сопротивление заземления нейтрали, Ом.

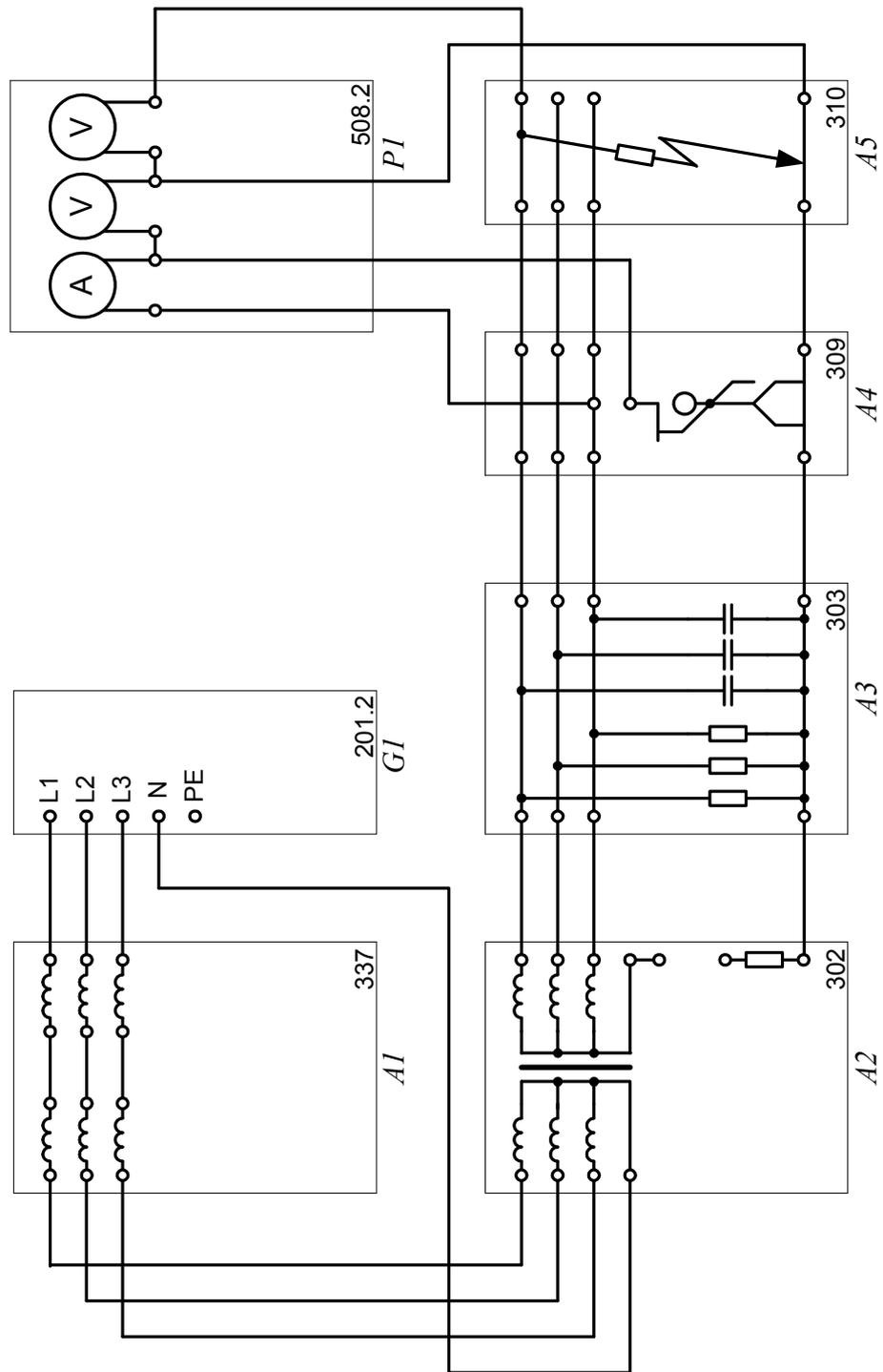
Как правило,  $r_o < 10$  Ом, сопротивление же тела человека  $R_{\text{ч}}$  не опускается ниже сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки в уравнении можно пренебречь значением  $r_o$  и считать, что при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью человек оказывается практически под фазным напряжением  $U_{\text{ф}}$ , а ток, проходящий через него, равен частному от деления  $U_{\text{ф}}$  на  $R_{\text{ч}}$ .

Отсюда следует, что прикосновение к фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью в период нормальной ее работы более опасно, чем прикосновение к фазе нормально работающей сети с изолированной нейтралью.

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A3	Модель участка электрической сети	303
A4	Модель человека	309
A5	Модель замыкания на землю	310
P1	Блок мультиметров	508.2

# Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

Необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. Гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1. Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.

Моделируется электрическая сеть с изолированной нейтралью. Для этого между гнездом нейтральной точки трансформатора и гнездом сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора А2 должна отсутствовать перемычка.

1. Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
2. Сопротивление замыкания на землю модели А5 устанавливается равным бесконечности  $R_{зам} = \infty$ .
3. Снимаются следующие зависимости тока через тело человека:  $I_h = f(R_{из})$ ,  $I_h = f(C)$ ,  $I_h = f(R_{обуви})$ ,  $I_h = f(R_{пола})$ . Измерения производятся при варьировании сопротивлений изоляции  $R_A = R_B = R_C$  и емкости  $C$  фаз модели А3, а также сопротивления обуви  $R_{обуви}$  и сопротивления пола  $R_{пола}$  модели А4.
4. С помощью амперметра и вольтметров блока P1 снимаются следующие зависимости: зависимость силы тока через тело человека от сопротивления замыкания  $I_h = f(R_{зам})$ , зависимость напряжения прикосновения от сопротивления замыкания фазы на землю  $U_{пр} = f(R_{зам})$ , зависимость напряжения прикосновения от сопротивления пола  $U_{пр} = f(R_{пола})$  и напряжения фаз электрической сети относительно земли  $U_A = f(R_{зам})$ ,  $U_B = f(R_{зам})$ ,  $U_C = f(R_{зам})$ .

Полученные результаты анализируются, и делается вывод о влиянии параметров в электрической сети с изолированной нейтралью на условия электробезопасности.

Далее моделируется электрическая сеть с глухозаземленной нейтралью. Для этого соединяется перемычкой гнездо нейтральной точки трансформатора и гнездо сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора А2.

5. Снимаются, аналогичные ранее снятым, зависимости тока через тело человека:  $I_h = f(R_{из})$ ,  $I_h = f(C)$ ,  $I_h = f(R_{обуви})$ ,  $I_h = f(R_{пола})$ .
6. Снимаются зависимости силы тока и напряжения прикосновения от сопротивления замыкания фазы на землю:

$I_h = f(R_{зам}), U_{пр} = f(R_{зам})$ . Измерения производятся при варьировании сопротивления замыкания на землю  $R_{зам}$  модели А5.

Полученные результаты анализируются, и делается вывод о влиянии параметров в электрической сети с глухозаземленной нейтралью на условия электробезопасности.

Снятые зависимости сопоставляются для различных режимов нейтрали, на основании чего делается вывод о влиянии режима нейтрали электрической сети на условия электробезопасности.

По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

### **Требования к отчету**

В отчет по лабораторной работе вносится:

- Наименование и цель работы.
- Применяемые приборы и оборудование.
- Заполненные таблицы с необходимыми расчетными формулами.
- Общие выводы по результатам сделанной работы.

Результаты экспериментов заносятся в табл. 9,10.

Таблица 9

## Экспериментальная таблица

Сопротивление изоляции	Сопротивление пола	Сопротивление обуви	Сила тока, А	Напряжение, В
$R_A$				
$R_B$				
$R_C$				

Таблица 10

## Экспериментальная таблица

Емкость фаз	Сопротивление на землю, $R_{зам}$	Сила тока, А	Напряжение, В
$C_A$			
$C_B$			
$C_C$			

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СТЕКАНИИ ТОКА В ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ**

### **Цель работы**

Изучить зависимости, характеризующие явления при стекании тока в землю через защитный заземлитель.

### **Общие сведения**

Все случаи поражения человека током в результате электрического удара возможны лишь при замыкании электрической цепи через тело человека или, иначе говоря, при прикосновении человека не менее чем к двум точкам цепи, между которыми существует некоторое напряжение.

Опасность такого прикосновения, оцениваемая значением тока, проходящего через тело человека, или же напряжением прикосновения, зависит от ряда факторов: схемы замыкания цепи тока через тело человека, напряжение сети, схемой самой сети, режима ее нейтрали (т. е. заземлена или изолирована нейтраль), степени изоляции токоведущих частей от земли, а также от значений емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Следовательно, указанная опасность не является однозначной: в одних случаях замыкание цепи тока через тело человека будет сопровождаться прохождением через него малых токов и окажется не опасным, в других – токи могут достигать больших значений, способных вызвать смертельное поражение человека.

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 и т. п.).

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 ( $1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$  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 в комплексной форме, проходящего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью, определяется соотношением:

$$\bar{I}_ч = \bar{U}_ф / (R_ч + R_{об} + R_п + \bar{Z}_н / 3), \quad (37)$$

где  $\bar{I}_ч$ ,  $\bar{U}_ф$ ,  $\bar{Z}_н$  – комплексы тока, А, фазного напряжения, В и сопротивления изоляции одной фазы, Ом;  $R_ч$  – сопротивление тела человека, Ом;  $R_{об}$  – сопротивление обуви человека, Ом;  $R_п$  – сопротивление пола (основания), Ом.

При малом сопротивлении обуви, пола и изоляции проводов относительно земли этот ток может достигать опасных значений.

Для трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью (рис. 18) проводимость изоляции фазных проводов относительно земли пренебрежимо мала по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, поэтому величина тока через тело человека практически не зависит от сопротивления изоляции и равна

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_3), \quad (38)$$

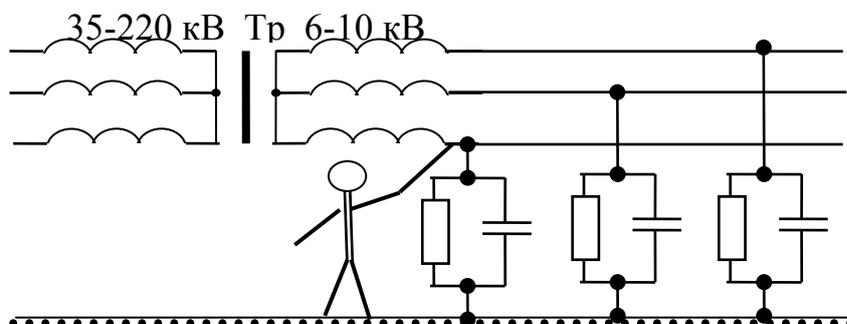


Рис. 18 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью

Наиболее неблагоприятный случай будет, когда человек прикоснувшийся к фазе имеет на ногах токопроводящую обувь – сырую или подбитую металлическими гвоздями и стоит непосредственно на сырой земле или на проводящем основании – на металлическом полу, на заземленной металлической конструкции, т. е. когда можно принять  $R_{\text{об}}=0$  и  $R_{\text{п}}=0$ . Сопротивление заземления нейтрали  $R_0$  обычно во много раз меньше сопротивления тела человека (как правило,  $R_0$  не превышает 10 Ом) и им можно пренебречь. При этих условиях величина тока через тело человека достигает опасной величины. Например, при  $R_{\text{ч}}=1000$  Ом (вполне вероятная величина) и  $R_3=4$  Ом  $I_{\text{ч}}=220/(1000+4)\approx 0,22$  А.

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.

Для искусственных заземлителей применяются обычно вертикальные и горизонтальные электроды, т.е. одиночные заземлители.

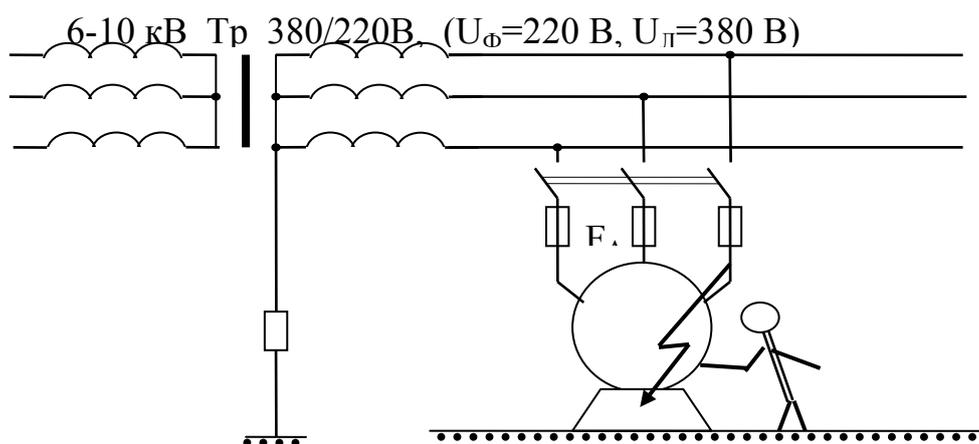


Рис. 19 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью

В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы диаметром 3–5 см и угловая сталь размером от 40×40 до 60×60 мм длиной 2,5–3 м, а также стальные прутки диаметром 10–12 мм и длиной до десяти метров.

Для соединения вертикальных электродов между собой и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяется полосовая сталь сечением не менее 4×12 мм или сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Для погружения в землю вертикальных электродов предварительно роют траншею глубиной 0,7–0,8 м, после чего их забивают и верхние концы соединяют стальной полосой с помощью сварки. В таких же траншеях прокладывают и горизонтальные электроды. Траншею засыпают землей, очищенной от строительного мусора, а затем тщательно утрамбовывают, что обеспечивает лучшую проводимость грунта, а следовательно, уменьшает расход металла на устройство заземления.

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. 20.

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  $\varphi_3$ .

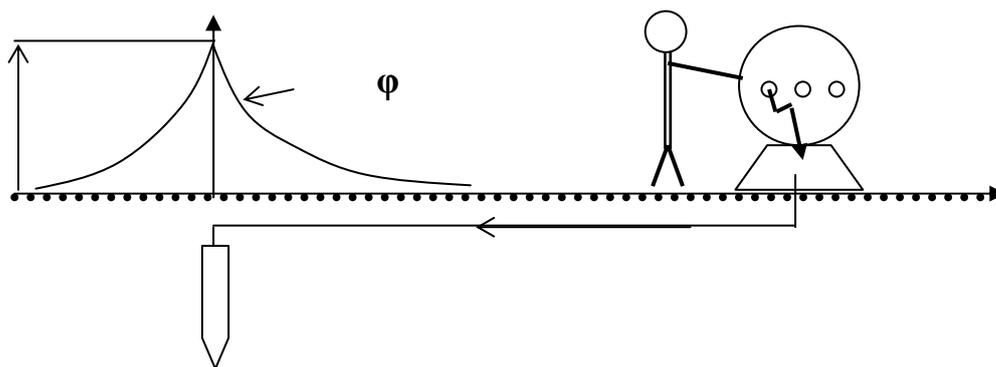


Рис. 20 – Выносной (сосредоточенный) заземлитель

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. 20. При этом распределения потенциалов отдельных заземлителей складываются, получается суммарное распределение потенциала  $\varphi_{3\Sigma}(X)$ . 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  $\varphi_3$ .

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.

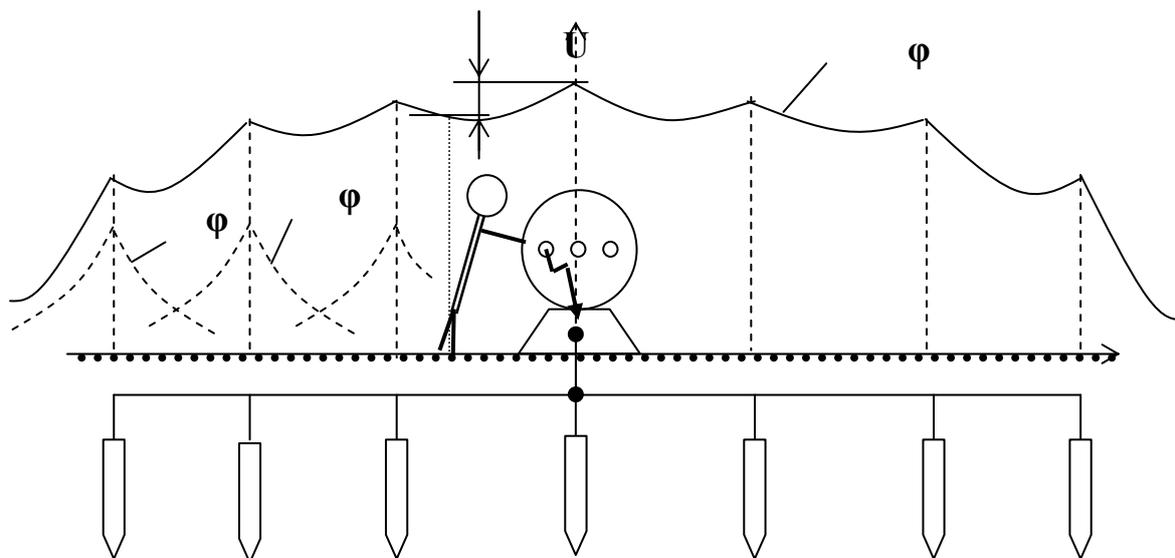


Рис. 21 – Случай контурного (распределенного) заземлителя

Алюминиевые оболочки кабелей и алюминиевые проводники не допускается использовать в качестве естественных заземлителей.

В электрических распределительных устройствах высокого напряжения в качестве естественного заземлителя используется заземление опор отходящих воздушных линий с грозозащитными тросами при условии, что тросы не изолированы от опор.

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.

Соединения заземляющих проводников между собой, а также заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования – сваркой или с помощью болтов.

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 (ССБТ ГОСТ 12.1.030–81):

- 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.

Для осуществления эффективной защиты величина сопротивления защитного заземления не должна превышать значений, при которых напряжение прикосновения или шаговое напряжение достигают опасных величин (табл. 11).

Таблица 11

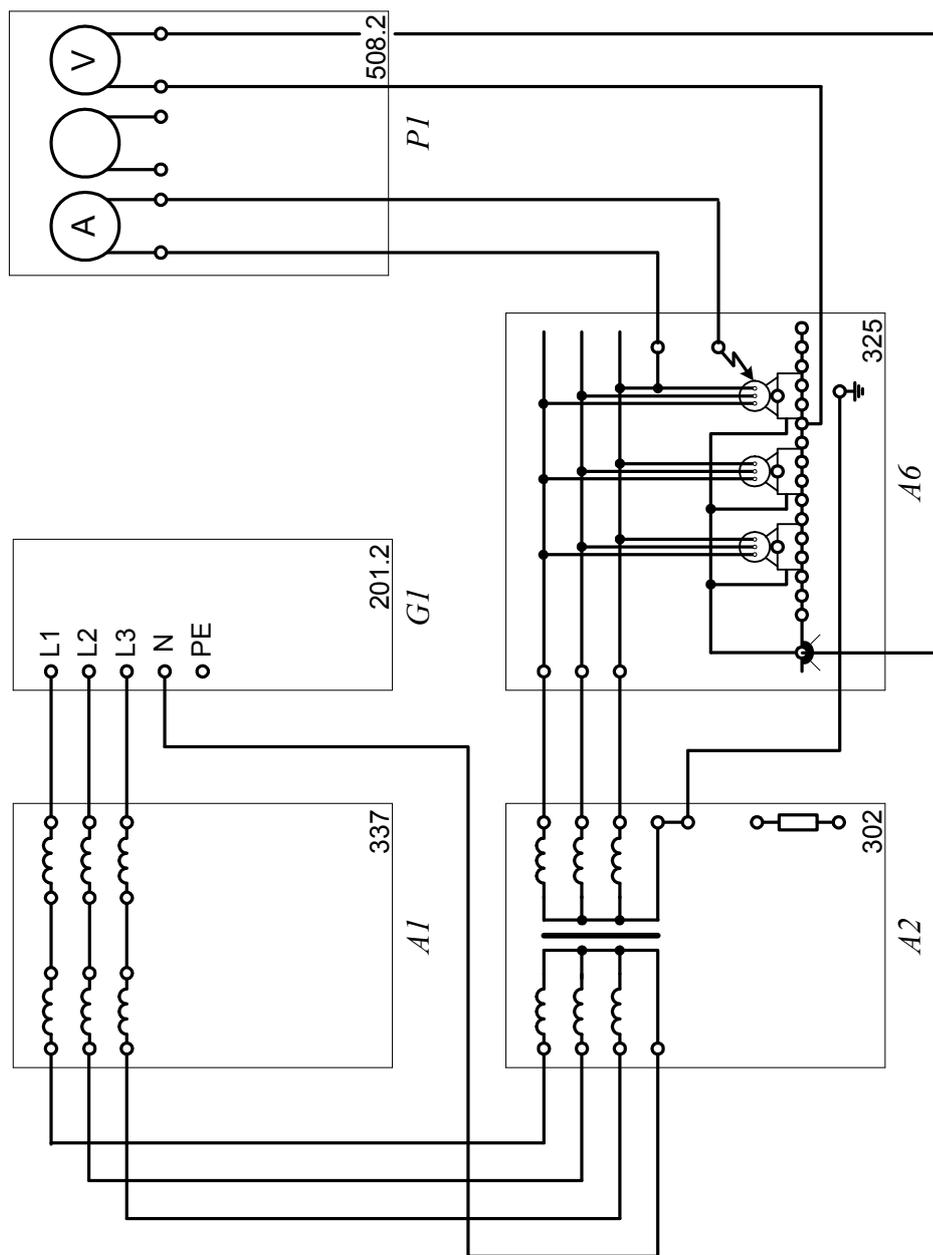
**Максимально допустимые значения сопротивления защитного заземления в зависимости от характеристик электрических сетей**

Допустимое сопротивление заземляющего устройства R, Ом	Характеристика электроустановок
Электроустановки напряжением до 1000 В (нейтраль изолирована)	
4	Для электроустановок мощностью источника более 100 кВА
10	Для электроустановок при мощности генераторов и трансформаторов до 100 кВА
125/I <sub>з</sub> , но не более 10 (I <sub>з</sub> расчетный ток замыкания на землю, А)	Если заземляющее устройство является общим для электроустановок напряжением до 1000 В и выше 1000 В
Электроустановки напряжением выше 1000 В	
250/I <sub>з</sub> , но не более 10	Если заземляющее устройство используется в сети с изолированной нейтралью
0,5	Если заземляющее устройство используется в сети с эффективно заземленной нейтралью

**Перечень оборудования**

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A6	Модель заземлителя с полусферическим электродом	325
	Модель заземлителя с вертикальным трубчатым электродом	326
	Модель заземлителя с протяженным трубчатым электродом на поверхности	327
P1	Блок мультиметров	508.2

Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

Первоначально в эксперименте используется, например, модель А6 заземлителя с полусферическим электродом (код 325). Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо убедиться в том, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1.
- Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
- Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
- При заданных сопротивлениях грунта  $\rho$  модели заземлителя А6, снимаются с помощью вольтметра блока P1 зависимости от расстояния  $x$ : потенциала основания электрооборудования  $\varphi_{осн} = f(x)$  (вольтметр включается между гнездом «L» и гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ), напряжения прикосновения  $U_{пр} = f(x)$  (вольтметр включается между гнездом «0» и гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ), шагового напряжения  $U_{ш} = f(x)$  (вольтметр включается между соседними гнездами, соответствующими расстоянию  $x$ ).
- Ток стекания в землю контролируется с помощью амперметра блока P1. Он не должен превышать **0,5 А!**
- Источник G1 отключается, и производится замена в электрической схеме: модель А6 заземлителя с полусферическим электродом (код 325) на модель А6 заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326).
- Включается источник G1 и вновь снимаются вышеупомянутые зависимости.
- Еще раз отключается источник G1 и производится замена в электрической схеме: модель А6 заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326) на модель А6 заземлителя с протяженным трубчатым электродом на поверхности (код 327).
- Вновь включается источник G1 и в третий раз снимаются зависимости  $\varphi_{осн} = f(x)$ ,  $U_{пр} = f(x)$ ,  $U_{ш} = f(x)$ .
- По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.
- Полученные зависимости используются для формулирования выводов о влиянии на электробезопасность типа заземлителя, удельного

сопротивления грунта, в котором он заложен, и расстояния от заземлителя до места установки защищаемого электрооборудования.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА**

## **Цель работы**

1. Изучить основные факторы, влияющие на тяжесть поражения человека электрическим током.
2. Исследовать изменение сопротивления тела человека в зависимости от площади контакта при различной частоте электрического тока.

## **Общие сведения**

Проходя через организм, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое действия.

Термическое действие выражается в ожогах отдельных участков тела, нагреве кровеносных сосудов, нервов и других тканей.

Электролитическое действие выражается в разложении крови и других органических жидкостей, что вызывает значительные нарушения их физико-химических составов.

Биологическое действие выражается в возбуждении живых тканей организма (что сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц), а также в нарушении внутренних биоэлектрических процессов, протекающих в нормально действующем организме и теснейшим образом связанных с его жизненными функциями. В результате могут возникнуть различные нарушения в организме, в том числе нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения. Раздражающее действие тока на ткани организма может быть прямым, когда ток проходит непосредственно по этим тканям, и рефлекторным, т.е. через центральную нервную систему, когда путь тока лежит вне этих тканей.

Исход воздействия тока зависит от множества факторов, в том числе от значения и длительности протекания через тело человека тока, рода и частоты тока и индивидуальных свойств человека. Электрическое сопротивление тела человека и приложенное к нему напряжение влияют на исход поражения, но лишь постольку, поскольку они определяют значение тока, проходящего через тело человека.

Электрическое сопротивление тела человека складывается из сопротивления кожи и сопротивления внутренних тканей.

Кожа, вернее ее верхний слой, называемый эпидермисом, имеющий толщину до 0,2 мм и состоящий в основном из мертвых ороговевших клеток, обладает большим сопротивлением, которое и определяет общее сопротивление тела человека. Сопротивление нижних слоев кожи и внутренних тканей человека незначительно. При сухой чистой и неповрежденной коже сопротивление тела человека колеблется в пределах 2 кОм – 2 МОм. При увлажнении и загрязнении кожи, а также при повреждении кожи (под контактами) сопротивление тела оказывается наименьшим – около 500 Ом, т. е. доходит до значения, равного сопротивлению внутренних тканей тела. При расчетах сопротивление тела человека принимается равным 1 кОм.

Значение тока, протекающего через тело человека, является главным фактором, от которого зависит исход поражения: чем больше ток, тем опаснее его действие. Человек начинает ощущать протекающий через него ток промышленной частоты (50 Гц) относительно малого значения: 0,6–1,5 мА. Этот ток называется пороговым ощутимым током.

Ток 10–15 мА (при 50 Гц) вызывает сильные и весьма болезненные судороги мышц рук, которые человек преодолеть не в состоянии, т. е. он не может разжать руку, которой касается токоведущей части, не может отбросить провод от себя и оказывается как бы прикованным к токоведущей части. Такой ток называется пороговым неотпускающим.

При 25–50 мА действие тока распространяется на мышцы грудной клетки, что приводит к затруднению и даже прекращению дыхания. При длительном воздействии этого тока – в течение нескольких минут – может наступить смерть вследствие прекращения работы легких.

При 100 мА ток оказывает непосредственное влияние также и на мышцу сердца; при длительности протекания более 0,5 секунд ток может вызвать остановку или фибрилляцию сердца, т.е. быстрые хаотические и разновременные сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл), при которых сердце перестает работать как насос. В результате в организме прекращается кровообращение и наступает смерть. Этот ток называется фибрилляционным.

Длительность протекания тока через тело человека влияет на исход поражения вследствие того, что со временем резко повышается ток за счет уменьшения сопротивления тела и накапливаются отрицательные последствия воздействия тока на организм.

Род и частота тока в значительной степени определяют исход поражения. Наиболее опасным является переменный ток с частотой 20–100 Гц. При частоте меньше 20 или больше 100 Гц опасность поражения током заметно снижается.

Токи частотой свыше 0,5 МГц не оказывают раздражающего действия на ткани и поэтому не вызывают электрического удара. Однако они могут вызвать термические ожоги.

При постоянном токе пороговый ощутимый ток повышается до 6–7 мА, пороговый неотпускающий ток – до 50–70 мА, а фибрилляционный при длительности воздействия более 0,5 секунд – до 300 мА.

Индивидуальные свойства человека – состояние здоровья, подготовленность к работе в электрической установке и другие факторы – также имеют значение для исхода поражения. Поэтому обслуживание электроустановок поручается лицам, прошедшим медицинский осмотр и специальное обучение.

### Перечень аппаратуры

Наименование	Тип
Устройство для исследования сопротивления тела человека	341

### Порядок проведения работы

1. С помощью сетевого шнура устройство для исследования сопротивления тела человека (код 341) подключается к трехпроводной электрической сети 220 В.
2. Оперирова кнопками на поле «ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ» по индикатору выставляются требуемые напряжение  $U$  и частота  $f$ , например, 6,0 В и 15 кГц.
3. Ладони рук порознь прикладываются к двум электродам с площадью контактной поверхности  $S=1250 \text{ мм}^2$  и с верхнего индикатора считывается величина тока  $I_h$ , протекающего через тело человека.
4. Затем ладони рук порознь прикладываются к двум электродам с площадью контактной поверхности  $S=2500 \text{ мм}^2$  и с верхнего индикатора считывается величина тока  $I_h$ , протекающего через тело человека.
5. Рассчитывается электрическое сопротивление тела человека  $Z_h = U/I_h$  при различной площади контактных поверхностей. На основании расчетов делается вывод о влиянии площади контактной поверхности на сопротивление человека.
6. Снимается зависимость силы тока через тело человека от частоты тока,  $I_h(f)$ .

7. Рассчитывается зависимость электрического сопротивления тела человека от частоты  $Z_h(f) = U / I_h(f)$ .
8. По завершении эксперимента питание устройства для исследования сопротивления тела человека (код 341) отключается.

### **Требования к отчету**

- По п.п. 2–4 необходимо отразить величины тока  $I_h$  протекающего через человека при различных величинах напряжения  $U$  и частоты  $f$ , в зависимости от величины контактной поверхности  $S$ .
- По п. 5 необходимо рассчитать электрическое сопротивление тела человека  $Z_h = U/I_h$  во всех случаях.
- По п. 6 необходимо построить графические зависимости протекающего через тело человека тока от частоты  $I_h(f)$ , при различной величине контактной поверхности  $S$ .
- Необходимо сделать выводы по всем выполненным экспериментам.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАНУЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## Цель работы

Изучить на лабораторном стенде принцип работы защитного зануления, назначение элементов зануления (зануления нейтрали источника питания, соединения корпуса электроустановки с нулевым проводником, повторного заземления нулевого проводника)

## Общие сведения

*Зануление* – это преднамеренное электрическое соединение открытых проводящих частей электроустановок с глухозаземленной нейтральной точкой генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной точкой источника в сетях постоянного тока, выполняемое в целях электробезопасности.

Для соединения открытых проводящих частей потребителя электроэнергии с глухозаземленной нейтральной точкой источника используется нулевой защитный проводник.

Нулевым защитным проводником (**РЕ** – проводник в системе **TN – S**) называется проводник, соединяющий зануляемые части (открытые проводящие части) с глухозаземленной нейтральной точкой источника питания трехфазного тока или с заземленным выводом источника питания однофазного тока, или с заземленной средней точкой источника питания в сетях постоянного тока.

Нулевой защитный проводник следует отличать от нулевого рабочего и **PEN** – проводников.

Нулевой рабочий проводник (**N** – проводник в системе **TN – S**) – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, предназначенный для питания электроприемников соединенный с глухозаземленной нейтральной точкой генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в сетях постоянного тока.

Совмещенный (**PEN** – проводник в системе **TN – C**) нулевой защитный и нулевой рабочий проводник – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, совмещающий функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника.

Зануление необходимо для обеспечения защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении за счет снижения напряжения корпуса относительно земли и быстрого отключения электроустановки от сети.

Область применения зануления:

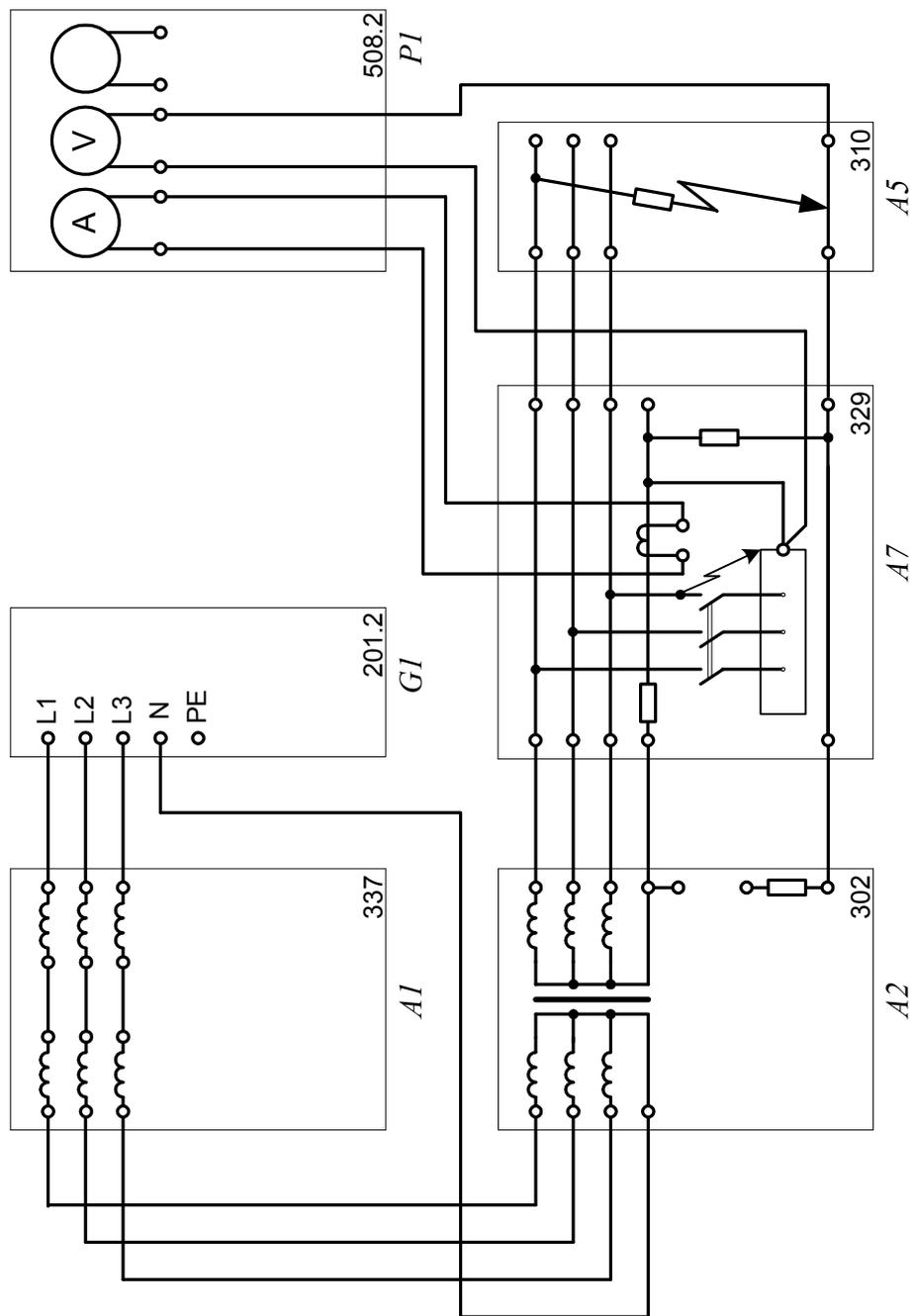
- электроустановки напряжением до 1 кВ в трехфазных сетях переменного тока с заземленной нейтралью (система TN – S; обычно это сети 220/127, 380/220, 660/380 В);
- электроустановки напряжением до 1 кВ в однофазных сетях переменного тока с заземленным выводом;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в сетях постоянного тока с заземленной средней точкой источника.

*Принцип действия зануления.* При замыкании фазного провода на зануленный корпус электропотребителя образуется цепь тока однофазного короткого замыкания (то есть замыкания между фазным и нулевым защитным проводниками). Ток однофазного короткого замыкания вызывает срабатывание максимальной токовой защиты, в результате чего происходит отключение поврежденной электроустановки от питающей сети. Кроме того, до срабатывания максимальной токовой защиты происходит снижение напряжения поврежденного корпуса относительно земли, что связано с защитным действием повторного заземления нулевого защитного проводника и перераспределением напряжений в сети при протекании тока короткого замыкания.

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A5	Модель замыкания на землю	310
A7	Модель зануления	329
P1	Блок мультиметров	508.2

Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

1. Перед началом работы необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Гнезда защитного заземления «» устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
4. В модели А5 сопротивление замыкания на землю устанавливается равным бесконечности:  $R_{\text{зам}} = \infty$ .
5. Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
6. Режим глухозаземленной (изолированной) нейтрали питающей электрической сети моделируется установкой (отсутствием) переключки между гнездом нейтральной точки трансформатора и гнездом сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора А2.
7. Замыкание фазы на корпус электрооборудования моделируется установкой выключателя S в положение «ВКЛ.».
8. Ток короткого замыкания измеряется с помощью амперметра блока мультиметров P1.
9. При величинах сопротивления цепи короткого замыкания  $R_N = 1, 2, 3$  Ом и возникновении короткого замыкания фазы на корпус электрооборудования (выключатель S включен) защита отключает электрооборудование от сети, что проявляется в отсутствии свечения светодиодов в фазах подходящих к нему проводов.
10. При величинах сопротивления цепи короткого замыкания  $R_N = 5, 10, 15, 20$  Ом и возникновении короткого замыкания фазы на корпус электрооборудования (выключатель S включен) защита не отключает электрооборудование от сети, что проявляется в наличии свечения светодиодов в фазах подходящих к нему проводов.
11. Наличие повторного заземления моделируется установкой любого его значимого сопротивления.
12. Напряжение на корпусе электрооборудования измеряется с помощью вольтметра блока мультиметров P1.
13. Сопротивление замыкания на землю « $R_{\text{зам}} \neq \infty$ » устанавливается только при моделировании режима изолированной нейтрали питающей электрической сети.
14. По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

### Требования к отчету

1. По п. 9 необходимо отразить результат замыкания на землю через  $R_N = 1, 2, 3$  Ом и срабатывания защиты.
2. По п. 10. необходимо описать действие защитного зануления при величинах сопротивления цепи короткого замыкания  $R_N = 5, 10, 15, 20$  Ом, акцентируя внимание на проявление действия защитного зануления.
3. По п. 11 необходимо описать влияние на действие зануления сопротивления повторного заземления нулевого проводника.
4. Необходимо сделать выводы по всем выполненным экспериментам согласно указаниям по проведению эксперимента.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ**

## **Цель работы**

Научиться контролировать неисправность изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью.

## **Общие сведения**

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер. Они регламентированы действующими правилами устройства электроустановок (ПУЭ, 2001).

Конструкция, исполнение, способ установки, класс и характеристики изоляции применяемых машин, аппаратов, приборов и прочего электрооборудования, а также кабелей и проводов должны соответствовать параметрам сети или электроустановки, режимам работы, условиям окружающей среды и требованиям соответствующих глав ПУЭ.

Изоляция токоведущих частей (защитное изолирование) – способ защиты от прикосновения к токоведущим частям. Принцип его действия основан на покрытии токоведущих частей изоляционным материалом. Изоляция токопроводящих частей – одна из основных мер электробезопасности.

В сетях переменного тока выше 1 кВ с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью, в сетях переменного тока до 1 кВ с изолированной нейтралью и в сетях постоянного тока с изолированными полюсами или с изолированной средней точкой, как правило, должен выполняться автоматический контроль изоляции, действующий на сигнал при снижении сопротивления изоляции одной из фаз (или полюса) ниже заданного значения, с последующим контролем асимметрии напряжения при помощи показывающего прибора (с переключением).

Допускается осуществлять контроль изоляции путем периодических измерений напряжений с целью визуального контроля асимметрии напряжения.

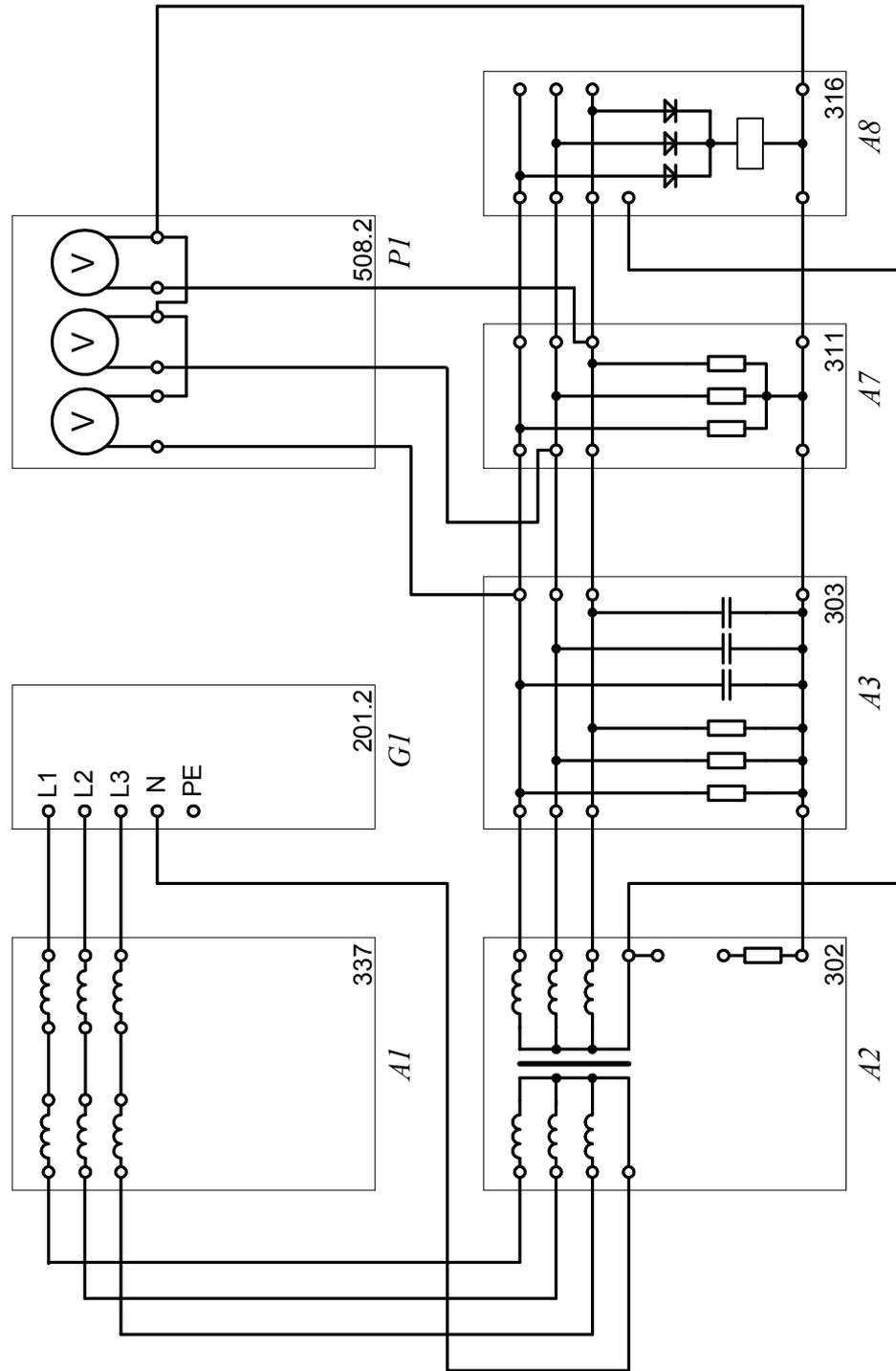
Согласно ПУЭ сопротивление изоляции токопроводящих частей электрических установок относительно земли должно быть не менее 0,5–10 МОм. Различают рабочую, двойную и усиленную рабочую изоляцию.

Рабочей называется изоляция, обеспечивающая нормальную работу электрической установки и защиту персонала от поражения электрическим током. Двойная изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной, используется в тех случаях, когда требуется обеспечить повышенную электробезопасность оборудования (например, ручного электроинструмента, бытовых электрических приборов и т. д.). Сопротивление двойной изоляции должно быть не менее 5 МОм, что в 10 раз превышает сопротивление обычной рабочей. В ряде случаев рабочую изоляцию выполняют настолько надежно, что ее электросопротивление составляет не менее 5 МОм и потому она обеспечивает такую же защиту от поражения током, как и двойная изоляция. Такую изоляцию называют усиленной рабочей изоляцией.

### **Перечень аппаратуры, используемой в лабораторной работе**

<b>Обозначение</b>	<b>Наименование</b>	<b>Тип</b>
G1	Трхфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A3	Модель участка электрической сети	303
A7	Модель сопротивления изоляции	311
A8	Устройство контроля изоляции	316
P1	Блок мультиметров	508.2

# Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

- Перед началом работы необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1.
- Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
- Емкости фаз модели А3 устанавливаются равными нулю  $C_A = C_B = C_C = 0$ .
- Устанавливаются желаемые сопротивления  $R_A, R_B, R_C$  изоляции фаз модели А3 и сопротивления  $R$  изоляции модели А7.
- Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
- С помощью вольтметров блока мультиметров P1 измеряются напряжения фаз электрической сети. По ним судят о соотношении сопротивлений изоляции этих фаз.
- Величину, равную параллельно соединенным сопротивлениям изоляции всех трех фаз, считывают с индикатора устройства контроля изоляции.
- По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

## Требования к оформлению отчета

В отчет по лабораторной работе вносятся:

1. Наименование и цель работы.
  2. Применяемые приборы и оборудование.
  3. Заполненные таблицы с необходимыми расчетными формулами.
  4. Общие выводы по результатам сделанной работы.
- Результаты экспериментов заносятся в табл. 12.

## Экспериментальная таблица

Фазы сети	Сопротивление изоляции	Сила тока, А	Напряжение, В
$R_A$			
$R_B$			
$R_C$			

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ**

### **Цель работы**

Произвести измерение тока стекающего в землю через заземлитель и напряжения между ним и потенциальным электродом на различном удалении от заземлителя.

Сделать вывод о эффективности защитного заземления.

### **Общие сведения**

Все случаи поражения человека током в результате электрического удара возможны лишь при замыкании электрической цепи через тело человека или, иначе говоря, при прикосновении человека не менее чем к двум точкам цепи, между которыми существует некоторое напряжение.

Опасность такого прикосновения, оцениваемая значением тока, проходящего через тело человека, или же напряжением прикосновения, зависит от ряда факторов: схемы замыкания цепи тока через тело человека, напряжение сети, схемой самой сети, режима ее нейтрали (т. е. заземлена или изолирована нейтраль), степени изоляции токоведущих частей от земли, а также от значений емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Следовательно, указанная опасность не является однозначной: в одних случаях замыкание цепи тока через тело человека будет сопровождаться прохождением через него малых токов и окажется не опасным, в других – токи могут достигать больших значений, способных вызвать смертельное поражение человека.

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 и т. п.).

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 ( $1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$  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 в комплексной форме, проходящего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью (рис. 22), определяется соотношением:

$$\bar{I}_ч = \bar{U}_ф / (R_ч + R_{об} + R_п + \bar{Z}_н / 3), \quad (39)$$

где  $\bar{I}_ч$ ,  $\bar{U}_ф$ ,  $\bar{Z}_н$  – комплексы тока, А, фазного напряжения, В и сопротивления изоляции одной фазы, Ом;  $R_ч$  – сопротивление тела человека, Ом;  $R_{об}$  – сопротивление обуви человека, Ом;  $R_п$  – сопротивление пола (основания), Ом.

При малом сопротивлении обуви, пола и изоляции проводов относительно земли этот ток может достигать опасных значений.

Для трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью проводимость изоляции фазных проводов относительно земли пренебрежимо мала по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, поэтому величина тока через тело человека практически не зависит от сопротивления изоляции и равна

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_3), \quad (40)$$

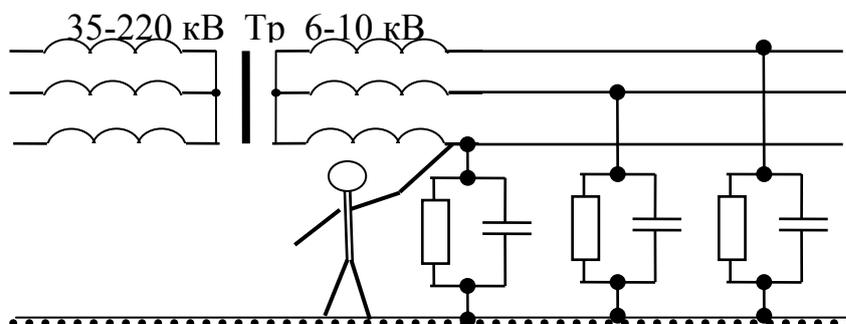


Рис. 22 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью

Наиболее неблагоприятный случай будет, когда человек прикоснувшийся к фазе имеет на ногах токопроводящую обувь – сырую или подбитую металлическими гвоздями и стоит непосредственно на сырой земле или на проводящем основании – на металлическом полу, на заземленной металлической конструкции, т. е. когда можно принять  $R_{\text{об}}=0$  и  $R_{\text{п}}=0$ . Сопротивление заземления нейтрали  $R_0$  обычно во много раз меньше сопротивления тела человека (как правило,  $R_0$  не превышает 10 Ом) и им можно пренебречь. При этих условиях величина тока через тело человека достигает опасной величины. Например, при  $R_{\text{ч}}=1000$  Ом (вполне вероятная величина) и  $R_3=4$  Ом  $I_{\text{ч}}=220/(1000+4)\approx 0,22$  А.

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.

Для искусственных заземлителей применяются обычно вертикальные и горизонтальные электроды, т.е. одиночные заземлители.

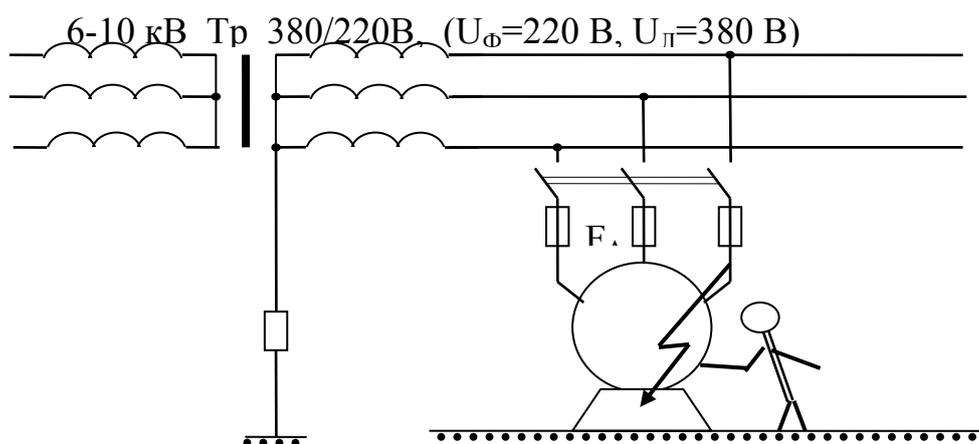


Рис. 23 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью

В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы диаметром 3–5 см и угловая сталь размером от 40×40 до 60×60 мм длиной 2,5–3 м, а также стальные прутки диаметром 10–12 мм и длиной до десяти метров.

Для соединения вертикальных электродов между собой и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяется полосовая сталь сечением не менее 4×12 мм или сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Для погружения в землю вертикальных электродов предварительно роют траншею глубиной 0,7–0,8 м, после чего их забивают и верхние концы соединяют стальной полосой с помощью сварки. В таких же траншеях прокладывают и горизонтальные электроды. Траншею засыпают землей, очищенной от строительного мусора, а затем тщательно утрамбовывают, что обеспечивает лучшую проводимость грунта, а следовательно, уменьшает расход металла на устройство заземления.

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. 24.

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  $U_{пр}$ , равное разности потенциалов руки и ног, в данном случае практически равно  $\varphi_3$ .

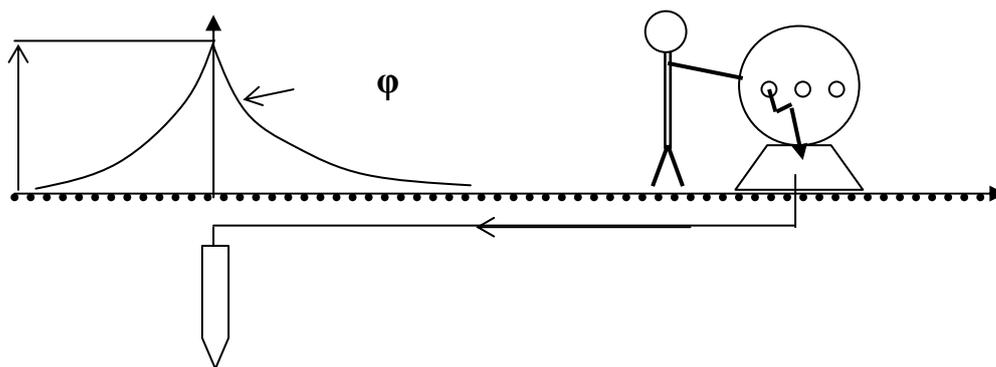


Рис. 24 – Выносной (сосредоточенный) заземлитель

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. 25. При этом распределения потенциалов отдельных заземлителей складываются, получается суммарное распределение потенциала  $\varphi_{3\Sigma}(X)$ . Таким образом, потенциалы в точках рабочей площадки по своей величине приближаются к потенциалу заземленного корпуса оборудования, поэтому напряжение прикосновения  $U_{пр}$  значительно уменьшается и составляет доли  $\varphi_3$ .

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.

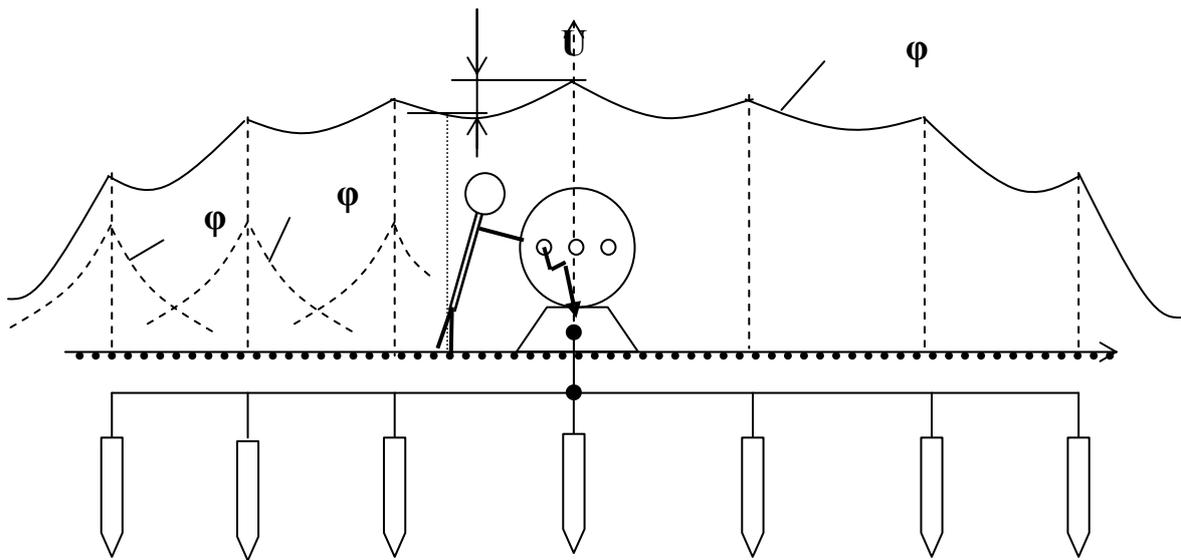


Рис. 25 – Случай контурного (распределенного) заземлителя

Алюминиевые оболочки кабелей и алюминиевые проводники не допускается использовать в качестве естественных заземлителей.

В электрических распределительных устройствах высокого напряжения в качестве естественного заземлителя используется заземление опор отходящих воздушных линий с грозозащитными тросами при условии, что тросы не изолированы от опор.

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.

Соединения заземляющих проводников между собой, а также заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования – сваркой или с помощью болтов.

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 (ССБТ ГОСТ 12.1.030–81):

- 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.

Для осуществления эффективной защиты величина сопротивления защитного заземления не должна превышать значений, при которых напряжение прикосновения или шаговое напряжение достигают опасных величин (табл. 13).

Таблица 13

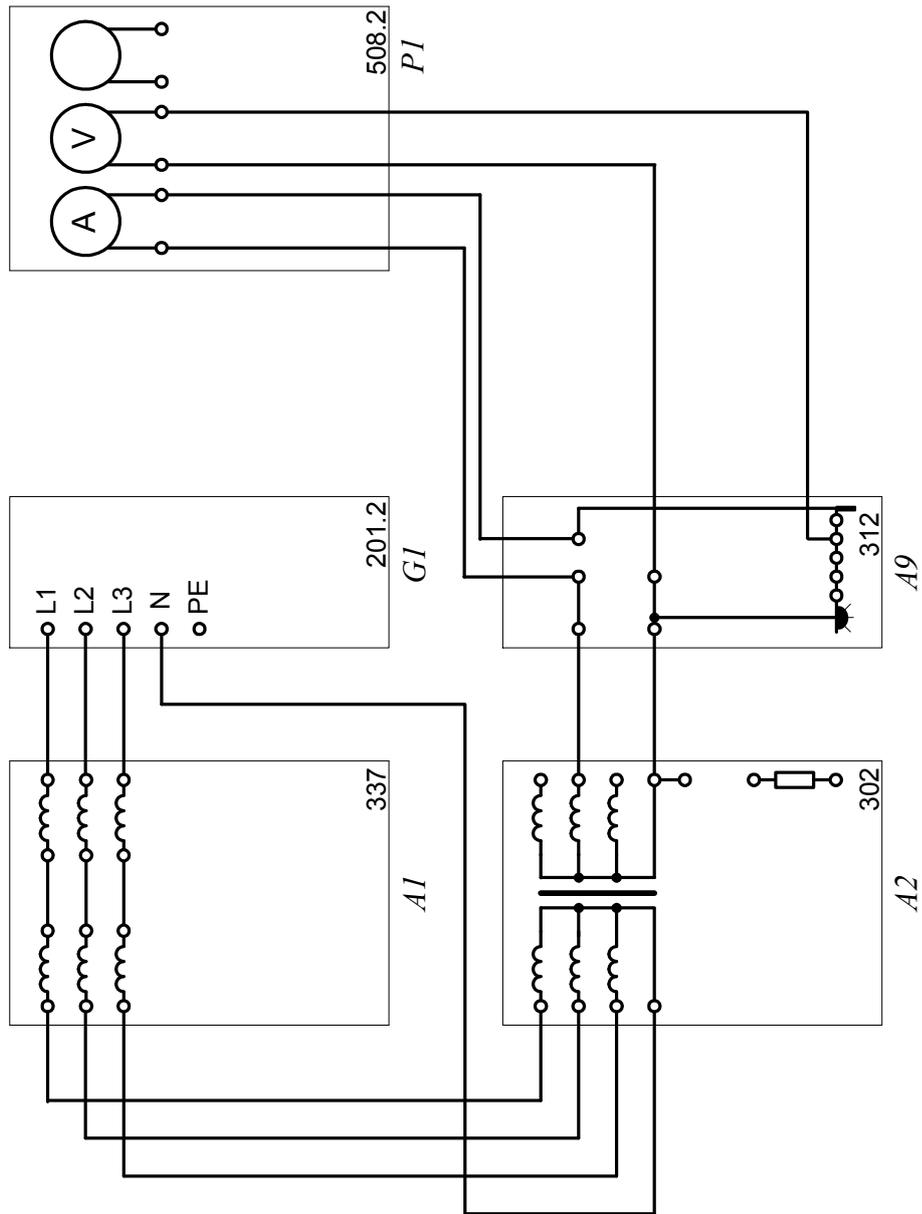
**Максимально допустимые значения сопротивления защитного заземления в зависимости от характеристик электрических сетей**

Допустимое сопротивление заземляющего устройства R, Ом	Характеристика электроустановок
Электроустановки напряжением до 1000 В (нейтраль изолирована)	
4	Для электроустановок мощностью источника более 100 кВА
10	Для электроустановок при мощности генераторов и трансформаторов до 100 кВА
125/I <sub>з</sub> , но не более 10 (I <sub>з</sub> расчетный ток замыкания на землю, А)	Если заземляющее устройство является общим для электроустановок напряжением до 1000 В и выше 1000 В
Электроустановки напряжением выше 1000 В	
250/I <sub>з</sub> , но не более 10	Если заземляющее устройство используется в сети с изолированной нейтралью
0,5	Если заземляющее устройство используется в сети с эффективно заземленной нейтралью

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A9	Модель измерения заземления	312
P1	Блок мультиметров	508.2

Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

- Необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1.
- Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
- Переключателем устанавливается желаемое удельное сопротивление грунта  $\rho$  в модели А9.
- Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
- С помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров P1 измеряется ток стекающий в землю через заземлитель и напряжение между ним и потенциальным электродом на различном удалении от заземлителя.
- Измеренные значения токов и напряжений используются для определения правильного расположения потенциального электрода относительно заземлителя и последующего расчета сопротивления заземления.
- По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

## Требования к отчёту по лабораторной работе

При проведении эксперимента с помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров P1 при измерении тока стекающего в землю через заземлитель и напряжения между ним и потенциальным электродом на различном удалении от заземлителя, результаты отразить в форме таблицы.

Необходимо сделать вывод о эффективности защитного заземления.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ/САМОЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

## **Цель работы**

Смоделировать и исследовать действие защитного заземления и самозаземления электрооборудования.

## **Общие сведения**

Все случаи поражения человека током в результате электрического удара возможны лишь при замыкании электрической цепи через тело человека или, иначе говоря, при прикосновении человека не менее чем к двум точкам цепи, между которыми существует некоторое напряжение.

Опасность такого прикосновения, оцениваемая значением тока, проходящего через тело человека, или же напряжением прикосновения, зависит от ряда факторов: схемы замыкания цепи тока через тело человека, напряжение сети, схемой самой сети, режима ее нейтрали (т. е. заземлена или изолирована нейтраль), степени изоляции токоведущих частей от земли, а также от значений емкости токоведущих частей относительно земли и т. п.

Следовательно, указанная опасность не является однозначной: в одних случаях замыкание цепи тока через тело человека будет сопровождаться прохождением через него малых токов и окажется не опасным, в других – токи могут достигать больших значений, способных вызвать смертельное поражение человека.

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 и т. п.).

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 ( $1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$  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 в комплексной форме, проходящего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью (рис. 26), определяется соотношением:

$$\bar{I}_ч = \bar{U}_ф / (R_ч + R_{об} + R_п + \bar{Z}_н / 3), \quad (41)$$

где  $\bar{I}_ч$ ,  $\bar{U}_ф$ ,  $\bar{Z}_н$  – комплексы тока, А, фазного напряжения, В и сопротивления изоляции одной фазы, Ом;  $R_ч$  – сопротивление тела человека, Ом;  $R_{об}$  – сопротивление обуви человека, Ом;  $R_п$  – сопротивление пола (основания), Ом.

При малом сопротивлении обуви, пола и изоляции проводов относительно земли этот ток может достигать опасных значений.

Для трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью проводимость изоляции фазных проводов относительно земли пренебрежимо мала по сравнению с проводимостью заземления нейтрали, поэтому величина тока через тело человека практически не зависит от сопротивления изоляции и равна

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{п}} + R_3), \quad (42)$$

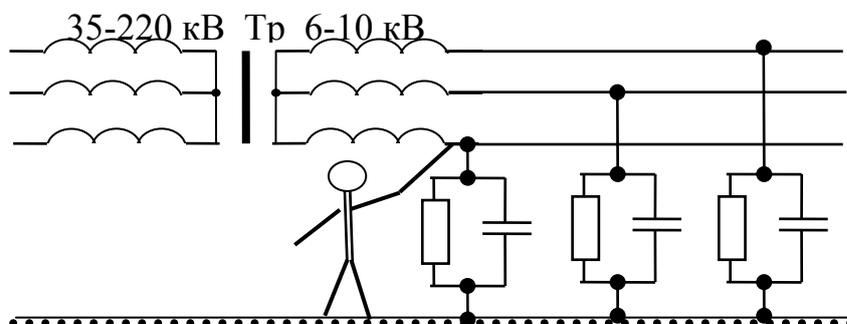


Рис.26 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью

Наиболее неблагоприятный случай будет, когда человек прикоснувшийся к фазе имеет на ногах токопроводящую обувь – сырую или подбитую металлическими гвоздями и стоит непосредственно на сырой земле или на проводящем основании – на металлическом полу, на заземленной металлической конструкции, т. е. когда можно принять  $R_{\text{об}}=0$  и  $R_{\text{п}}=0$ . Сопротивление заземления нейтрали  $R_0$  обычно во много раз меньше сопротивления тела человека (как правило,  $R_0$  не превышает 10 Ом) и им можно пренебречь. При этих условиях величина тока через тело человека достигает опасной величины. Например, при  $R_{\text{ч}}=1000$  Ом (вполне вероятная величина) и  $R_3=4$  Ом  $I_{\text{ч}}=220/(1000+4)\approx 0,22$  А.

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.

Для искусственных заземлителей применяются обычно вертикальные и горизонтальные электроды, т.е. одиночные заземлители.

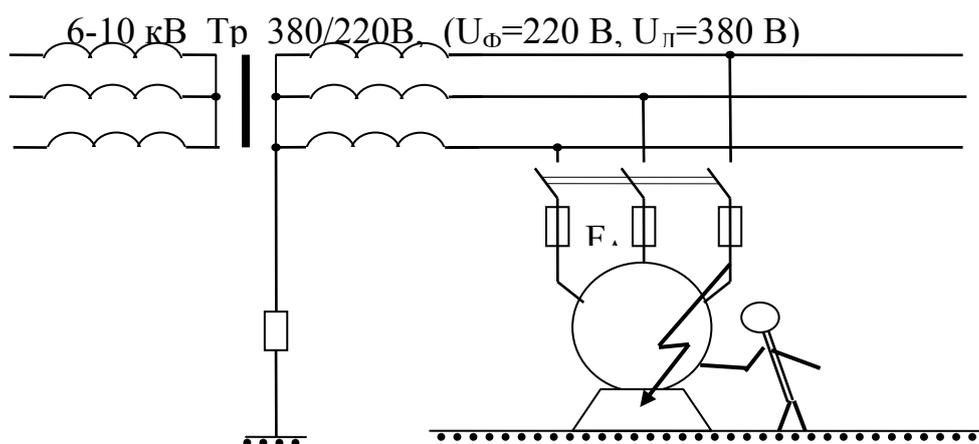


Рис.27 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью

В качестве вертикальных электродов используются стальные трубы диаметром 3–5 см и угловая сталь размером от 40×40 до 60×60 мм длиной 2,5–3 м, а также стальные прутки диаметром 10–12 мм и длиной до десяти метров.

Для соединения вертикальных электродов между собой и в качестве самостоятельного горизонтального электрода применяется полосовая сталь сечением не менее 4×12 мм или сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм.

Для погружения в землю вертикальных электродов предварительно роют траншею глубиной 0,7–0,8 м, после чего их забивают и верхние концы соединяют стальной полосой с помощью сварки. В таких же траншеях прокладывают и горизонтальные электроды. Траншею засыпают землей, очищенной от строительного мусора, а затем тщательно утрамбовывают, что обеспечивает лучшую проводимость грунта, а следовательно, уменьшает расход металла на устройство заземления.

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. 28.

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  $\varphi_3$ .

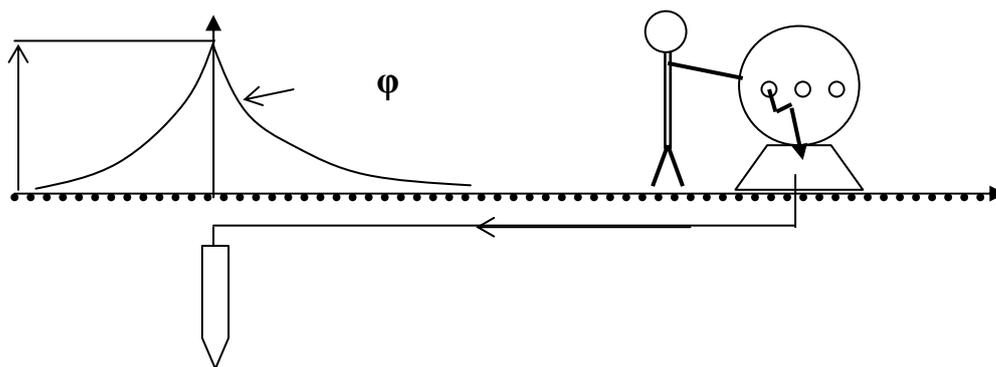


Рис. 28 – Выносной (сосредоточенный) заземлитель

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. 29. При этом распределения потенциалов отдельных заземлителей складываются, получается суммарное распределение потенциала  $\varphi_{3\Sigma}(X)$ . 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  $\varphi_3$ .

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.

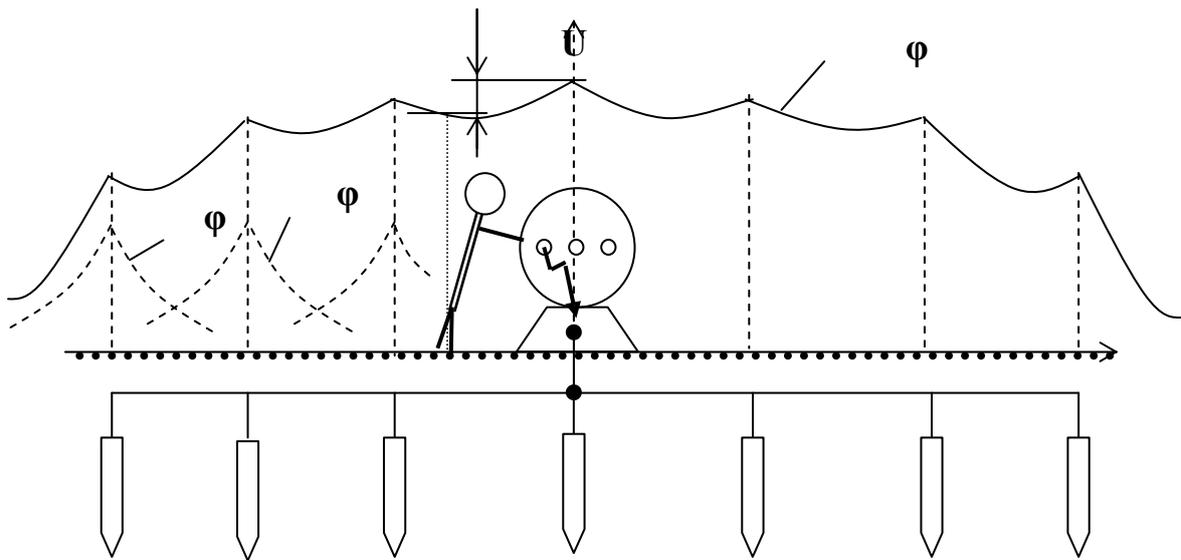


Рис. 29 – Случай контурного (распределенного) заземлителя

Алюминиевые оболочки кабелей и алюминиевые проводники не допускается использовать в качестве естественных заземлителей.

В электрических распределительных устройствах высокого напряжения в качестве естественного заземлителя используется заземление опор отходящих воздушных линий с грозозащитными тросами при условии, что тросы не изолированы от опор.

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.

Соединения заземляющих проводников между собой, а также заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования – сваркой или с помощью болтов.

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 (ССБТ ГОСТ 12.1.030–81):

- 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.

Для осуществления эффективной защиты величина сопротивления защитного заземления не должна превышать значений, при которых напряжение прикосновения или шаговое напряжение достигают опасных величин (табл. 14).

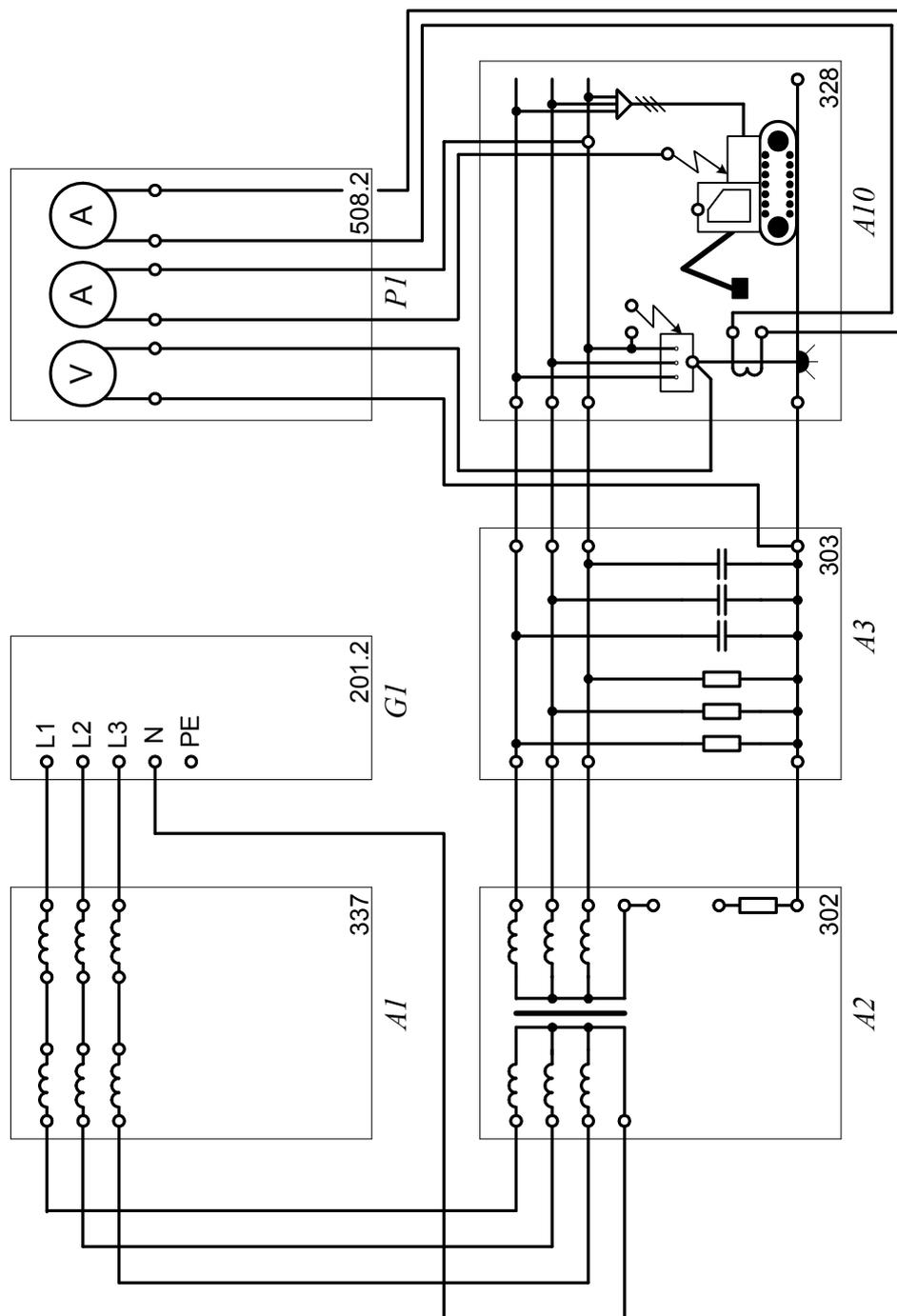
**Максимально допустимые значения сопротивления защитного заземления в зависимости от характеристик электрических сетей**

Допустимое сопротивление заземляющего устройства R, Ом	Характеристика электроустановок
Электроустановки напряжением до 1000 В (нейтраль изолирована)	
4	Для электроустановок мощностью источника более 100 кВА
10	Для электроустановок при мощности генераторов и трансформаторов до 100 кВА
125/I <sub>з</sub> , но не более 10 (I <sub>з</sub> расчетный ток замыкания на землю, А)	Если заземляющее устройство является общим для электроустановок напряжением до 1000 В и выше 1000 В
Электроустановки напряжением выше 1000 В	
250/I <sub>з</sub> , но не более 10	Если заземляющее устройство используется в сети с изолированной нейтралью
0,5	Если заземляющее устройство используется в сети с эффективно заземленной нейтралью

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A3	Модель участка электрической сети	303
A10	Модель защитного заземления/самозаземления	328
P1	Блок мультиметров	508.2

Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

- Необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Гнезда защитного заземления " $\oplus$ " устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом "РЕ" источника G1.
- Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
- Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
- Режим глухозаземленной (изолированной) нейтрали питающей электрической сети моделируется установкой (отсутствием) перемычки между гнездом нейтральной точки трансформатора и гнездом сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора A2.
- Замыкание фазы на корпус электрооборудования моделируется установкой перемычки между гнездами 3 и 4 модели A10.
- Ток короткого замыкания измеряется с помощью амперметров блока мультиметров P1, включенных между гнездами 5, 6 и 7, 8 модели A10.
- Напряжения на корпусах электрооборудования и экскаватора измеряются с помощью вольтметра, включенного его между гнездами 1, Е и 2, Е модели A10.
- Грунт, в котором проложен заземлитель, характеризуется удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$ , а грунт, на котором стоит экскаватор, – удельным электрическим сопротивлением  $\rho_2$ .
- По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

### **Цель работы**

1. Получить общее представление о защитном отключении.
2. Изучение защитного отключения электрической сети с различным режимом нейтрали.

### **Общие сведения**

Защитное отключение – быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током.

Такая опасность может возникнуть при замыкании фазы на корпус электрооборудования; при снижении сопротивления изоляции фаз относительно земли ниже определенного предела; появлении в сети более высокого напряжения; прикосновении человека к токоведущей части, находящейся под напряжением. В этих случаях в сети происходит изменение некоторых электрических параметров: например, могут измениться напряжение корпуса относительно земли, напряжение фаз относительно земли, напряжение нулевой последовательности и др. Любой из этих параметров, а точнее говоря – изменение его до определенного предела, при котором возникает опасность поражения человека током, может служить импульсом, вызывающим срабатывание защитно-отключающего устройства, т. е. автоматическое отключение опасного участка сети.

Прибор защитного отключения – совокупность отдельных элементов, которые реагируют на изменение какого-либо параметра электрической сети и дают сигнал на отключение автоматического выключателя. Этими элементами являются:

- Датчик – устройство, воспринимающее изменение параметра и преобразующее его в соответствующий сигнал (обычно датчиками служат реле соответствующего типа);
- Усилитель, предназначенный для усиления сигнала датчика, если он оказывается недостаточно мощным;
- Цепи контроля, служащие для периодической проверки исправности схемы защитно-отключающего устройства;

- Вспомогательные элементы – сигнальные лампы, измерительные приборы, характеризующие состояние установки, и т. п.

Автоматический выключатель – устройство, служащее для включения и отключения цепей, находящихся под нагрузкой, при коротких замыканиях. Он должен отключать цепь автоматически при поступлении сигнала от прибора защитного отключения.

Устройство защитного отключения в зависимости от параметра, на который оно реагирует, можно отнести к тому или иному типу, в том числе к типам устройств, реагирующих на напряжение корпуса относительно земли, ток замыкания на землю, напряжение фазы относительно земли, напряжение нулевой последовательности, ток нулевой последовательности, оперативный ток и др.

Назначение защитного отключения заключается в том, чтобы одним прибором осуществлять совокупность защиты либо некоторые из следующих ее видов:

- от однофазных замыканий на землю или на элементы эл. оборудования, нормально изолированные от напряжения;
- от не полных замыканий, когда снижение изоляции одной из фаз создает опасность поражения человека;
- от поражения при прикосновении человека к одной из фаз эл. оборудования, если прикосновение произошло в зоне действия защиты прибора.

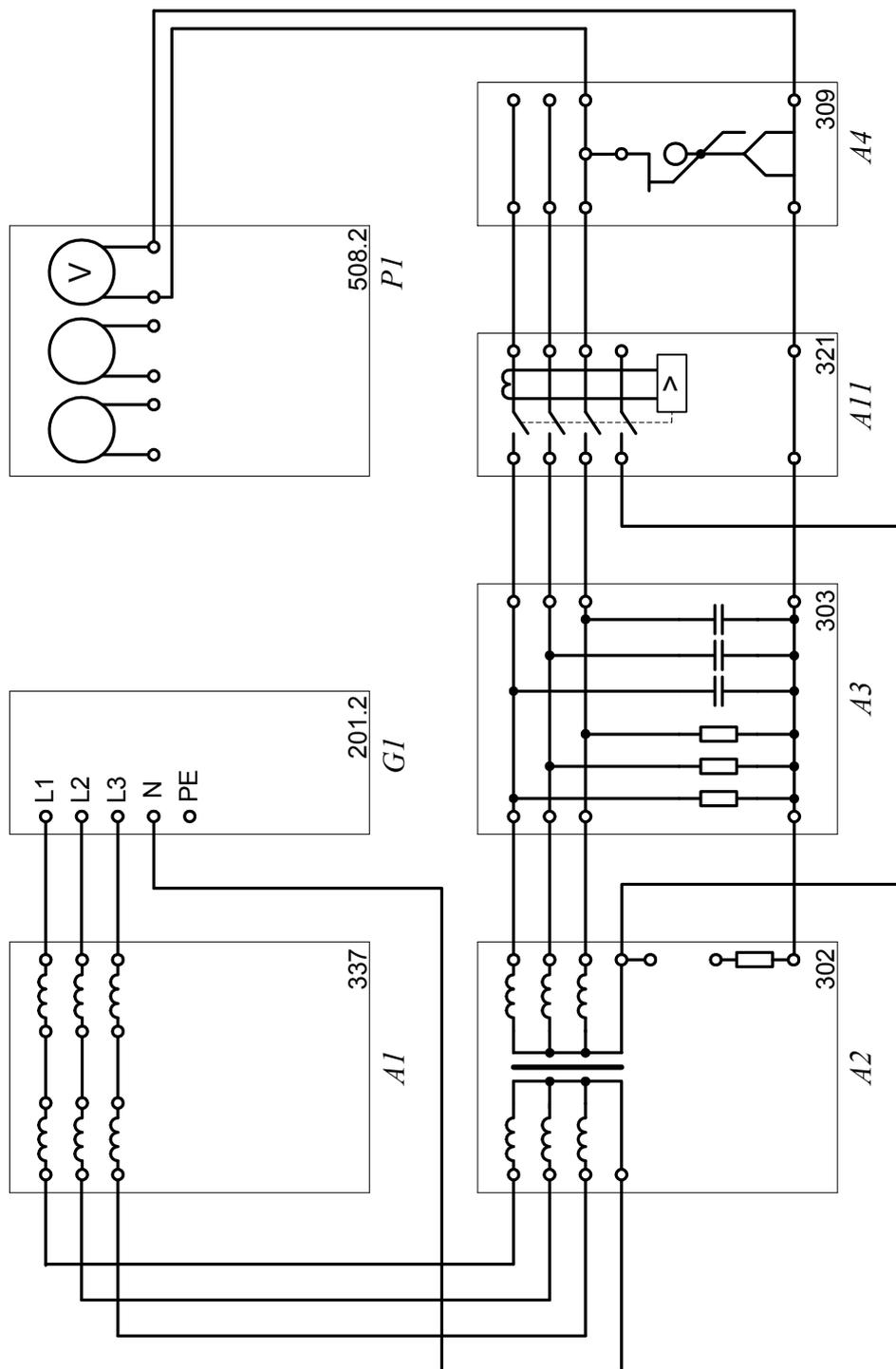
УЗО применяют в электроустановках до 1 кВ:

- в передвижных эл. установках с изолированной нейтралью. (особенно если затруднено создание заземляющего устройства. Может применяться как в виде самостоятельной защиты, так и в сочетании с заземлением);
- в стационарных электроустановках с изолированной нейтралью для защиты ручных электрических машин в качестве единственной защиты, и в дополнение к другим;
- в условиях повышенной опасности поражения электрическим током и взрывоопасности в стационарных и передвижных электроустановках с различными режимами нейтрали;
- в стационарных электроустановках с глухозаземленной нейтралью на отдельных удаленных потребителях электрической энергии и потребителя большой номинальной мощности, на которых защита занулением не достаточно эффективна.

## Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип
G1	Трехфазный источник питания	201.2
A1	Блок линейных дросселей	337
A2	Трехфазный трансформатор	302
A3	Модель участка электрической сети	303
A4	Модель человека	309
A11	Устройство защитного отключения	321
P1	Блок мультиметров	508.2

Электрическая схема соединений



## Порядок проведения работы

1. Перед началом работы необходимо убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Гнезда защитного заземления « $\oplus$ » устройств, используемых в эксперименте, соединяются с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Аппаратура соединяется в соответствии с электрической схемой.
4. Включается источник G1 и питание блока мультиметров P1.
5. Режим глухозаземленной (изолированной) нейтрали питающей электрической сети моделируется установкой (отсутствием) переключки между гнездом нейтральной точки трансформатора и гнездом сопротивления заземлителя  $R_0$  в блоке трехфазного трансформатора A2.
6. При проведении эксперимента в сети с изолированной нейтралью сопротивления  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  изоляции фаз модели A3 обязательно должны иметь значимые величины.
7. Желаемые значения сопротивлений обуви человека и пола, на котором он стоит, устанавливаются на модели человека A4.
8. Временная и токовая уставка срабатывания устройства защитного отключения A11 устанавливается с помощью кнопок «<» и «>» на его лицевой панели.
9. Включение устройства защитного отключения A11 производится нажатием кнопки «ВКЛ.» на его лицевой панели.
10. На верхнем индикаторе устройства защитного отключения A11 можно наблюдать текущее значение тока утечки через человека.
11. Если после включения устройство защитного отключения A11 отключилось, то на его верхнем индикаторе высветится значение тока утечки, при котором произошло это отключение. Произведение этого значения тока утечки и времени срабатывания (уставки по времени) устройства защитного отключения используется для оценки эффективности последнего.
12. Напряжение фазы, которой касается человек, измеряется с помощью вольтметра блока мультиметров P1.
13. По завершении эксперимента источник G1 и питание блока мультиметров P1 отключается.

## Требования к отчету по лабораторной работе

- По п.п. 7–8, для режима глухозаземленной нейтрали питающей электрической сети, необходимо отразить величины тока утечки и

времени срабатывания УЗО при различных величинах сопротивления обуви  $R_{\text{обуви}}=1; 10; 300; 3000$  кОм и пола  $R_{\text{пола}}=1; 100; 900; 2500$  кОм (по заданию преподавателя).

- По п.п. 7–8, для режима с изолированной нейтралью, когда сопротивления изоляций будут иметь значимые значения  $R_A=R_B=R_C=1; 2; 5; 10; 100; 500$  кОм (по заданию преподавателя), также необходимо отразить величины тока утечки и времени срабатывания УЗО при различных величинах сопротивления обуви  $R_{\text{обуви}}=1; 10; 300; 3000$  кОм и пола  $R_{\text{пола}}=1; 100; 900; 2500$  кОм (по заданию преподавателя), а также определить напряжение фазы, которой касается человек.
- Необходимо сделать выводы по всем выполненным экспериментам.

### **4.3 МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Перед эксплуатацией лабораторного стола проверить присоединение его к контуру заземления лаборатории в соответствии с требованиями ПУЭ пп 1.7.76, 1.7.93, 1.7.94.
2. Перед началом работы проверяется состояние лабораторного стенда и используемых измерительных приборов. Студент должен: осмотреть электрический провода, находящиеся в комплекте стенда, питающие кабели, пусковые кнопки и др. устройства, электроизмерительные приборы, защитные средства, убедиться в наличии заземления, в отсутствии оголенных проводов, не закрытых клемных коробок, соединений.
3. Во время работы студент обязан регулярно производить осмотр обслуживаемого им оборудования, рабочего места. При выявлении неполадок немедленно известить об этом преподавателя.
4. Выполнение работ на лабораторном стенде производить в соответствии с порядком выполнения лабораторной работы согласно методическим указаниям к выполнению лабораторных работ.
5. Выполнение необходимых изменений в лабораторном стенде (сборка электрической схемы эксперимента) производить на отключенном стенде.
6. По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания G1 и A11, а также – выключатель «ПИТАНИЕ» модели A1 питающей электрической сети

## 5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Доп. с исправлениями. М, 2002.
2. Сенигов П.Н. Основы электробезопасности. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ОЭБ.001 РБЭ (912). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2004. – 39 с.
3. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках : учеб. пособие для вузов / П. А Долин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Знак», 2000. – 440 с.
4. Межотраслевые правила по охране труда (Правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. ПОТ РМ-016-2001. РД-153-34.003.150-0.090 (с изм. и доп.). – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 210 с.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 286 с.
6. Межотраслевая инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 82 с.
7. Инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве. РД-153-34.0-03.702-99. – М.: Министерство топлива и энергетики РФ, 1999. – 82 с.
8. Маньков В.Д. Опасность поражения человека электрическим током и порядок оказания первой помощи при несчастных случаях на производстве: Практическое руководство / В.Д. Маньков, С.Ф. Заграничный. – 5-е изд., испр. и доп. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ» ЭлектроСервис», 2006. – 80 с.
9. Гордон, Г.Ю. Электротравматизм и его предупреждение / Г.Ю. Гордон, Л.И. Вайнштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с. Охрана труда в электроустановках: учебник для вузов / под ред. Б.А. Князевского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
10. ГОСТ 12.1.009-76. ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.
11. ГОСТ 12.0.003-74, ССБТ. Вредные и опасные производственные факторы. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК – ОПАСНЫЙ И ВРЕДНЫЙ ФАКТОР..5</b>	<b>5</b>
1.1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОТОКА НА ЧЕЛОВЕКА, ВИДЫ ЭЛЕКТРОТРАВМ.....	5
1.2. ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ .....	7
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКА СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.....</b>	<b>17</b>
2.1. Область применения сетей с изолированной нейтралью .....	17
2.2. Контроль изоляции в сети с изолированной нейтралью.....	18
2.3. Заземление как средство защиты .....	19
2.4. Анализ опасности электропоражения в сетях с изолированной нейтралью .....	22
<b>3. СЕТИ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.....</b>	<b>28</b>
3.1 Защитное зануление.....	28
3.2. Защитное отключение.....	43
<b>4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ» .....</b>	<b>48</b>
4.1 Характеристика лабораторного оборудования и измерительных приборов.....	48
4.2 Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра.....	51
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЕЕ НЕЙТРАЛИ НА УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ .....</b>	<b>53</b>
<i>Цель работы.....</i>	<i>53</i>
<i>Общие сведения.....</i>	<i>53</i>
<i>Перечень аппаратуры .....</i>	<i>55</i>
<i>Порядок проведения работы .....</i>	<i>57</i>
<i>Требования к отчету.....</i>	<i>58</i>

<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЯВЛЕНИЯ ПРИ СТЕКАНИИ ТОКА В ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ЗАЩИТНЫЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ.....</b>	<b>60</b>
<i>Цель работы.....</i>	60
<i>Общие сведения.....</i>	60
<i>Перечень оборудования.....</i>	67
<i>Порядок проведения работы.....</i>	69
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА</b>	<b>71</b>
<i>Цель работы.....</i>	71
<i>Общие сведения.....</i>	71
<i>Перечень аппаратуры.....</i>	73
<i>Порядок проведения работы.....</i>	73
<i>Требования к отчету.....</i>	74
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАНУЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....</b>	<b>75</b>
<i>Цель работы.....</i>	75
<i>Общие сведения.....</i>	75
<i>Перечень аппаратуры.....</i>	76
<i>Порядок проведения работы.....</i>	78
<i>Требования к отчету.....</i>	79
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.....</b>	<b>80</b>
<i>Цель работы.....</i>	80
<i>Общие сведения.....</i>	80
<i>Перечень аппаратуры, используемой в лабораторной работе..</i>	81
<i>Порядок проведения работы.....</i>	83
<i>Требования к оформлению отчета.....</i>	83
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ</b>	<b>85</b>
<i>Цель работы.....</i>	85
<i>Общие сведения.....</i>	85
<i>Перечень аппаратуры.....</i>	92
<i>Порядок проведения работы.....</i>	94
<i>Требования к отчёту по лабораторной работе.....</i>	94

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТНОГО  
ЗАЗЕМЛЕНИЯ/САМОЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....95**

<i>Цель работы.....</i>	<i>95</i>
<i>Общие сведения.....</i>	<i>95</i>
<i>Перечень аппаратуры .....</i>	<i>102</i>
<i>Порядок проведения работы.....</i>	<i>104</i>

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО  
ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ .....105**

<i>Цель работы.....</i>	<i>105</i>
<i>Общие сведения.....</i>	<i>105</i>
<i>Перечень аппаратуры .....</i>	<i>107</i>
<i>Порядок проведения работы.....</i>	<i>109</i>
<i>Требования к отчету по лабораторной работе .....</i>	<i>109</i>
4.3 Меры безопасности при проведении лабораторных работ .....	111

**5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....112**

Дашковский Анатолий Григорьевич  
Бородин Юрий Викторович  
Сечин Андрей Александрович  
Гуляев Милий Всеволодович  
Кагиров Артур Геннадьевич

**«ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ».**  
**КОМПЛЕКТ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Учебное пособие

Научный редактор

С.В. Романенко

Подписано к печати 21.12.2006. Формат 60x84/16.  
Бумага «Классика».  
Печать RISO. Усл.печ.л. 20,0. Уч.-изд.л. 18,11.  
Заказ . Тираж 600 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университе-  
та сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стан-  
дарту ISO 9001:2000

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