

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

квалификация выпускника «бакалавр»

очная форма обучения

«СОГЛАСОВАНО»

«РАЗРАБОТАНО»

Ставрополь, 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Мустафаев Х. М., Маслов В. В.

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»
квалификация выпускника «бакалавр»

кафедра АЭСиЭ ИЭЭиН СКФУ

Ставрополь
2017

УДК
ББК

Рецензенты:

Ивашина А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры
электроснабжения и эксплуатации электрооборудования СтГАУ,

Чуенкова И.Ю., доктор физико-математических наук, профессор кафедры
физики, электротехники и электроники СКФУ

Мустафаев Х. М., Маслов В. В. **Электробезопасность: лабораторный
практикум** — Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2017. – 136 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов направления
подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили
подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети»,
«Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»)
квалификация выпускника «бакалавр».

В лабораторном практикуме приводятся теоретические сведения и методика
проведения лабораторных по дисциплине «Электробезопасность»,
индивидуальные задания для выполнения этих работ по темам: защитные меры в
электроустановках, основы электробезопасности, действие электрического тока
на организм человека.

©ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет», 2017

Содержание

Предисловие	5
Указания по технике безопасности	9
Перечень аппаратуры, используемой в экспериментах	12
Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра	13
Лабораторная работа № 1 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TN - C</i> при заземленных корпусах электроприемников	14
Лабораторная работа № 2 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TN - C</i> при изолированных от земли корпусах электроприемников	26
Лабораторная работа № 3 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TN - S</i>	35
Лабораторная работа № 4 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TN – C - S</i>	46
Лабораторная работа №5 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TT</i>	56
Лабораторная работа № 6 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>TI</i>	65
Лабораторная работа № 7 Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления <i>IT</i>	77
Лабораторная работа № 8 Определение влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности	85
Лабораторная работа № 9 Определение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока через защитный заземлитель	94
Лабораторная работа № 10 Определение зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека	107
Лабораторная работа № 11 Контроль изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью.	113

Лабораторная работа № 12 Измерение сопротивления заземления	118
Литература	123
Приложение А	126
Приложение Б	129

кафедра АЭСИЭ ИЭЭИН СКФУ

Предисловие

Одной из основных дисциплин, на которых базируются курсы направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профилей подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»), является дисциплина «Электробезопасность».

«Электробезопасность» - относится к вариативной части обязательной дисциплины БЗ.В.ОД.5, в которой соединена тематика безопасного взаимодействия человека со средой обитания (производственной, бытовой, городской, природной) и вопросы защиты от негативных факторов электрического тока. Изучением дисциплины достигается формирование у специалистов представления о неразрывном единстве эффективной профессиональной деятельности с требованиями к безопасности и защищенности человека. Реализация этих требований гарантирует сохранение работоспособности и здоровья человека, готовит его к действиям в экстремальных условиях.

Знания, умения и навыки, полученные студентами при изучении данной дисциплины, используются при выполнении магистерской диссертационной работы, а также представляют собой значительную долю знаний, умений и навыков, необходимых выпускникам в профессиональной научной деятельности.

Для освоения дисциплины поставлены следующие **задачи**:

- формирование у студента теоретической базы и практических навыков в области электробезопасности систем электроснабжения
- получение знаний по разработке и реализации мер защиты человека в области электробезопасности;
- в выработке у студентов умений и навыков повышения электробезопасности повседневным улучшением условий труда, совершенствованием мер

и средств защиты персонала и других лиц, занимающихся эксплуатацией электроустановок;

Дисциплина «Электробезопасность» призвана стать теоретической основой для выработки у студентов умений и навыков повышения электробезопасности повседневным улучшением условий труда, совершенствованием мер и средств защиты персонала и других лиц, занимающихся эксплуатацией электроустановок.

Она относится к базовому циклу БЗ.В.ОД.5 и ее освоение происходит в 8 семестре.

Лабораторные занятия проводятся в специализированных лабораториях и аудиториях. Занятия обеспечиваются необходимым наглядным материалом, стендами и приборами. Количество студентов в подгруппе составляет 10-12 человек. В ходе учебного занятия студенты проходят входное тестирование (собеседование), самостоятельно и при участии преподавателя выполняют лабораторные работы, отчитываются за проделанную на занятии учебную работу.

Работа студентов на занятиях оценивается в рамках балльно-рейтинговой системы оценки образовательной деятельности студентов.

Для решения задач образовательного процесса разработан учебно-профессиональный (методический) комплекс, включающий в себя ряд элементов: федеральный государственный образовательный стандарт, рабочая учебная программа, методические разработки для студентов и преподавателей по каждому практическому занятию, экзаменационные материалы, тексты лекций, перечень информационного и материального обеспечения образовательного процесса.

Для достижения планируемых результатов обучения, в дисциплине «Электробезопасность» используются различные образовательные технологии:

Информационно-развивающие технологии, направленные на формирование системы знаний, запоминание и свободное оперирование ими. Используется лекционно-семинарский метод, самостоятельное изучение

литературы, применение новых информационных технологий для самостоятельного пополнения знаний, включая использование технических и электронных средств информации.

Деятельностные практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений при проведении экспериментальных исследований, обеспечивающих возможность качественно выполнять профессиональную деятельность. Используется анализ, сравнение методов проведения исследований, выбор метода, в зависимости от объекта исследования в конкретной производственной ситуации и его практическая реализация.

Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие проблемного мышления, мыслительной активности, способности видеть и формулировать проблемы, выбирать способы и средства для их решения. Используются виды проблемного обучения: освещение основных проблем на лекциях, учебные дискуссии, коллективная деятельность в группах при выполнении лабораторных работ, решение задач повышенной сложности. При этом используются первые три уровня (из четырех) сложности и самостоятельности: проблемное изложение учебного материала преподавателем; создание преподавателем проблемных ситуаций, а обучаемые вместе с ним включаются в их разрешение; преподаватель создает проблемную ситуацию, а разрешают её обучаемые в ходе самостоятельной деятельности.

Личностно-ориентированные технологии обучения, обеспечивающие в ходе учебного процесса учет различных способностей обучаемых, создание необходимых условий для развития их индивидуальных способностей, развитие активности личности в учебном процессе. Личностно-ориентированные технологии обучения реализуются в результате индивидуального общения преподавателя и студента при защите лабораторных работ, при выполнении домашних индивидуальных заданий, решении задач повышенной сложности, на еженедельных консультациях.

Для реализации самостоятельной работы созданы следующие условия и предпосылки:

1. Студенты обеспечены информационными ресурсами (учебниками, справочникам, учебными пособиями, банком индивидуальных заданий);

2. Студенты обеспечены информационными ресурсами (методические указания выдаются заранее в электронном виде).

3. Разработаны контролирующие материалы в тестовой форме, позволяющие оперативно оценить уровень подготовки студентов.

4. Организованы еженедельные консультации (также для отработки пропущенных занятий).

**Компетенции обучающегося,
формируемые в результате освоения дисциплины**

	13.03.02
Цикл, в рамках которого изучается	Обязательная дисциплина вариативной части профессионального цикла БЗ.В.ОД.5
семестр	8 семестр
Количество зачетных единиц	3 з.е.
Реализуемые компетенции	ОК-7, ПК-4, ПК-5, ПК-9, ПК-22, ПК-24, ПК-35, ПК-36

Указания по технике безопасности

1 Перед началом работы все студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в книге инструктажа, которая находится в лаборатории.

2 Ознакомиться с теоретической частью методических описаний лабораторных работ, с инструкцией стендов и электрической схемой.

3 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 клеммных коробок, соединений

3 Для обеспечения полной безопасности стенд должен быть исправен. Если замечена какая-либо неисправность, работу следует немедленно прекратить и о неисправности доложить преподавателю.

4 Подготовьте стенд к работе и измерениям, соберите схему. Пригласите преподавателя для получения допуска к работе.

5 Выполнение работ на лабораторном стенде производить в соответствии с порядком выполнения лабораторной работы согласно методическим указаниям к выполнению лабораторных работ

6 Первые измерения проводите только в присутствии преподавателя.

7 По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также – выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети

8 Соблюдайте тишину и порядок в лаборатории.

9 Продолжительность всех лабораторных работ по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» составляет 2 часа.

В настоящем методических указаниях описаны базовые эксперименты, выполняемые на комплекте типового лабораторного оборудования «Основы электробезопасности». В ходе их воспроизводится работа устройств, обеспечивающих безопасность электроустановок, с одновременной регистрацией параметров электромагнитных процессов в них.

Комплект типового лабораторного оборудования предназначен для проведения лабораторных работ по специальностям «Безопасность технологических процессов и производств (по отраслям)» и другим инженерным специальностям.

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

-спроектированные с учебными целями натуральные 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 3650x900x1600

Масса, кг, не более..... 200

Комплекту типового лабораторного оборудования «Основы электробезопасности» присущи следующие качества.

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ, которая выражается в возможности воспроизведения не только базовых экспериментов, но и более широкого круга задач моделирования.

ГИБКОСТЬ, которая обеспечивается возможностью компоновки требуемой конфигурации комплекта согласно с задачами каждого конкретного

эксперимента.

НАГЛЯДНОСТЬ результатов моделирования, которая обеспечивается их отображением на измерительных приборах комплекта.

НАДЕЖНОСТЬ, достигаемая за счет малой мощности силовых элементов, защитой электрических цепей от эксплуатационных коротких замыканий и неумелого обращения.

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ, которая обеспечена выполнением элементов классом защиты от поражения электрическим током 01 и I, а также применением устройства защитного отключения.

КОМПАКТНОСТЬ, которая обеспечена малой установленной мощностью элементов и использованием только требуемых для данного эксперимента блоков и приборов.

СОВРЕМЕННЫЙ ДИЗАЙН комплекта с учетом требований эргономики, инженерной психологии и эстетики.

На комплекте может активно работать бригада из 2-3 студентов.

Перечень аппаратуры, используемой в экспериментах

Количество аппаратуры определённого типа, используемой в конкретных экспериментах, приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Тип аппаратуры используемой в конкретных экспериментах

Тип аппаратуры	Номер эксперимента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
201.12	1	1		1	1	1	1	1
337	1	1		1	1	1	1	1
302	1	1		1	1	1	1	1
303	1				1		1	1
309	1							1
310	1			1				
311					1			
312						1		
316					1			
321								1
325		1						
326		1						
327		1						
328							1	
329				1				
341			1					
508.2	1	1		1	1	1	1	1

Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

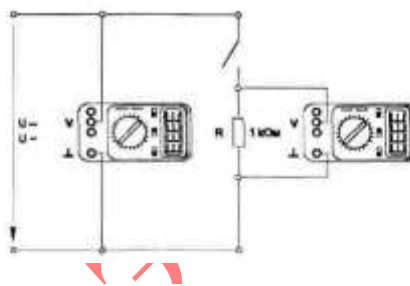
Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

установка рода тока (постоянный/переменный);

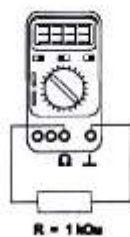
выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;

правильное подсоединение зажимов мультиметра к измеряемой цепи.

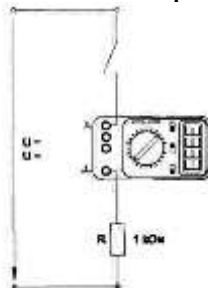
Присоединение мультиметра как вольтметра



Присоединение мультиметра как амперметра



Присоединение мультиметра как омметра



Лабораторная работа № 1

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления $TN - C$ при заземленных корпусах электроприемников

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления $TN - C$ при заземленных корпусах электроприемников

Теоретическое обоснование

Система TN – система, в которой нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали (занулены) при помощи нулевых защитных проводников.

Система $TN - C$ – система TN , в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении (см. рисунок 1.1); при этом совмещенный нулевой и рабочий провод обозначается PEN .

Для трехфазной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ типа $TN - C$ (рисунок 1.1) значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения определяются фазным напряжением сети и не зависят от сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

Действительно, проводимости фазного и нулевого проводников относительно земли по сравнению с $Y_0 = 1/R_0$ проводимостью заземления нейтрали малы ($Y_{L1}, Y_{L2}, Y_{L3} \ll Y_0$). При этом выражение для тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазному проводу при нормальном режиме работы сети $TN - C$, принимает вид:

$$I_h = \frac{U}{R_h - R_0},$$

где R_0 – сопротивление рабочего заземления нейтрали.

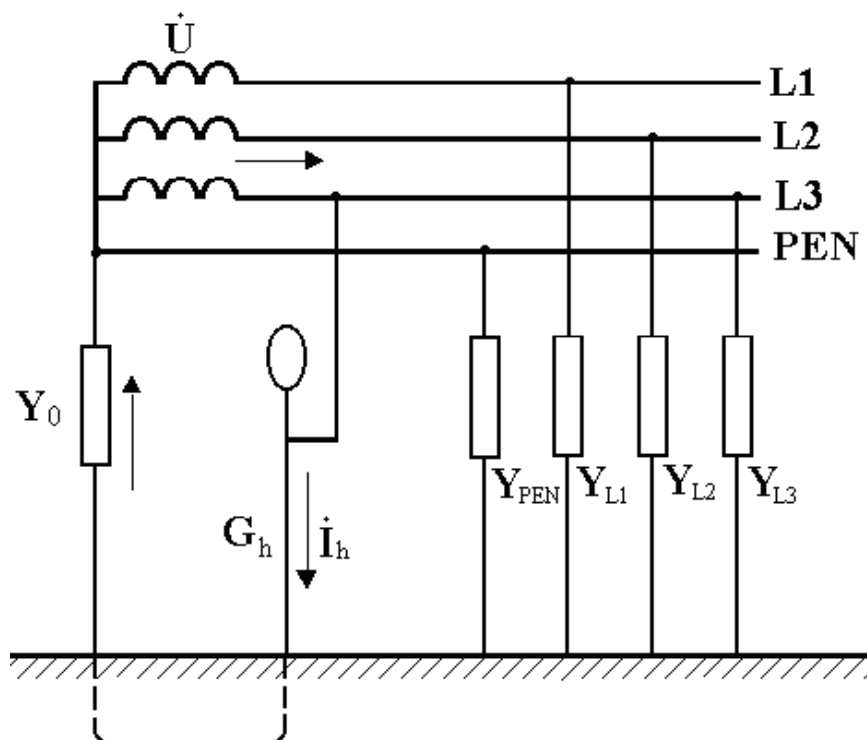


Рисунок 1.1 – Однофазное прямое прикосновение в сети с заземленной нейтралью типа *TN - C* при нормальном режиме работы

Напряжение прикосновения в этом случае определяется из уравнения:

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

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

При аварийном режиме, когда один из фазных проводов сети, например, провод L_2 (рисунок 1.2), замкнут на землю через относительно малое активное сопротивление $R_{зм}$, а человек прикасается к исправному фазному проводу, уравнение имеет следующий вид:

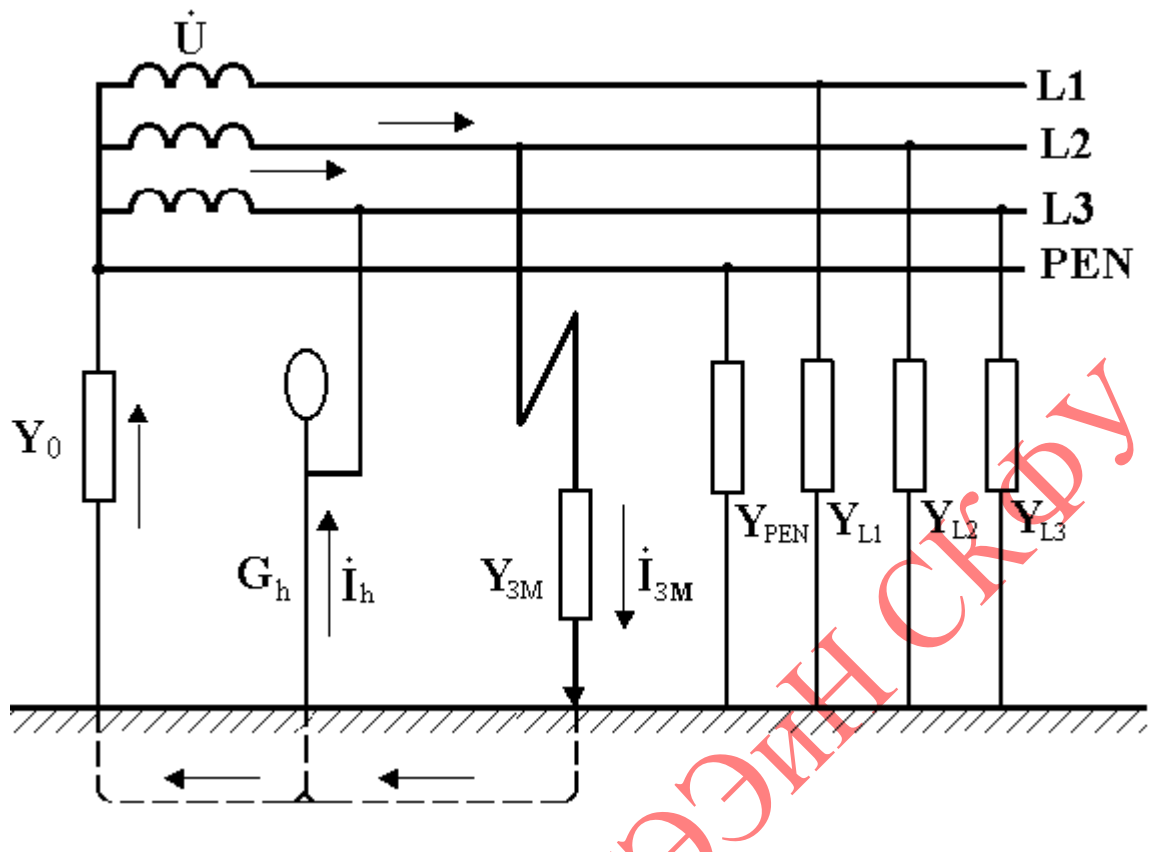


Рисунок 1.2 – Прикосновение к исправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа *TN-C* при аварийном режиме работы

$$U_h^* = U \cdot \frac{Y_{3M} \cdot (1 - \alpha) + Y_0}{Y_{3M} + Y_0 + Y_h}$$

Здесь учтено, что Y_{L1} , Y_{L2} и Y_{PEN} малы по сравнению с Y_0 , а Y_{L3} – по сравнению с Y_0 и Y_{3M} , т.е. ими можно пренебречь и считать равными нулю.

С учетом того, что

$$Y_{3M} = \frac{1}{R_{3M}}; Y_0 = \frac{1}{R_0}; Y_h = \frac{1}{R_h}; \alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

напряжение прикосновения в действительной форме имеет вид

$$U_h = U \cdot R_h \cdot \frac{\sqrt{R_{3M}^2 + 3 \cdot R_{3M} \cdot R_0 + (R_0 \cdot \sqrt{3})^2}}{R_{3M} \cdot R_0 + R_h \cdot (R_{3M} + R_0)}.$$

Учитывая, что

$$3 \cdot R_{3M} \cdot R_0 \approx 2 \cdot \sqrt{3} \cdot R_{3M} \cdot R_0$$

предыдущее выражение можно записать как

$$U_h = U \cdot R_h \cdot \frac{R_{3M} + R_0 \cdot \sqrt{3}}{R_{3M} \cdot R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}$$

При этом выражение для определения тока через тело человека имеет вид

$$I_h = U \cdot \frac{R_{3M} + R_0 \cdot \sqrt{3}}{R_{3M} \cdot R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}$$

Рассмотрим два характерных случая.

1. Если принять, что сопротивление замыкания фазного провода на землю R_{3M} равно нулю, то напряжение прикосновения

$$U_h = U \cdot \sqrt{3}$$

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

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

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

$$U \cdot \sqrt{3} > U_h > U$$

С учетом того, что всегда $R_{3M} > R_0$, напряжение прикосновения U_h в большинстве случаев незначительно превышает значение фазного напряжения, что менее опасно для человека, чем в аналогичной ситуации в сети типа *IT*.

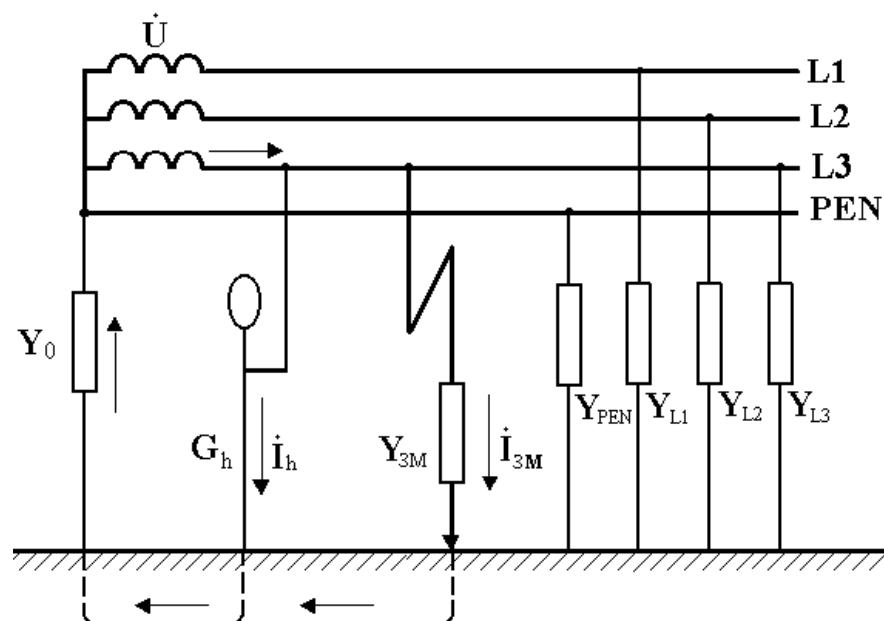


Рисунок 1.3 – Прикосновение к неисправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа *TN - C* при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа *TN - C*, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (рисунок 1.3; человек касается фазного провода L_3) ток через тело человека будет определяться, также, как и в сети типа *IT*, падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю R_{3M} :

$$I_h = \frac{I_{3M} \cdot R_{3M}}{R_h} \alpha_1 \cdot \alpha_2$$

где: I_{3M} – ток замыкания на землю; α_1, α_2 – коэффициенты напряжения прикосновения.

При $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

$$I_h = \frac{I_{3M} \cdot R_{3M}}{R_h}.$$

Ток замыкания на землю в сети *TN - C* зависит только от сопротивления растеканию тока R_{3M} , сопротивления заземления нейтрали R_0 и сопротивления тела человека R_h . Если принять во внимание, что обычно $R_{3M} \ll R_h$, то

$$I_{\text{зм}} = \frac{U}{(R_{\text{зм}} + R_0)}$$

В этом случае напряжение прикосновения лишь незначительно отличается от значения фазного напряжения.

Таким образом, прикосновение к неисправному фазному проводу (замкнувшемуся на землю) в сети *TN - C* практически также опасно, как к исправному. Значение тока, протекающего через тело человека, в этом случае почти такое же, как при прямом однофазном прикосновении в нормальном режиме работы в сети *TN - C*.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50 ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	- 220 В / 1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220В /16 А/ 10 мА

<i>A8, A12</i>	Модель заземлителя	390	-220 В / 2,10,100,10000
----------------	--------------------	-----	----------------------------

Продолжение таблицы

<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	-220 В /0,5 А
<i>P1</i>	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра 0...1000В 0...10А~; 0...20МОм

Методика и порядок выполнения работы

1.1 Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 1.4.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должно ложно сработать устройство защитного отключения *A5*, что подтверждает нецелесообразность его применения в этом случае.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также выключатель «ПИТАНИЕ» питающей электрической сети *A1*.

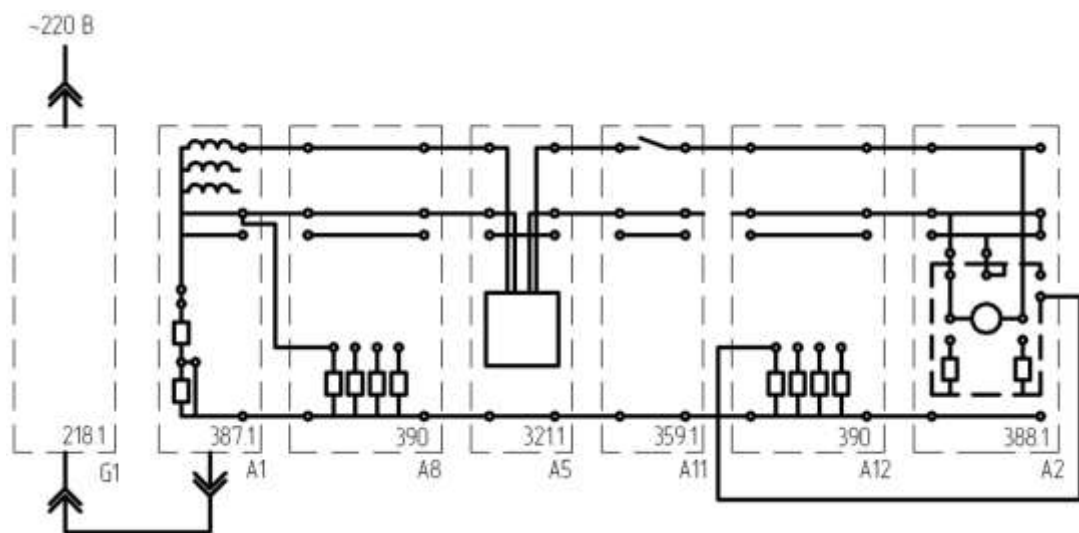


Рисунок 1.4 – Схемы для подтверждения нецелесообразности применения устройства защитного отключения в электроустановках с системой заземления $TN - C$

1.2 Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 1.5.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели $A1$ питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания $G1$.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров $P1$.
- Активизируйте используемые мультиметры.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели $A1$.
- Включите автоматический выключатель $A11$. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника $A2$.
- Вставьте конец проводника « L », в гнездо фазы « L » электроприемника $A2$, как это показано на рисунке 1.5.

- С помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров *P1* измерьте ток через тело человека и напряжение прикосновения. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 1.1.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» питающей электрической сети *A1*.

- По величине измеренного тока через тело человека сделайте вывод о наличии или отсутствии защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением.

Таблица 1.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

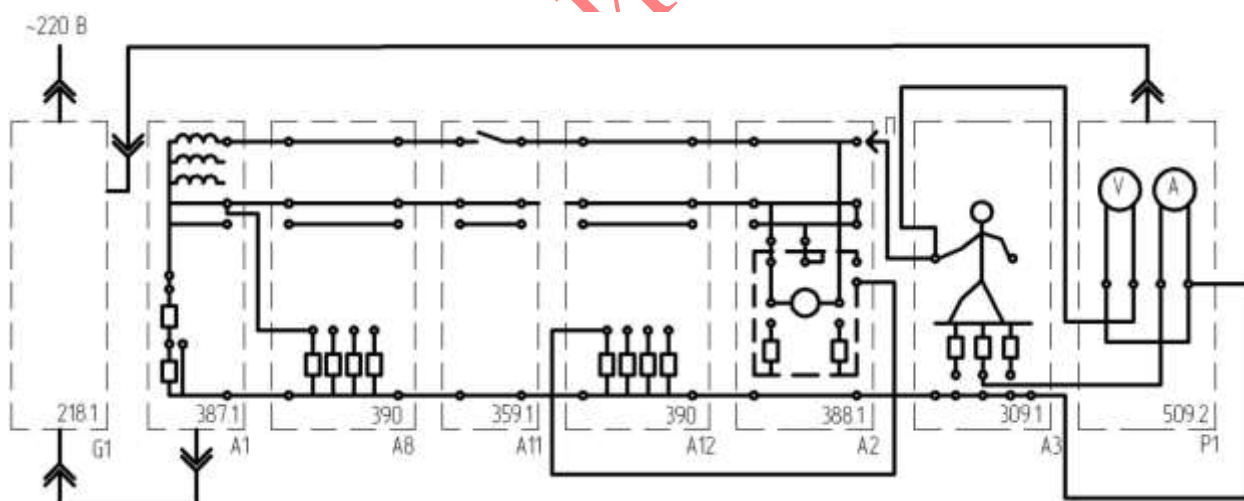


Рисунок 1.5 – Схема для подтверждения отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

1.3 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической

соединений, приведенной на рисунке 1.6 а.

- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.

- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.

- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров *P1*.

- Активизируйте используемые мультиметры.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.

- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.

- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «*Ш*» или «*П2*», в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 1.6 а.

- С помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров *P1* измерьте ток через тело человека и напряжение прикосновения. По величине тока судите о наличии или отсутствии защиты при повреждении основной изоляции электроприемника. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 1.1.

- Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.

- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 1.6 б.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.

- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «*П*», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 1.6 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель АН подтверждая, тем самым, действие защиты.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» питающей электрической сети *A1*.

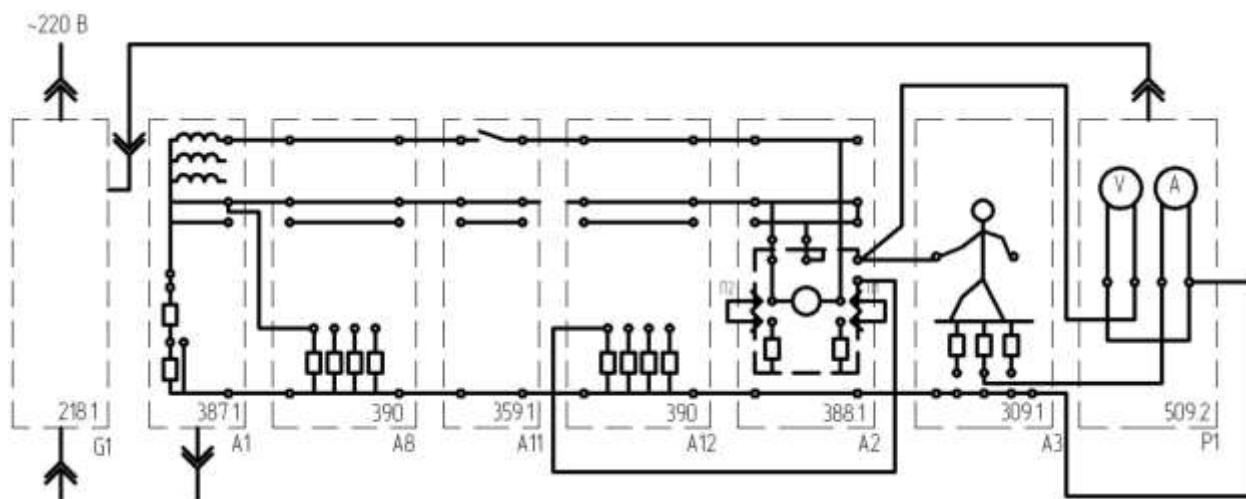


Рисунок 1.6 а – Схема для моделирования работы защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (уменьшении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или – нулевого провода до 1 Ом)

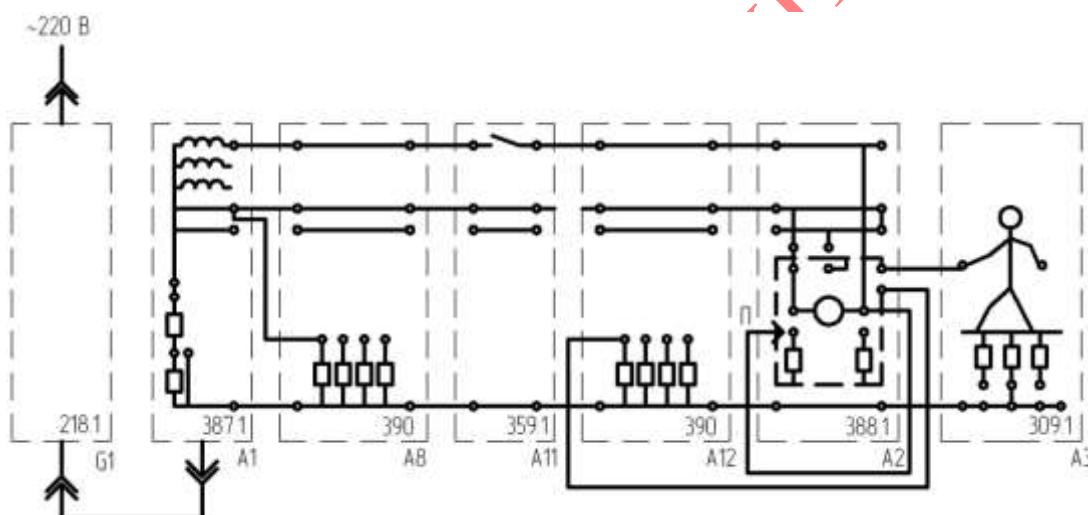


Рисунок 1.6 б – Схема для моделирования работы защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (уменьшении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1 Название и цель лабораторной работы.

2 Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения

3 Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

4 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I

5 Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1 Дать определение системе заземления TN .

2 Дать определение системе заземления $TN - C$.

3 Написать и пояснить выражение для тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазному проводу при нормальном режиме работы сети $TN - C$.

4 Написать и пояснить выражение напряжения прикосновения в действительной форме при аварийном режиме работы сети типа $TN - C$, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю.

5 От чего зависит ток замыкания на землю в сети $TN - C$.

Лабораторная работа № 2

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TN - C* при изолированных от земли корпусах электроприемников

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TN - C* при изолированных от земли корпусах электроприемников

Теоретическое обоснование

Система *TN* - система, в которой нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали (занулены) при помощи нулевых защитных проводников.

Система *TN - C* – система *TN*, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении (см. рисунок 2.1); при этом совмещенный нулевой и рабочий провод обозначается *PEN*.

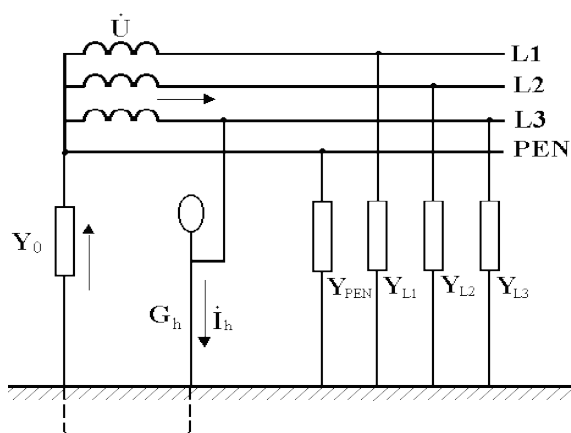


Рисунок 2.1 – Однофазное прямое прикосновение в сети с заземленной нейтралью типа *TN - C* при нормальном режиме работы

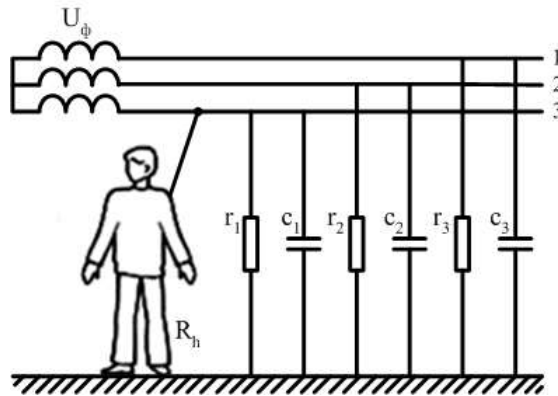


Рисунок 2.2 – Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью; нормальный режим

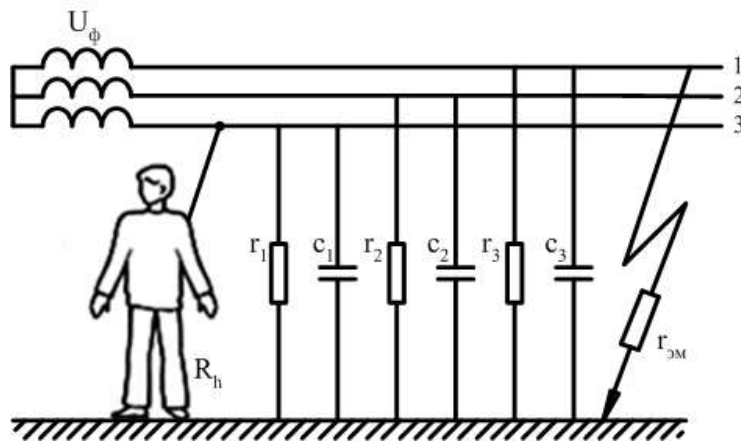


Рисунок 2.3 – Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью; аварийный режим

Условия поражения человека электрическим током в трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью

При нормальном режиме работы рассматриваемой сети напряжение прикосновения $U_{пр}$ и ток I_h в период касания человека к одной фазе определяются уравнениями (2.1) и (2.2), если принять $\underline{Y}_l = \underline{Y}_n = 0$

$$I_h = U_{пр} \cdot Y_h \cdot \frac{Y_2 \cdot (1 - a^2) + Y_3 \cdot (1 - a)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}$$

Оценим опасность прикосновения к фазному проводу для трех случаев:

1. При равенстве сопротивлений изоляции и емкостей проводов

относительно земли, т.е. при $r_1 = r_2 = r_3 = r$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_a$ следовательно при $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y}$. Ток через тело человека в комплексной форме:

$$I_h = U_\phi \cdot Y_h \cdot \frac{Y \cdot (1 - a^2 + 1 - a)}{3 \cdot Y + Y_h}$$

т.к. $(a^2 + a + 1) = 0$

В действительной форме:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r \cdot (r + 6 \cdot R_h)}{9 \cdot R_h^2 \cdot (1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}$$

2. При равенстве сопротивлений изоляции и отсутствии емкостей, т.е. при $r_1 = r_2 = r_3 = r$, $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ следовательно при $\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y} = 1/r$.

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h + \frac{r}{3}}$$

3. При равенстве емкостей и весьма больших сопротивлениях изоляции, т.е. $r_1 = r_2 = r_3 = r = \infty$; $C_1 = C_2 = C_3 = C$, а следовательно при

$$\underline{Y}_1 = \underline{Y}_2 = \underline{Y}_3 = \underline{Y} = j\omega C.$$

$$I_h = \frac{U_\phi \cdot 3 \cdot C \cdot \omega}{\sqrt{9 \cdot R_h^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 1}} = \frac{U_\phi}{\sqrt{9 \cdot R_h^2 + (1/3 \cdot C \cdot \omega)}}$$

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

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

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

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

При аварийном режиме работы сети, когда возникло замыкание фазы (например, фазы 3) на землю через малое сопротивление $r_{зм}$, проводимости двух других фаз можно принять равными нулю. $Y_1 = Y_2 = 0$, получим

$$I_h = U_\phi \cdot Y_h \cdot \frac{Y_3 \cdot (1 - a)}{Y_3 \cdot Y_h}$$

Производя соответствующие преобразования и имея в виду, что

$$Y_3 = 1/R_{3M}, \quad Y_h = 1/R_h$$

получим значение тока в действительной форме.

Напряжение прикосновения будет

$$U_{пр} = I_h \cdot R_h = U_\phi \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{R_h}{R_h + r_{3M}}$$

Напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в период аварийного режима к исправной фазе трехфазной сети с изолированной нейтралью значительно больше фазного и несколько меньше линейного напряжения сети.

Таким образом, этот случай прикосновения во много раз опаснее прикосновения к той же фазе сети при нормальном режиме работы.

Вместе с тем этот случай является более опасным, чем прикосновение к исправной фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В

Продолжение таблицы

<i>A3</i>	Модель человека	309.1	~ 220 В / 1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220 В / 16 А / 10 мА
<i>A8</i>	Модель заземлителя	390	- 220 В 2,10,100,10000 Ом
<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	- 220 В / 0,5 А

Методика и порядок выполнения работы

2.1 Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 2.4.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «*П*», в гнездо фазы «*L*» электроприемника *A2*, как это показано на рисунок 2.4. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь

прохождения тока выбирается по таблице 2.1.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания $G1$ и $A11$, а также – выключатель «ПИТАНИЕ» питающей электрической сети $A1$.

Таблица 2.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

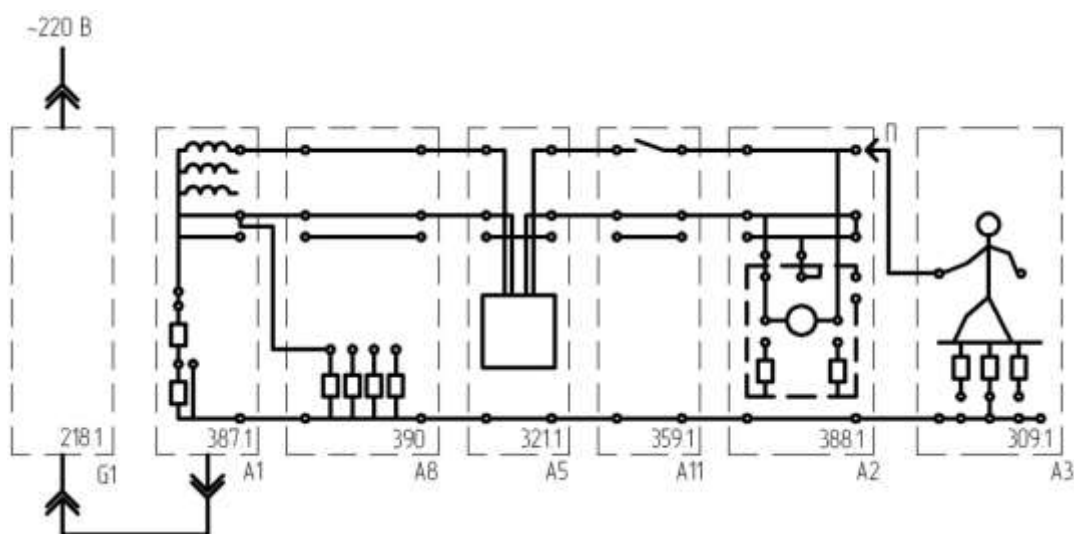


Рисунок 2.4 - Схема для выявления действия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

2.2 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 2.5 а.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели $A1$ питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания $G1$.
- Включите устройство защитного отключения $A5$.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.

. Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «*П1*» или «*П2*», в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 2.5 а. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 2.1.

• Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 2.5 б.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «*П*», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 2.5 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель *A11* или устройство защитного отключения *A5* подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 2.1.

• По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» питающей электрической сети *A1*.

кач

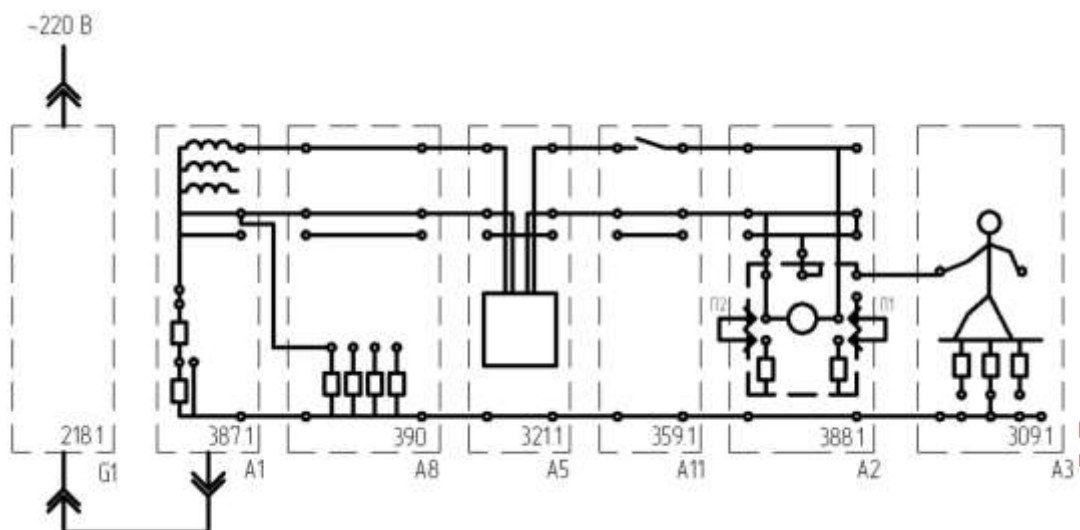


Рисунок 2.5 а – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или – рабочего нулевого провода до 1 Ом)

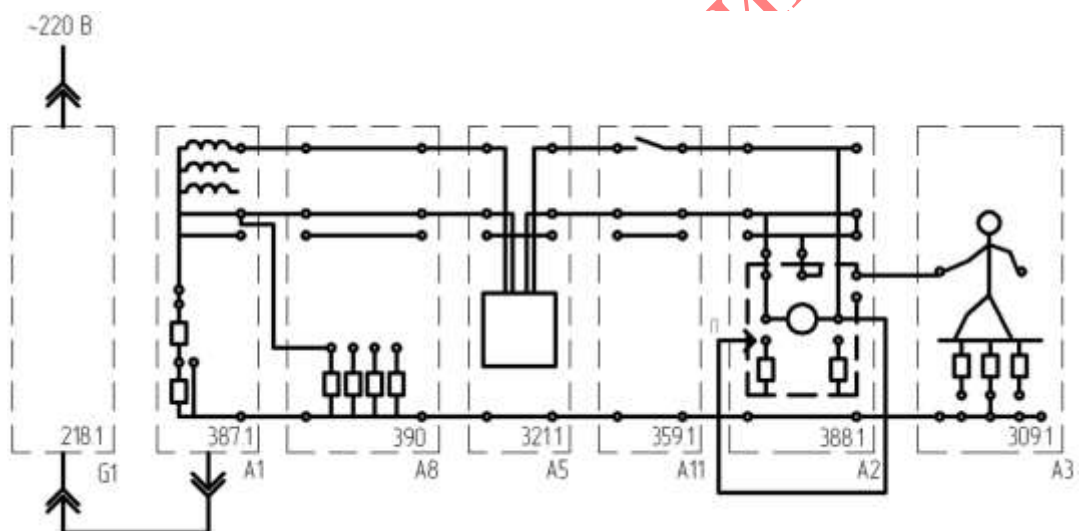


Рисунок 2.5 б – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

- 1 Название и цель лабораторной работы.
- 2 Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения.
- 3 Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением.
- 4 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I.
- 5 Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. От чего зависит опасность для человека, прикоснувшегося к одному из фазных проводов, в сетях с изолированной нейтралью, в период нормальной работы сети.
2. Какой случай прикосновения во много раз опаснее прикосновения к исправной фазе трехфазной сети с заземленной нейтралью при нормальном режиме работы.
3. Оцените опасность прикосновения к фазному проводу для трех случаев.
4. Дать определение системе заземления *TN*.
5. Дать определение системе заземления *TN - C*.

Лабораторная работа № 3
Защита человека от поражения электрическим током в
электроустановках с системой заземления $TN - S$

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления $TN - S$.

Теоретическое обоснование

Система TN – система, в которой нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали (занулены) при помощи нулевых защитных 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.

Система $TN - S$ – система TN , в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении (см. рисунок 3.1).

В электроустановках с системами заземления $TN - S$ и $TN - C - S$ электробезопасность потребителя обеспечивается не собственно системами, а устройствами защитного отключения (УЗО), действующими более эффективно в комплексе с этими системами заземления и системой уравнивания потенциалов

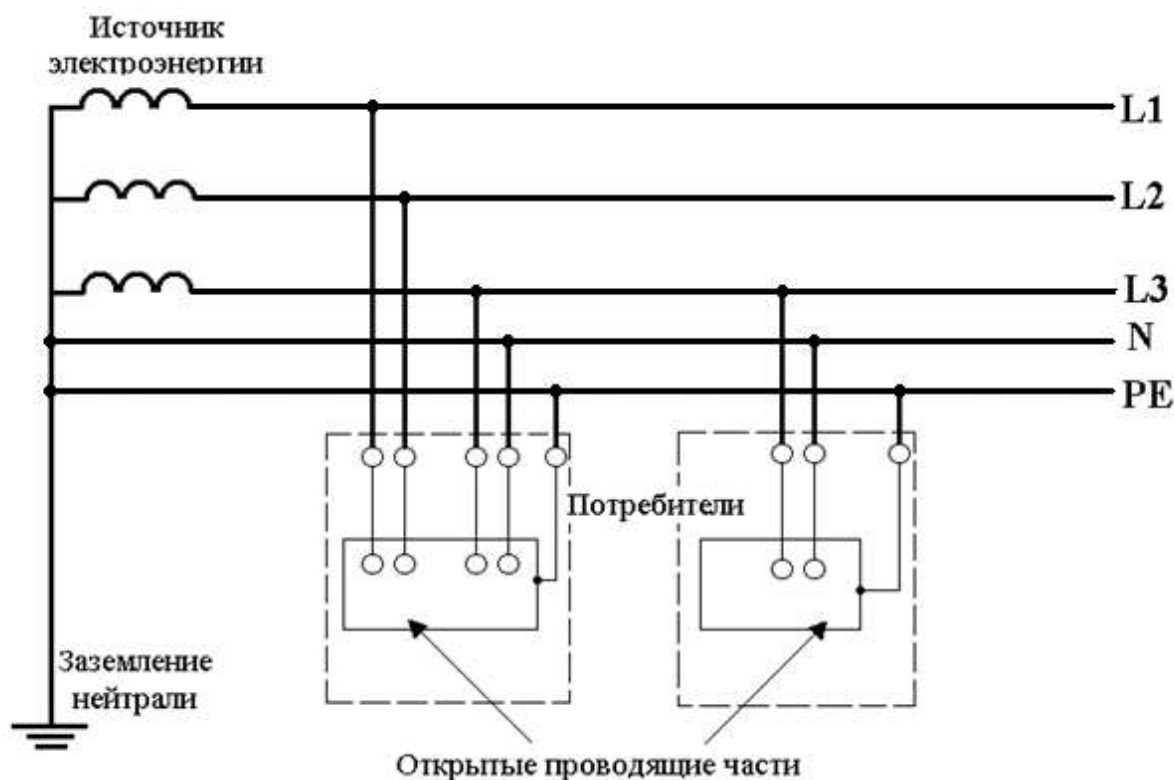


Рисунок 3.1 – Система $TN - S$

Собственно сами системы заземления (без УЗО) не обеспечивают необходимой безопасности. Например, при пробое изоляции на корпус электроприбора или какого-либо аппарата, при отсутствии УЗО отключение этого потребителя от сети осуществляется устройствами защиты от сверхтоков – автоматическими выключателями или плавкими вставками.

Быстродействие устройств защиты от сверхтоков, во-первых, уступает быстродействию УЗО, а, во-вторых, зависит от многих факторов — кратности тока короткого замыкания, которая, в свою очередь, зависит от сопротивления проводников, переходного сопротивления в месте повреждения изоляции, длины линий, точности калибровки автоматических выключателей и др.

Наличие на объекте металлических корпусов, арматуры и пр., соединенных с PE - проводником, повышает опасность электропоражения,

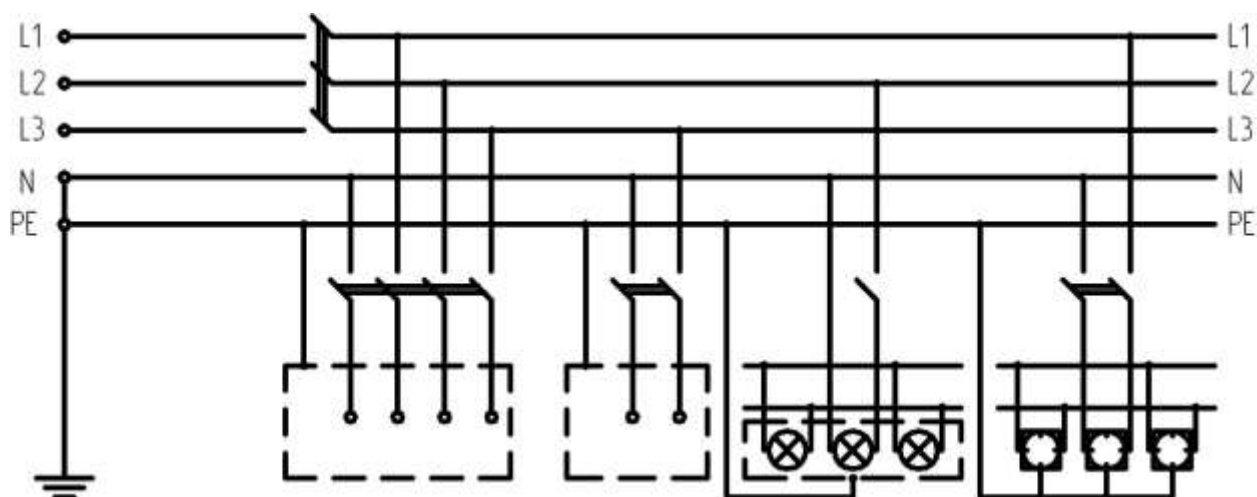


Рисунок 3.2 – Система *TN-S*

поскольку в этом случае вероятность образования цепи «токоведущий проводник — тело человека — земля» гораздо выше. Только УЗО осуществляет защиту от прямого прикосновения.

Внедрение систем *TN - S* и *TN - C - S* в европейских странах, к опыту которых мы вынуждены постоянно обращаться, поскольку там рассматриваемые проблемы решались на два десятилетия раньше, также проходило с большими трудностями. Например, в литературе описан случай, когда электромонтер при подключении одного объекта ошибочно подключил фазу на защитный проводник, что повлекло за собой смертельное поражение нескольких человек.

В плане обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановки серьезной альтернативой вышерассмотренным системам заземления является сравнительно новое, но все более широко применяемое эффективное электрозщитное средство — двойная изоляция.

Достижения химической промышленности в области производства пластиков и керамик, имеющих великолепные механические и электроизоляционные характеристики, позволили значительно расширить ассортимент электробезопасных электроприборов и электроинструментов в исполнении «двойная изоляция», при применении которых тип системы

заземления в плане обеспечения условий электробезопасности не имеет значения. Изделия в исполнении «двойная изоляция» маркируются знаком 0.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно ~~данным~~ методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50 ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	~ 220 В /1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220В /16 А/ 10 мА
<i>A8</i>	Модель заземлителя	390	-220 В / 2,10,100,10000
<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	- 220 В / 0,5 А

Методика и порядок выполнения работы

3.1 Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 3.3.

- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «*П*», в гнездо фазы «*L*» электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 3.3. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 3.1.
- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

Таблица 3.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

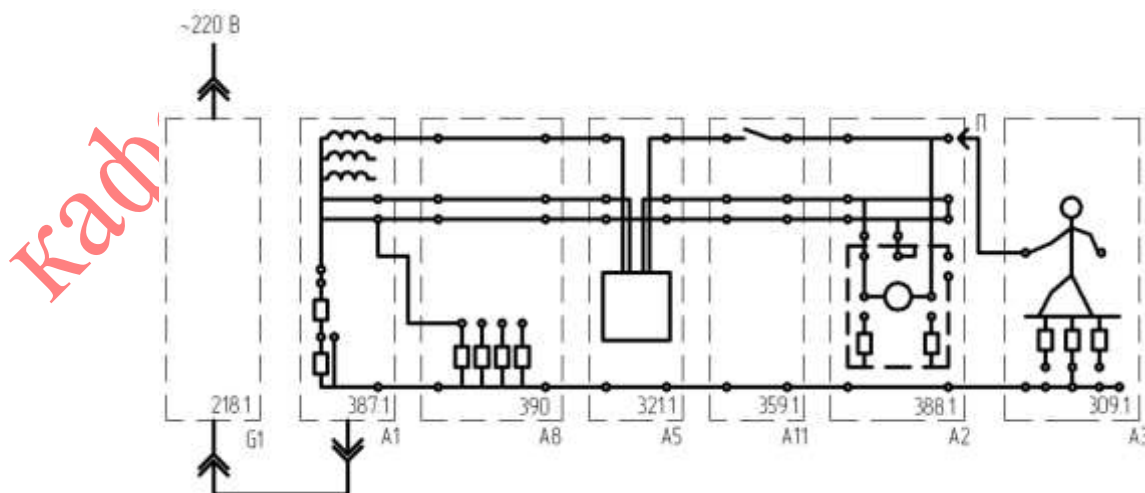


Рисунок 3.3 – Схема для выявления действия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

3.2 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 3.4 а.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «*III* » или «*II2*», в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 3.4 а. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 3.1.
- Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 3.4 б.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «*II*», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 3.4 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель *A11* или устройство защитного отключения *A5* подтверждая, тем самым, действие защиты. По завершении эксперимента отключите

автоматические выключатели однофазного источника питания $G1$ и $A11$, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети $A1$.

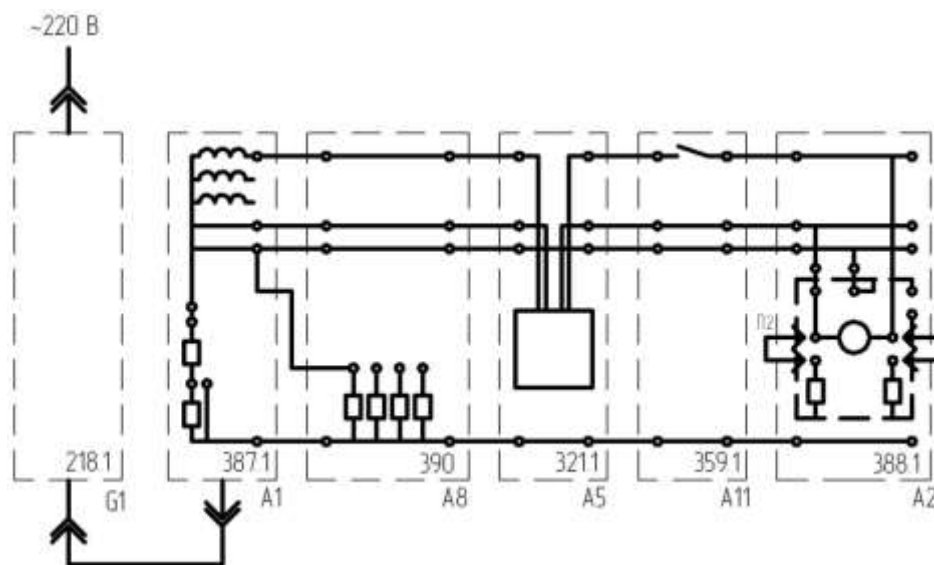


Рисунок 3.4 а – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или рабочего нулевого провода до 1 Ом)

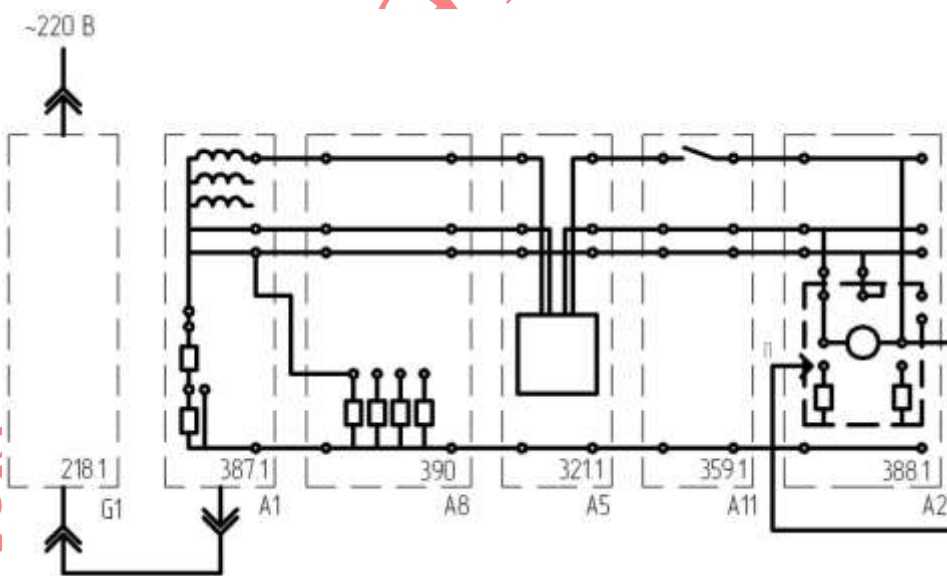


Рисунок 3.4 б – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

3.3 Работа защиты при ошибочном присоединении нулевых рабочего и защитного проводников

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 3.5.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом, должно сработать устройство защитного отключения подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

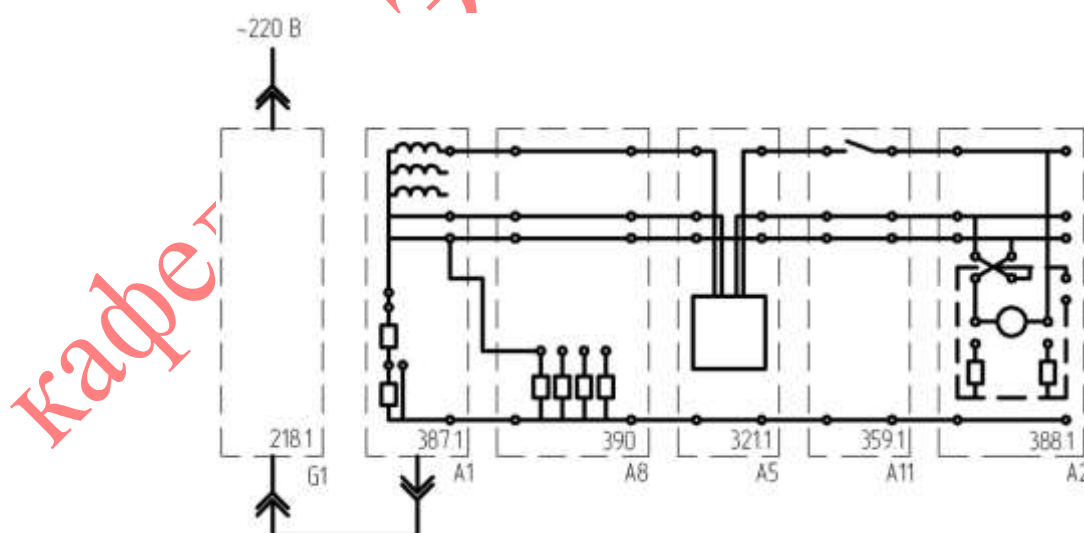


Рисунок 3.5 – Схема для выявления действия защиты при ошибочном соединении нулевых рабочего и защитного проводников

3.4 Работа защиты при обрыве нулевого защитного проводника

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 3.6.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «*П*» в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 3.6. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также – выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*

кафедра АЭ

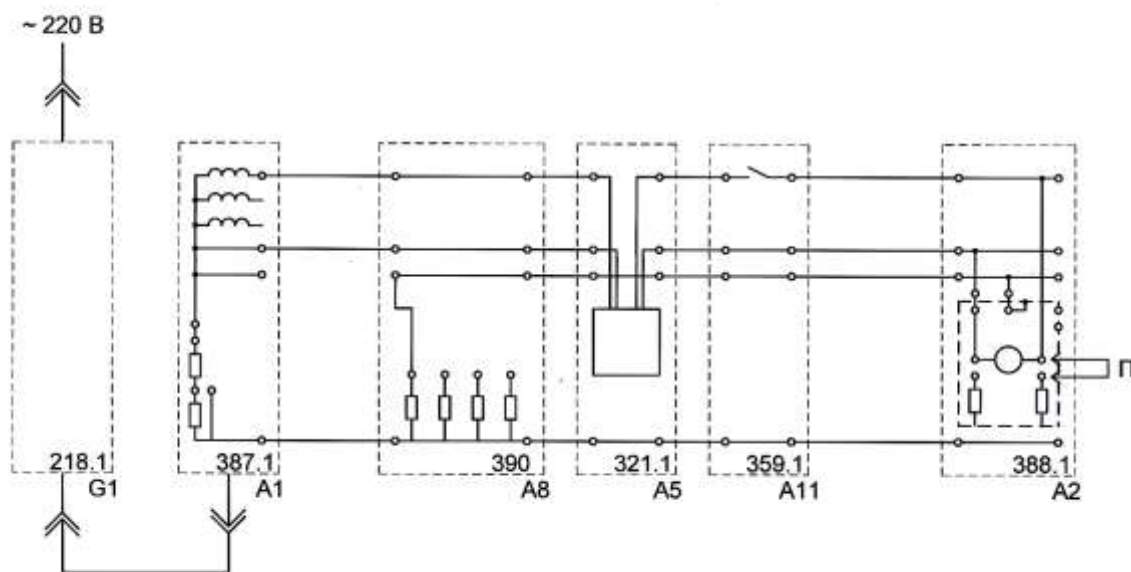


Рисунок 3.6 – Схема для выявления действия защиты при обрыве нулевого защитного проводника

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения.
3. Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением.
4. Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I.
5. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Дать определение системе TN .
2. Дать определение нулевому рабочему проводнику.
3. Дать определение системе $TN - S$.
4. Чем обеспечивается электробезопасность потребителя в электроустановках с системами заземления $TN - S$.
5. Наличие на объекте каких элементов соединенных с PE -проводником, повышает опасность электропоражения и почему.

кафедра АЭСИЭ ИЭЭИН СКФУ

Лабораторная работа № 4

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления $TN - C - S$

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления $TN - C - S$

Теоретическое обоснование

Система TN - система, в которой нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали (занулены) при помощи нулевых защитных проводников.

В электроустановках с системами заземления $TN - S$ и $TN - C - S$ электробезопасность потребителя обеспечивается не собственно системами, а устройствами защитного отключения (УЗО), действующими более эффективно в комплексе с этими системами заземления и системой уравнивания потенциалов.

Собственно сами системы заземления (без УЗО) не обеспечивают необходимой безопасности. Например, при пробое изоляции на корпус электроприбора или какого-либо аппарата, при отсутствии УЗО отключение этого потребителя от сети осуществляется устройствами защиты от сверхтоков – автоматическими выключателями или плавкими вставками.

Быстродействие устройств защиты от сверхтоков, во-первых, уступает быстродействию УЗО, а, во-вторых, зависит от многих факторов – кратности тока короткого замыкания, которая, в свою очередь, зависит от сопротивления проводников, переходного сопротивления в месте

повреждения изоляции, длины линий, точности калибровки автоматических выключателей и др.

Наличие на объекте металлических корпусов, арматуры и пр., соединенных с *PE* – проводником, повышает опасность электропоражения, поскольку в этом случае вероятность образования цепи «токоведущий проводник – тело человека – земля» гораздо выше. Только УЗО осуществляет защиту от прямого прикосновения.

Внедрение систем *TN - S* и *TN - C - S* в европейских странах, к опыту которых мы вынуждены постоянно обращаться, поскольку там рассматриваемые проблемы решались на два десятилетия раньше, также проходило с большими трудностями. Например, в литературе описан случай, когда электромонтер при подключении одного объекта ошибочно подключил фазу на защитный проводник, что повлекло за собой смертельное поражение нескольких человек.

В плане обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановки серьезной альтернативой вышерассмотренным системам заземления является сравнительно новое, но все более широко применяемое эффективное электротехническое средство – двойная изоляция.

Достижения химической промышленности в области производства пластиков и керамик, имеющих великолепные механические и электроизоляционные характеристики, позволили значительно расширить ассортимент электробезопасных электроприборов и электроинструментов в исполнении «двойная изоляция», при применении которых тип системы заземления в плане обеспечения условий электробезопасности не имеет значения. Изделия в исполнении «двойная изоляция» маркируются знаком *0*.

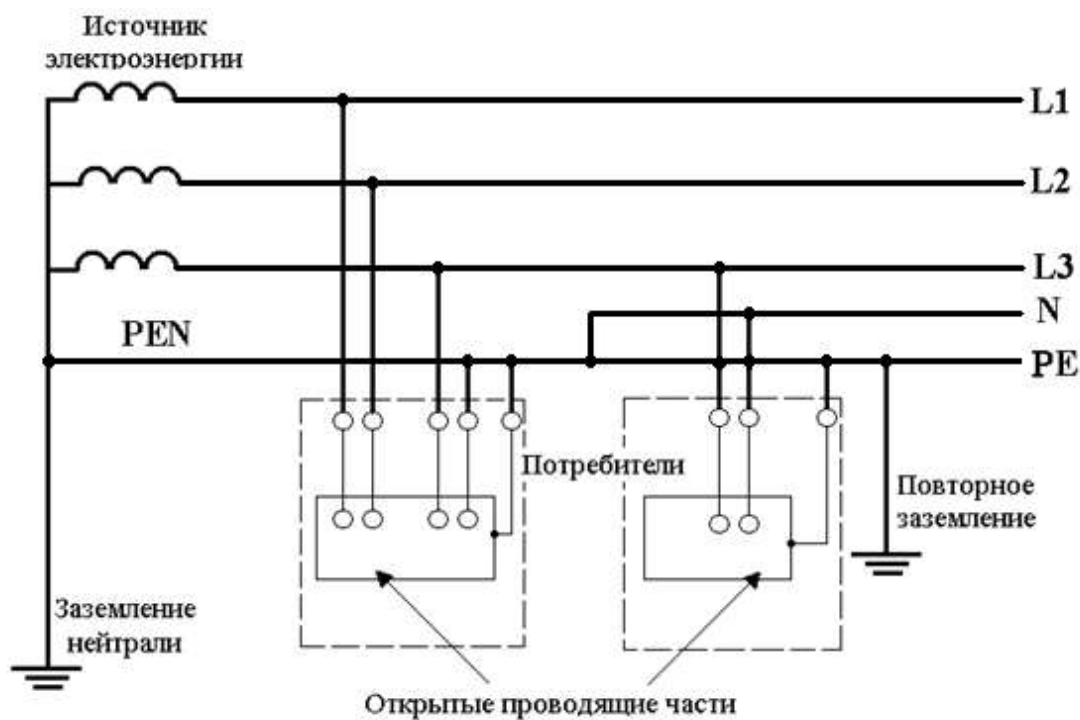


Рисунок 4.1 – Система $TN - C - S$

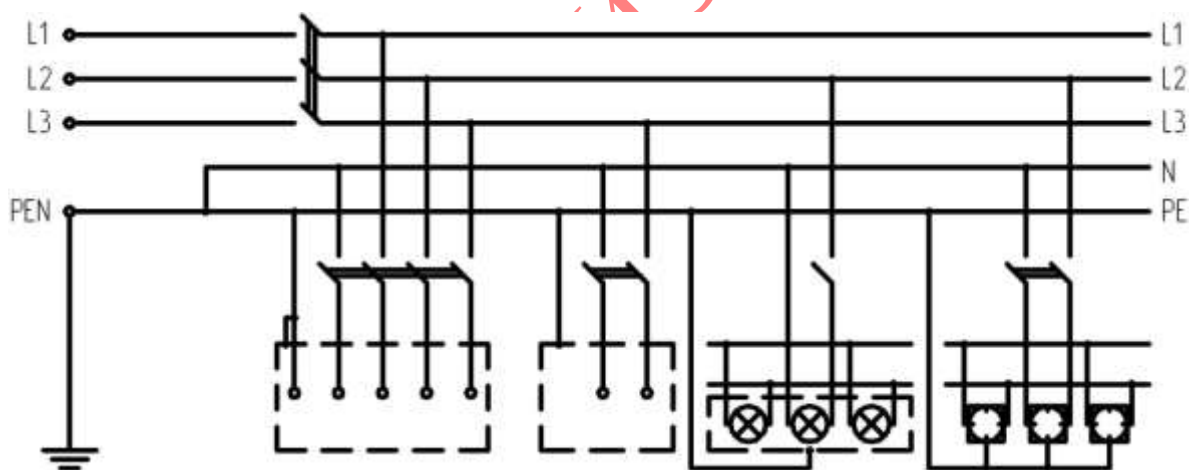


Рисунок 4.2 – Система $TN - C - S$

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	- 220 В /1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220 В /16 А/ 10 мА
<i>A8</i>	Модель заземлителя	390	-220 В /
<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	- 220 В / 0,5 А

Методика и порядок выполнения работы

4.1 Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 4.3.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «*П*», в гнездо фазы «*L*» электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 6.1. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая,

тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 4.1.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания $G1$ и $A11$, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети $A1$.

Таблица 4.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

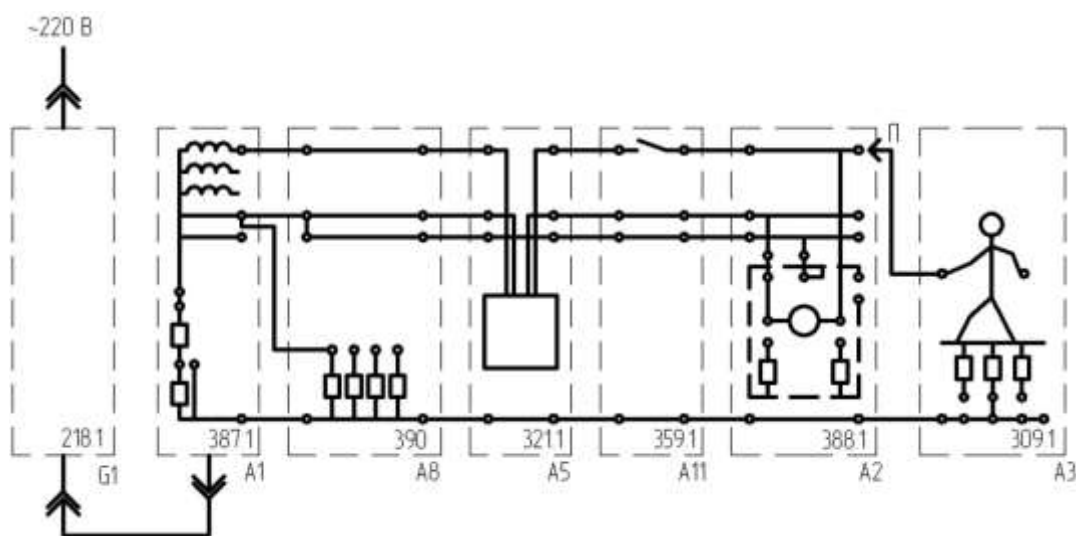


Рисунок 4.3 – Схема для выявления действия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

4.2 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 4.4 а.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели $A1$ питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания $G1$.

- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *АН*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «Ш» или «П2», в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 4.4 а. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты.
- Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 4.4 б.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «П», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 4.4 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель *A11* или устройство защитного отключения *A5* подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

кафедра АИ

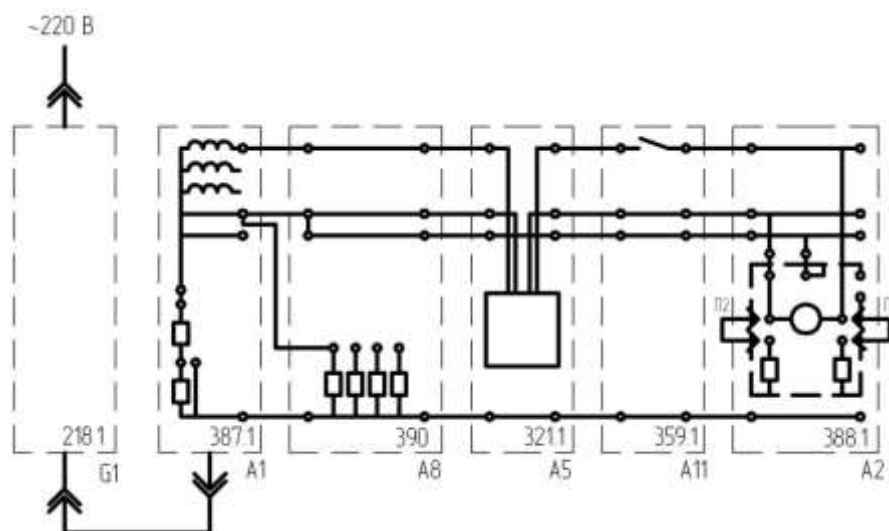


Рисунок 4.4 а – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или - рабочего нулевого провода до 1 Ом)

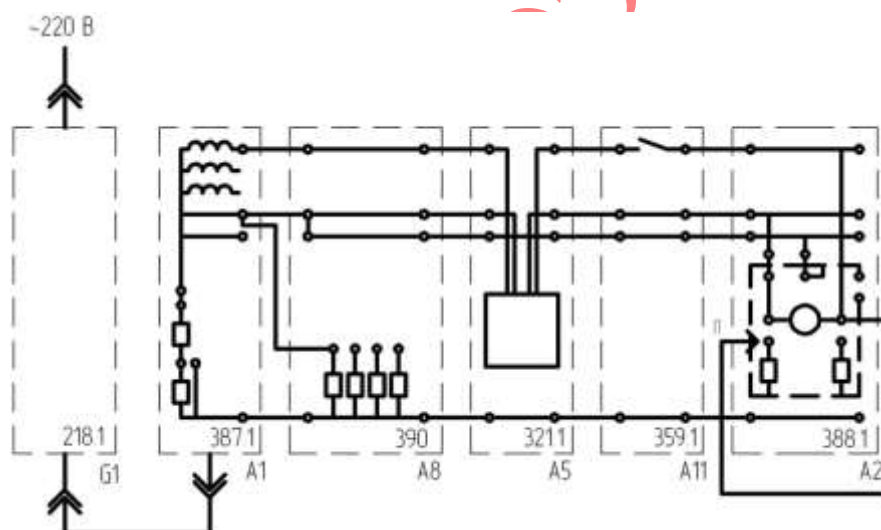


Рисунок 4.4 б – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса I (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

4.3 Работа защиты при ошибочном присоединении нулевых рабочего и защитного проводников

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической

соединений, приведенной на рисунке 4.5.

- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *AH*. При этом должно сработать устройство защитного отключения подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

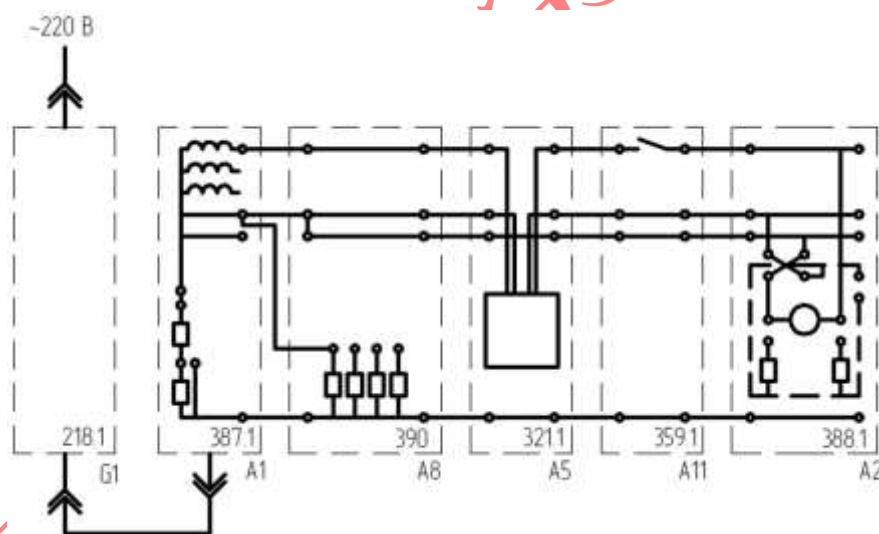


Рисунок 4.5 – Схема для выявления действия защиты при ошибочном присоединении нулевых рабочего и защитного проводников

4.4 Работа защиты при обрыве нулевого защитного проводника

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 4.6.

- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *AH*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «П» в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 4.6. При этом должно отключиться устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

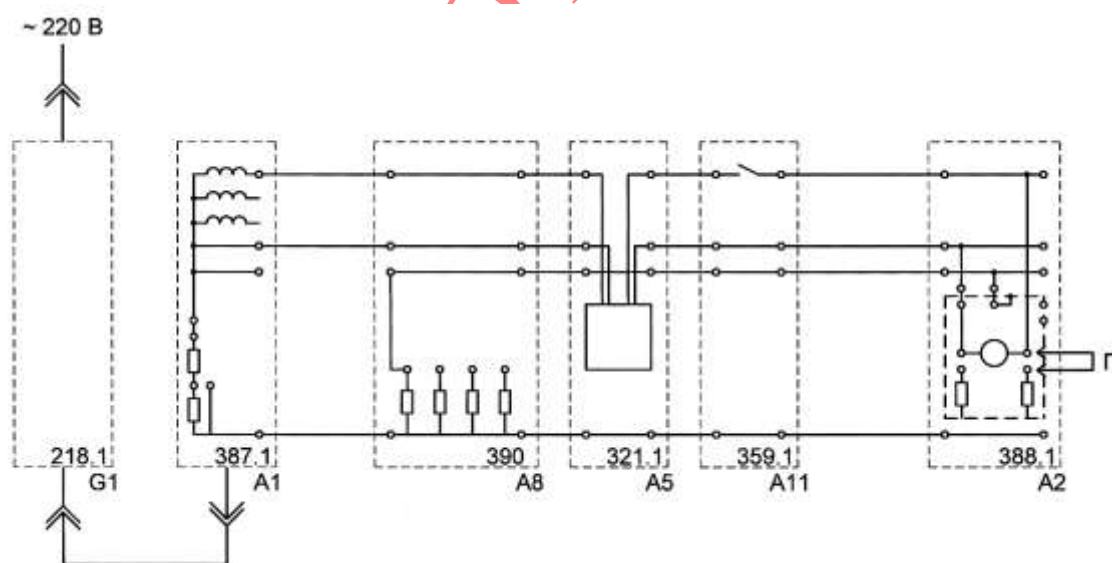


Рисунок 4.6 – Схема для выявления действия защиты при обрыве нулевого защитного проводника

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения.
3. Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением.
4. Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I.
5. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Дать определение системе TN .
2. Дать определение системе $TN - C - S$.
3. Чем обеспечивается электробезопасность потребителя в электроустановках с системами заземления $TN - C - S$.
4. Наличие на объекте каких элементов соединенных с PE -проводником, повышает опасность электропоражения и почему.

Лабораторная работа №5

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TT*

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TT*

Теоретическое обоснование

Система *TT* – система, в которой нейтраль источника электроэнергии глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземленной нейтрали источника.

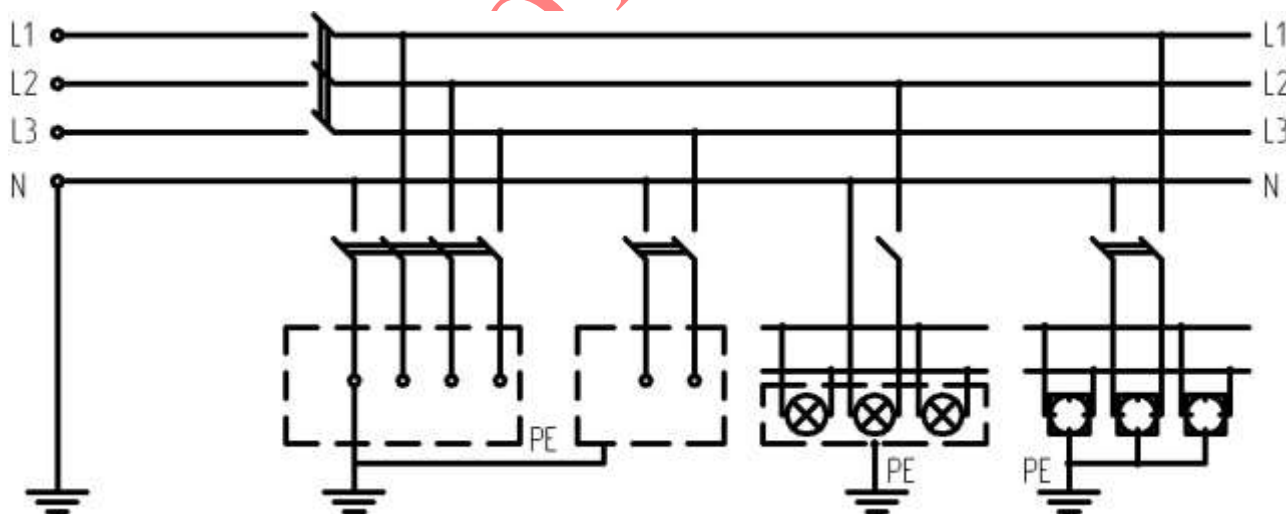


Рисунок 5.1 – Схема заземления *TT*

Рассмотрим систему *TT* (рисунок 5.1). Все открытые проводящие части, защищенные одним защитным устройством, должны присоединяться защитным проводником к одному заземляющему устройству. Если несколько защитных устройств установлены последовательно, то это требование применяется отдельно к каждой группе открытых проводящих частей,

защищаемой каждым устройством.

Нейтральная точка или, если таковой не существует, фаза питающего генератора, или трансформатора должны быть заземлены. Должно выполняться следующее условие: $R_A \cdot I_a < 50$ В, где R_A — суммарное сопротивление заземлителя и заземляющего проводника; I_a — ток срабатывания защитного устройства.

Если защитное устройство является устройством защитного отключения и реагирует на дифференциальный ток, то под I_a подразумевается уставка защитного устройства по дифференциальному току I_{Dn} .

Если защитное устройство — устройство защиты от сверхтока, то оно должно быть либо устройством с обратно зависимой времятоковой характеристикой и I_a — значение тока, обеспечивающее время срабатывания устройства не более 5 с, либо устройством с отсечкой тока и тогда I_a — уставка по току отсечки.

В системе TT устройства защиты от сверхтока могут использоваться для защиты от косвенного прикосновения только в электроустановках имеющих заземляющие устройства с очень малым сопротивлением.

При этом гарантированное отключение питания электроустановки должно производиться при появлении на открытых проводящих частях электроустановки напряжения не более 50 В.

На рисунке 5.2 показан пример применения УЗО в электроустановке системы TT .

В реальных условиях осуществить автоматическое отключение питания электроустановки системы TT с помощью автоматических выключателей по ряду причин (необходимости обеспечения большой кратности тока короткого замыкания, низкого сопротивления заземляющего устройства и др.) весьма проблематично.

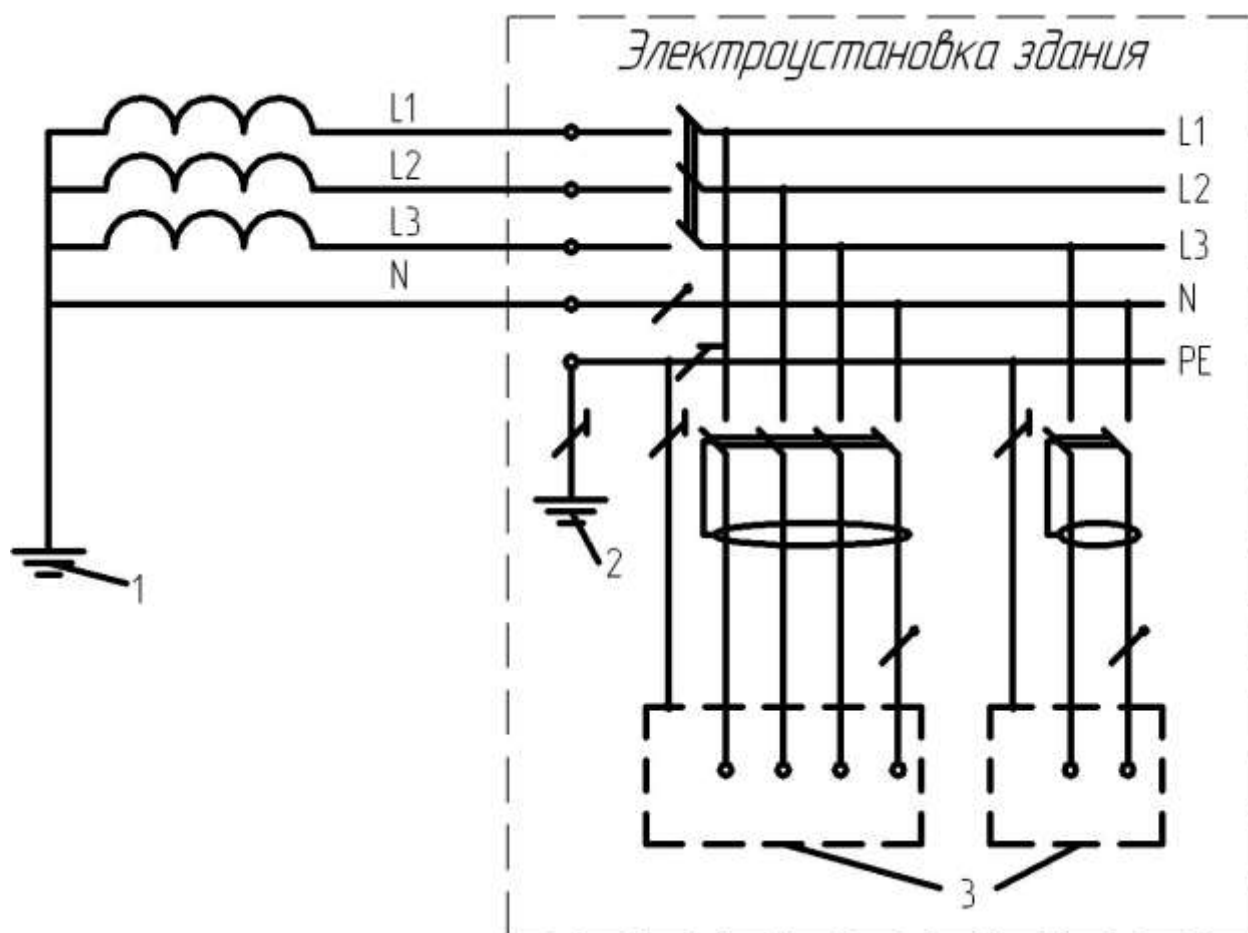


Рисунок 5.2 – Применение УЗО в системе *TT*

- 1 - заземление источника питания;
- 2 - защитное заземление электроустановки здания;
- 3 - открытые проводящие части.

Эффективное решение проблемы автоматического отключения питания дает применение чувствительных УЗО.

Для обеспечения условий электробезопасности в системе *TT* применения УЗО обязательно. При этом уставка (номинальный отключающий дифференциальный ток) должна быть меньше значения тока замыкания на заземленные открытые проводящие части при напряжении на них 50 В относительно зоны нулевого потенциала.

Это означает, что в электроустановках индивидуальных жилых домов, коттеджей, дачных (садовых) домов и других частных сооружений, где не всегда имеется возможность выполнить заземлитель с требуемыми нормами

параметрами, необходимо применять систему *TT* с обязательной установкой УЗО. В этом случае требования к значению сопротивления заземлителя значительно снижаются

Допустимые значения сопротивления заземления *R* в зависимости от номинального отключающего дифференциального тока *I* применяемого УЗО приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Допустимые значения сопротивления заземления *R* в зависимости от номинального отключающего дифференциального тока

<i>I</i> , мА	10	30	100	300	500
<i>R</i> , Ом	5000	1650	500	165	100

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.


Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	- 220 В/1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220В /16А/ 10
<i>A8,A12</i>	Модель заземлителя	390	-220 В / 2,10,100, 10000
<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	-220 В /0,5 А

Методика и порядок выполнения работы

5.1 Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 5.3.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «*И*», в гнездо фазы «*L*» электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 5.3. При этом должно сработать устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 5.2.
- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

 Таблица 5.2 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

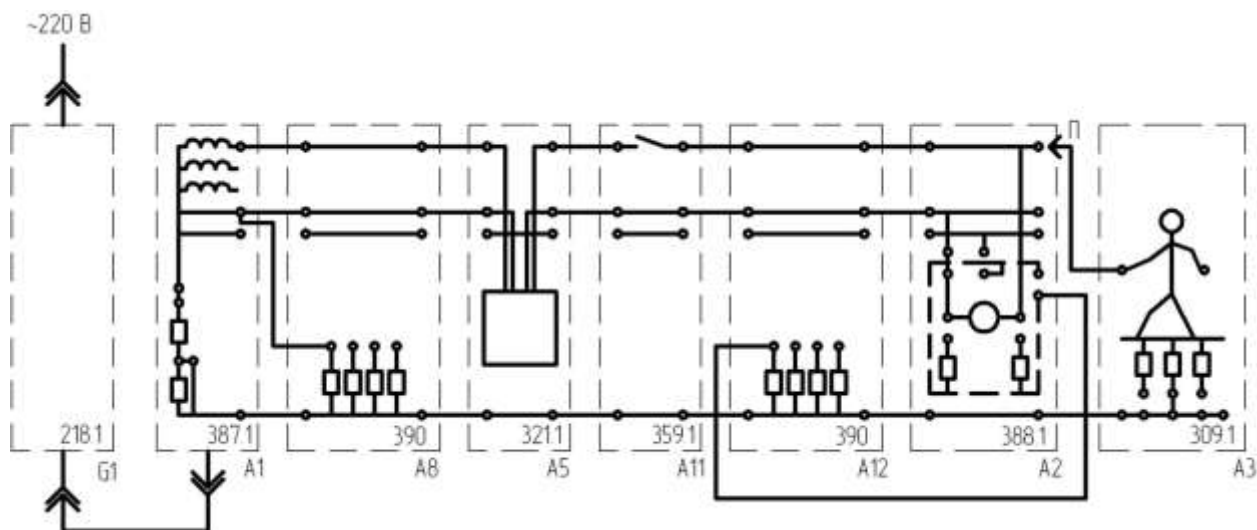


Рисунок 5.3 – Схема для выявления действия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

5.2 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса 01

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 5.4 а.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «Ш» или «П2», в гнезда электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 5.4 а. При этом должно сработать устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты.

• Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 5.4 б.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «Л», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 5.4 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель *A11* или сработать устройство защитного отключения *A5* подтверждая, тем самым, действие защиты.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

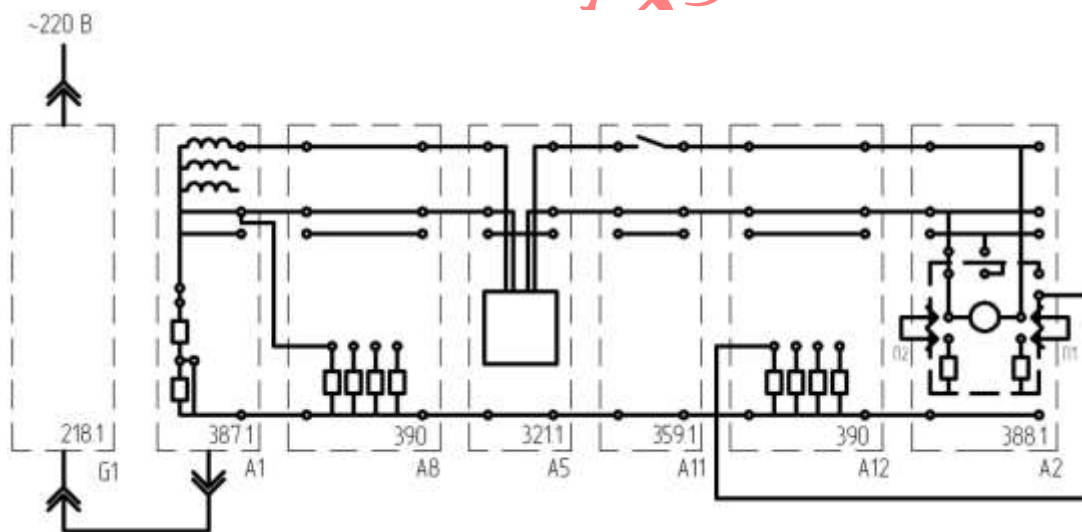


Рисунок 5.4 а – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса 01 (снижении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или - рабочего нулевого провода до 1 Ом)

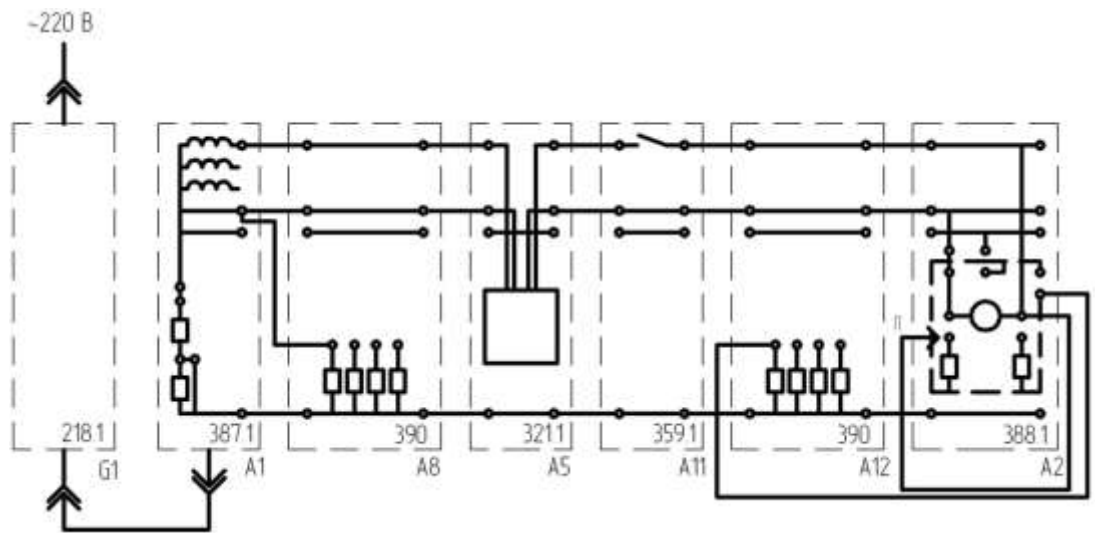


Рисунок 5.4 б – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса 01 (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

- 1 Название и цель лабораторной работы.
- 2 Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения
- 3 Подтверждение отсутствия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением
- 4 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса I
5. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1 Дать определение системе TT .

2 Каковы причины проблематичного автоматического отключения в реальных условиях питания электроустановки системы TT .

3 В каких случаях необходимо применять систему TT с обязательной установкой УЗО.

4 Если не существует нейтральной точки, какие элементы должны быть заземлены.

кафедра АЭСИЭ ИЭЭИН СКФУ

Лабораторная работа № 6

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *IT*

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *IT*

Теоретическое обоснование

Система *IT* – система, в которой нейтраль источника электроэнергии изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющее большое сопротивление, а открытые проводящие части электроустановки заземлены (см. рисунок 6.1). В этом случае защитный заземляющий проводник обозначается так же, как и нулевой защитный проводник, т.е. *PE* – проводник

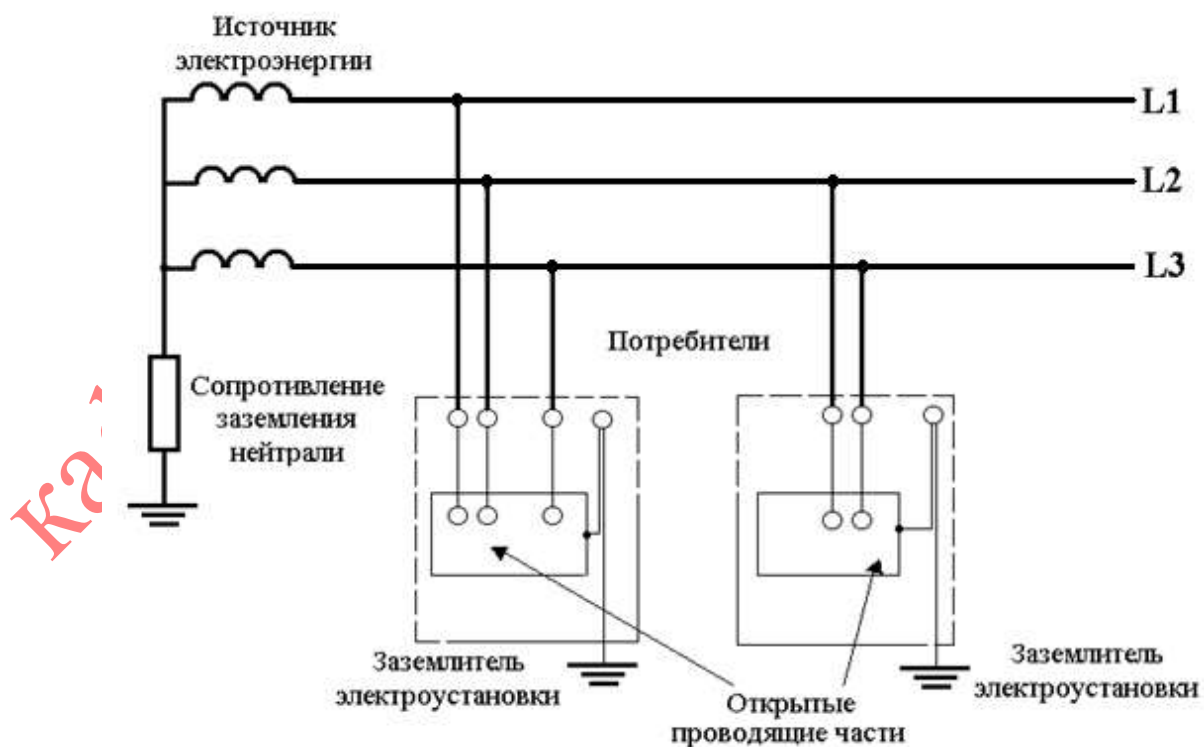


Рисунок 6.1 – Система *IT*

Анализ электробезопасности сетей типа IT

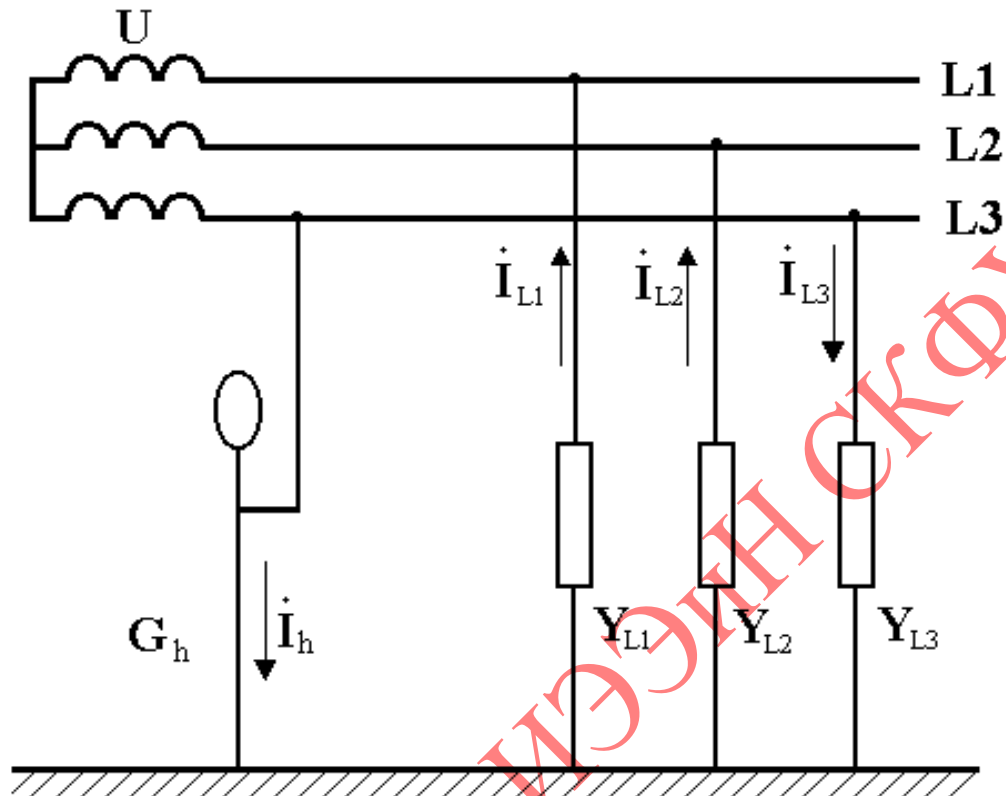


Рисунок 6.2 – Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа IT при нормальном режиме работы

Для трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью типа IT, напряжением до 1 кВ (рисунок 6.2) характерным является то, что 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, при условии, что $Y_0 = 0$; $Y_{PEN} = 0$:

$$I_h^* = U \cdot G_h \cdot \frac{Y_{L2}(1 - a^2) + Y_{L3}(1 - a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h}, U_h^* = U \cdot \frac{Y_{L2}(1 - a^2) + Y_{L3}(1 - a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h},$$

где Y_{L1} , Y_{L2} , Y_{L3} – полные проводимости изоляции фазных проводов относительно земли в комплексной форме:

$$Y_{L1} = \frac{1}{R_{L1}} + j\omega \cdot C_{L1}; Y_{L2} = \frac{1}{R_{L2}} + j\omega \cdot C_{L2}; Y_{L3} = \frac{1}{R_{L3}} + j\omega \cdot C_{L3};$$

U – действующее значение фазного напряжения сети;

$G_h = 1/R_h$ – проводимость тела человека;

ω – фазный оператор трехфазной системы, учитывающий сдвиг фаз.

При равенстве проводимостей фазных проводов относительно земли $Y_{L1} = Y_{L2} = Y_{L3} = Y$ (т.е. при равенстве сопротивлений изоляции и емкостей фазных проводов относительно земли $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$ и $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C$) ток через тело человека и напряжение прикосновения определяется:

$$I_h^* = U \cdot G_h \cdot \frac{3 \cdot Y}{3 \cdot Y + G_h};$$

или

$$I_h^* = \frac{U}{R_h + Z/3},$$

где Z – полное сопротивление фазного провода относительно земли в комплексной форме

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega \cdot C},$$

где R – активное сопротивление изоляции фазного провода относительно земли; C – емкость фазного провода относительно земли.

В действительной форме этот ток равен

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

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

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3}.$$

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 опасность уменьшается. Этот вывод иллюстрируется графиками зависимости $I_h = f(R)$ при $C = 0$ (что может иметь место в коротких сетях) и $I_h = f(C)$ при $R = \text{const}$, представленными на рисунке 6.3.

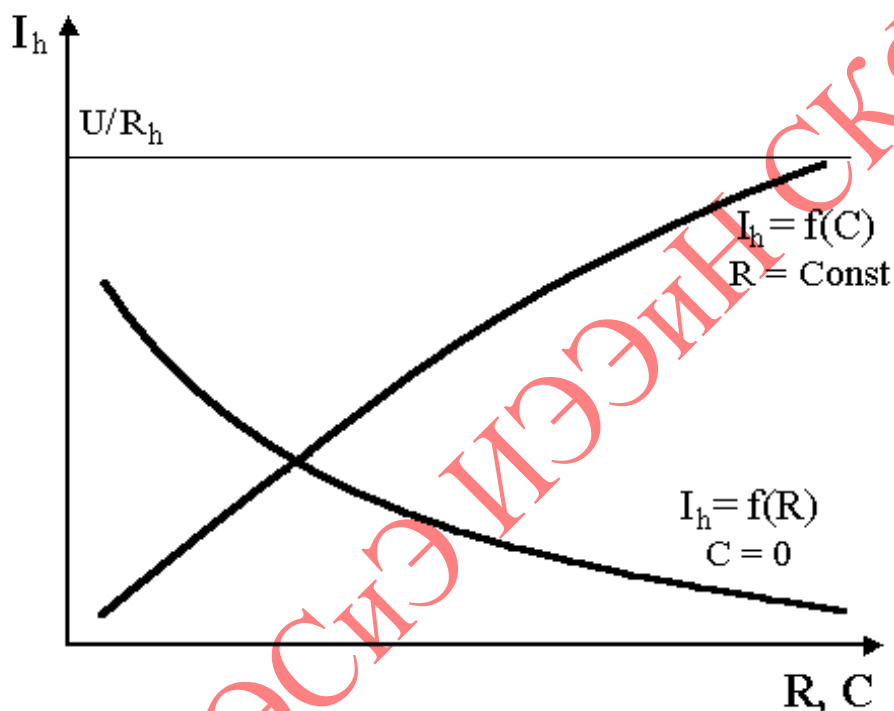


Рисунок 6.3 – Зависимость значения тока, протекающего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу в сети IT с симметричными параметрами в нормальном режиме работы, от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли

При аварийном режиме работы сети (рисунок 6.4), когда один из фазных проводов, например, провод L_2 , замкнулся на землю, опасность поражения током человека, прикоснувшегося к исправному фазному проводу, значительно возрастает.

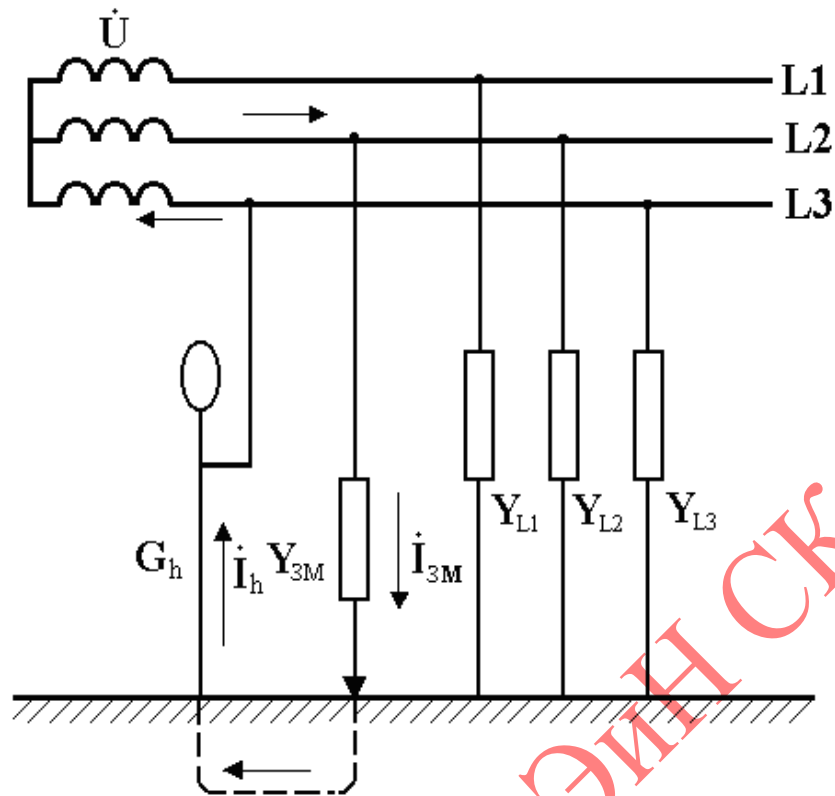


Рисунок 6.4 – Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при аварийном режиме работы

В этом случае ток через тело человека будет равен:

$$I_h = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{R_h + R_{3M}},$$

где R_{3M} – сопротивление растеканию тока в месте замыкания фазного провода на землю (на рисунке 6.4 – фазного провода L_2).

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

$$I_h = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{R_h}; U_h = U \cdot \sqrt{3}.$$

При аварийном режиме работы сети типа *IT*, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (рисунке 6.5; человек касается фазного провода L_3) ток через тело человека будет определяться падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю R_{3M} :

$$I_h = \frac{I_{3M} \cdot R_{3M}}{R_h} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2,$$

где I_{3M} – ток замыкания на землю; α_1, α_2 – коэффициенты напряжения прикосновения.

При $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

$$I_h = \frac{I_{3M} \cdot R_{3M}}{R_h}$$

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

$$I_{3M} = \frac{U}{(R_{3M} + Z/3)}$$

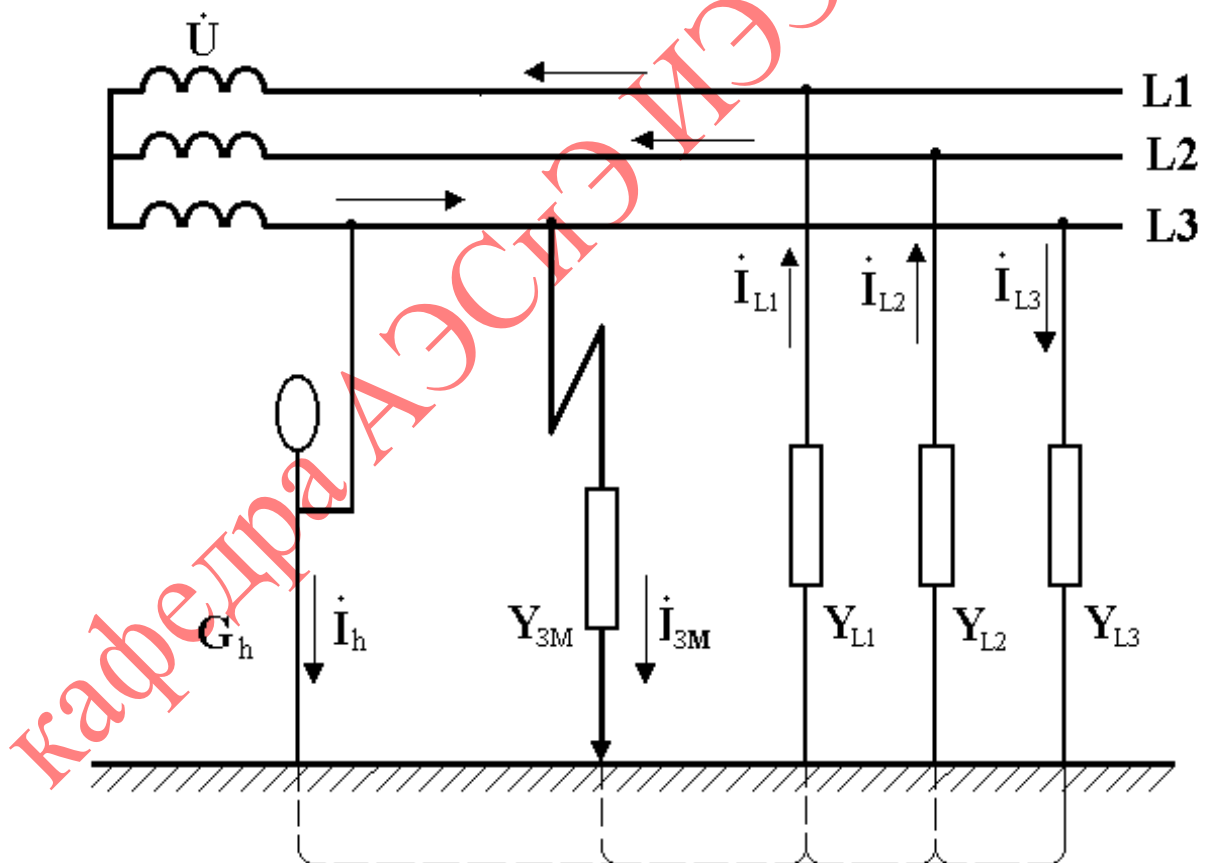


Рисунок 6.5 – Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

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.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Ти	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	- 220 В /1 кОм
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220 В /16 А/ 10мА
<i>A7</i>	Модель участка электрической сети	303.1	- 220 В / 0,5 А
<i>A8</i>	Модель заземлителя	390	-220 В / 2, 10, 100, 10000
<i>A10</i>	Разделительный трансформатор	391	25 ВА 220/220 В
<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	-220 В /0,5 А
<i>P1</i>	Блок мультиметров	509.2	2мультиметра 0...1000В=; ; 0...10А^

Методика и порядок выполнения работы

6.1 Подтверждение нецелесообразности применения устройства защитного отключения

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 6.1.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте нарушение изоляции фазы втыканием конца проводника «*I*» в гнездо источника *G1*, как это показано на рисунке 6.1. При этом должно ложно сработать устройство защитного отключения *A5*, что подтверждает нецелесообразность его применения в этом случае.
- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

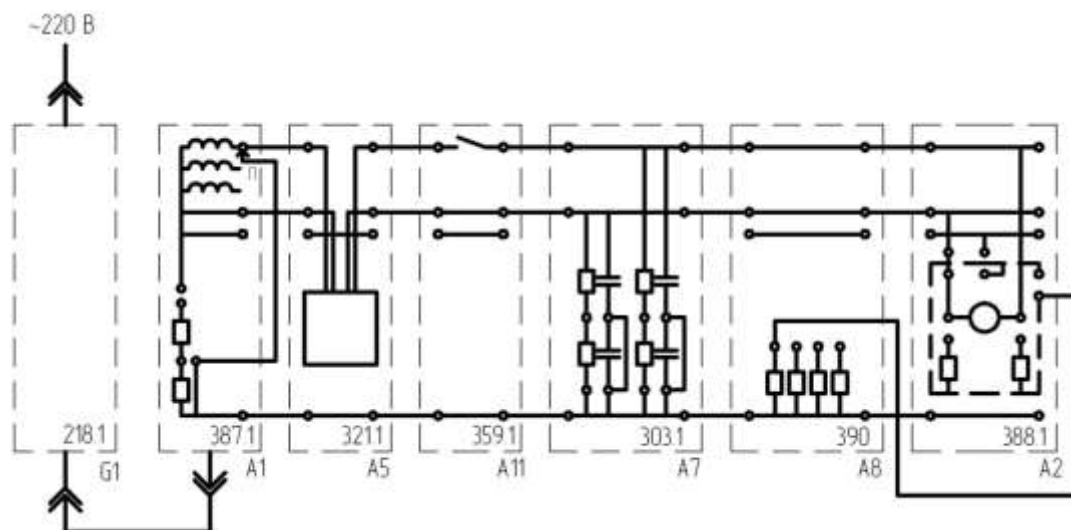


Рисунок 6.1 – Схема для подтверждения нецелесообразности применения устройства защитного отключения

6.2 Контроль изоляции электрической сети

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 6.2.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение изоляции электрической сети втыканием перемычки «*П2*» в гнезда модели сети *A7*, как это показано на рисунке 6.2.
- Втыкая проводник «*Ш*» в гнезда *1* и *2* измерьте амперметром блока мультиметров *P1* токи утечки через изоляцию сети и по их величинам судите о состоянии изоляции.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

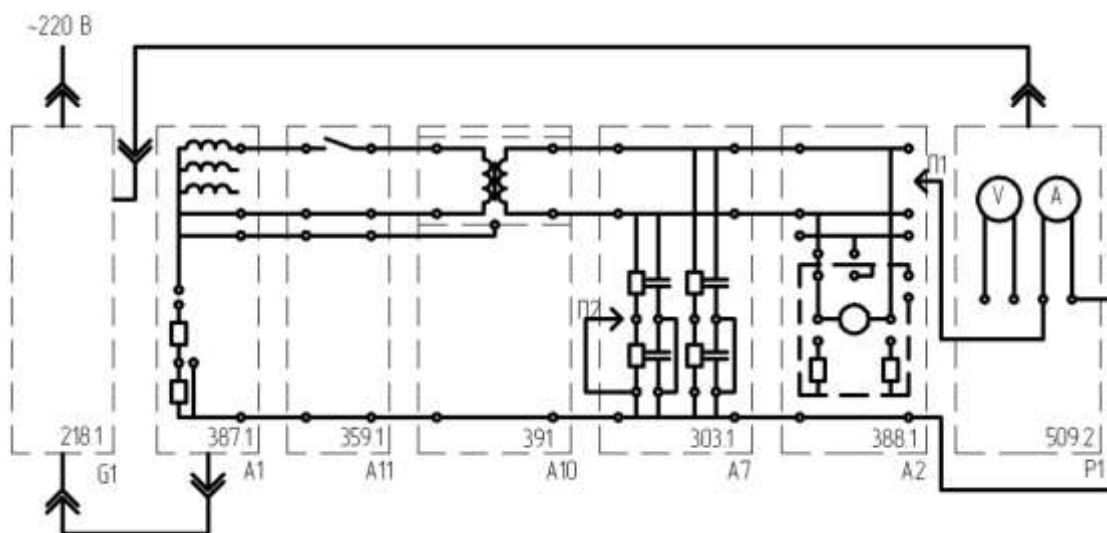


Рисунок 6.2 – Схема для контроля изоляции электрической сети

6.3 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса 01

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 6.3.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника

втыканием конца проводника «П» в гнездо электроприемника $A2$, как это показано на рисунке 6.3.

- Измерьте амперметром блока мультиметров $P1$ ток через тело человека и по его величинам судите о работе защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 6.1.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания $G1$ и $A11$, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети $A1$.

Таблица 6.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

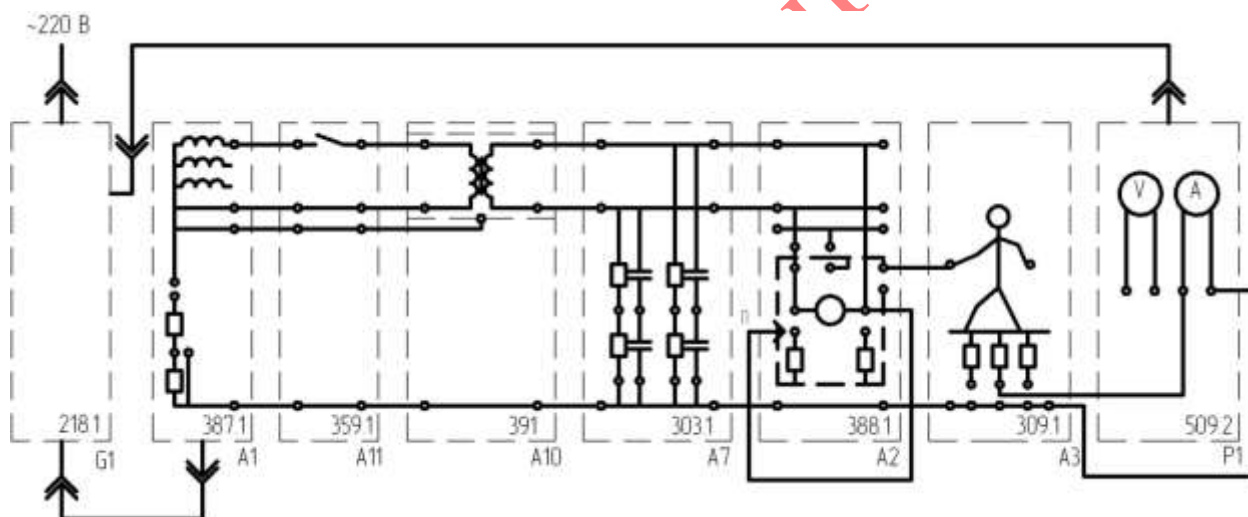


Рисунок 6.3 – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса 01 (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Нецелесообразность применения устройств защитного отключения.
3. Контроль и изоляция электрической сети
4. Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса 01.
5. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета в форме устного опроса.

1. Дать анализ электробезопасности сетей типа *IT*.
2. Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при аварийном режиме работы.
3. Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при аварийном режиме работы.
4. Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при нормальном режиме работы.

Лабораторная работа № 7

Защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TI*

Цель и содержание работы

Целью данной работы является защита человека от поражения электрическим током в электроустановках с системой заземления *TI*

Теоретическое обоснование

Методические указания и теоретические сведения смотри лабораторную работу № 6

Тип заземления системы – понятие, определяющее взаимоотношение заземления разных элементов электрической системы, состоящей из источника питания (обычно трансформаторной подстанции), линии электропередачи и электроустановок и здания.

Тип системы заземления в сетях низкого напряжения характеризует способ заземления вторичной обмотки трансформатора (обычно нейтрали) и открытых проводящих частей электроустановок, питающихся от этого трансформатора. Идентификация типа системы заземления осуществляется посредством двух букв:

а) первая буква определяет характер связи нейтрали трансформатора с землей:

T – нейтраль заземлена;

I – нейтраль изолирована от земли

б) вторая буква определяет характер связи открытых проводящих частей с землей:

T – открытые проводящие части непосредственно присоединены к земле;

N – открытые проводящие части присоединены к заземленной нейтрали трансформатора

Последующие буквы, если таковые есть, показывают организацию нейтрального и защитного проводника:

S – защитный проводник (*PE*) отделен от нейтрального (*N*).

C – функции защитного и нейтрального проводника объединены в одном проводнике (*PEN*)

C - S – в головной части системы (от источника питания) функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника выполняет *PEN* проводник, а в части электроустановки здания делается разделение *PEN* проводника на защитный проводник *PE* и рабочий проводник *N*.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде Инженерно-производственного центра «Учебная техника» и данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /16 А
<i>A1</i>	Модель питающей электрической сети	387.1	-220 В /50ВА
<i>A2</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.1	-220 В
<i>A3</i>	Модель человека	309.1	- 220 В /1 кОм
<i>A4</i>	Модель электроприемника с рабочей изоляцией	388.2	-220 В
<i>A5</i>	Устройство защитного отключения	321.1	-220 В /16 А/ 10мА
<i>A8</i>	Модель заземлителя	390	-220 В / 2, 10, 100, 10000

<i>A11</i>	Автоматический однополюсный выключатель	359.1	-220 В /0,5 А
------------	---	-------	---------------

Методика и порядок выполнения работы

7.1 Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям находящимся под напряжением

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 7.1.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «*П*», в гнездо фазы «*L*» электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 6.6. При этом должно сработать устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 7.1.
- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

Таблица 7.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Рука-рука 1 кОм	Рука-нога 2 кОм	Рука-нога 11 кОм	Рука-нога 101 кОм

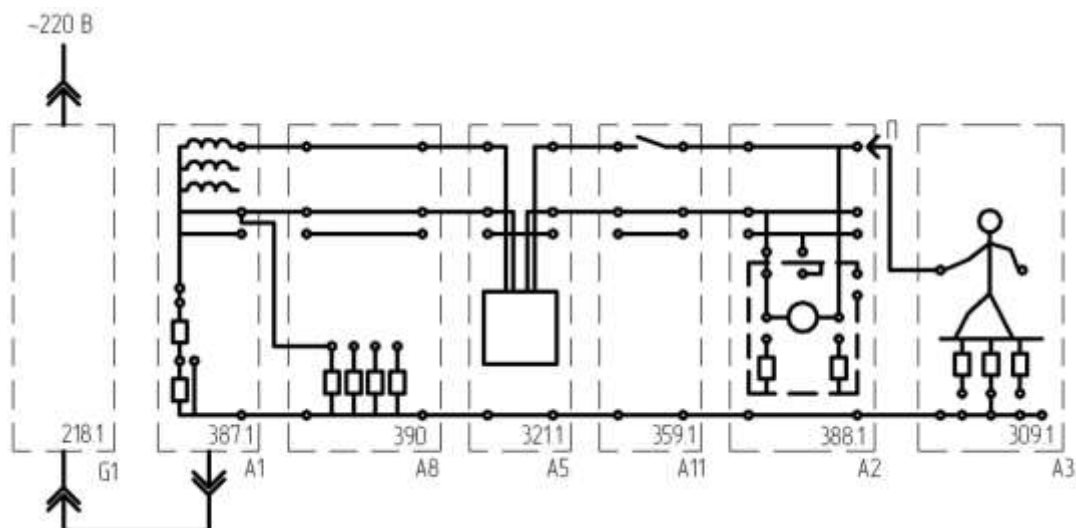


Рисунок 7.1 – Схема для выявления действия защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением

7.2 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса 0

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 7.2 а.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием перемычки «III» в гнезда электроприемника *A2*, как это показано

на рисунке 7.2 а. При этом должно сработать устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 7.1.

- Отключите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 7.2 б.

- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Смоделируйте повреждение основной изоляции электроприемника втыканием конца проводника «Л», в гнездо электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 7.2 б. При этом должен отключиться автоматический выключатель *A11* и сработать устройство защитного отключения *A5* подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 7.1.

По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

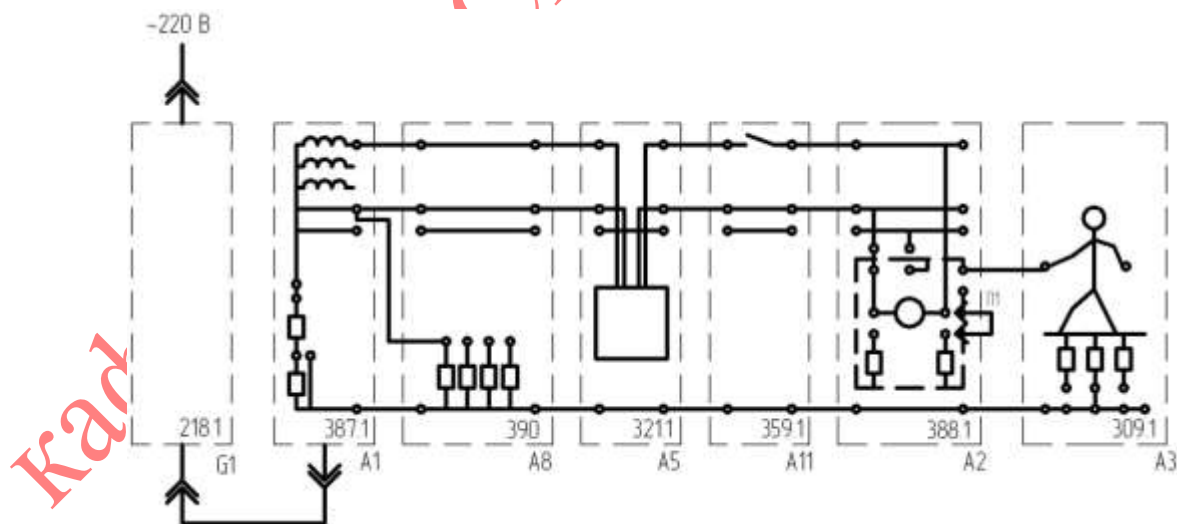


Рисунок 7.2 а – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса 0 (снижении сопротивления изоляции фазы до 15 кОм или – рабочего нулевого провода до 1 Ом)

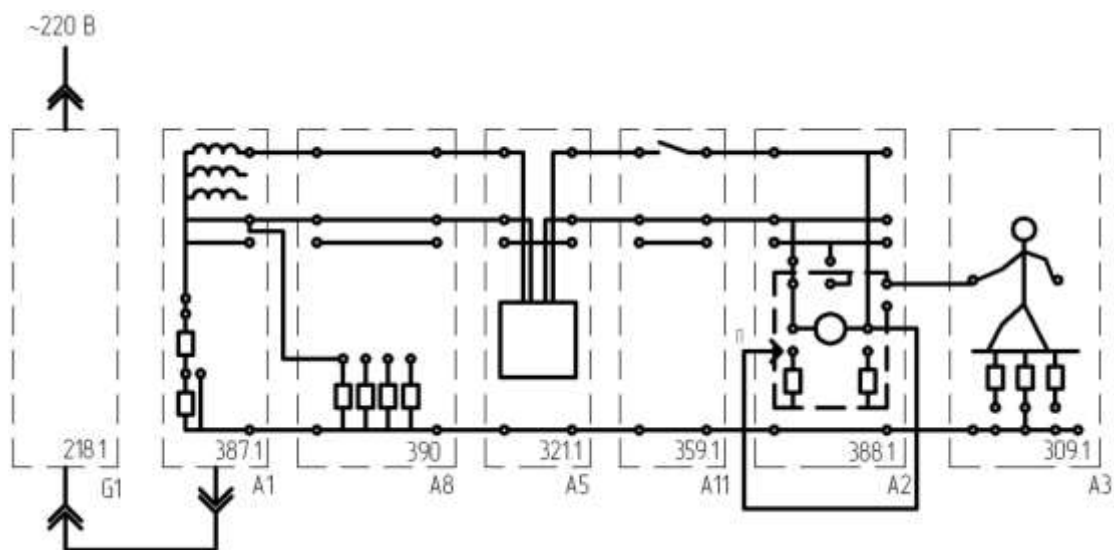


Рисунок 7.2 б – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса 0 (снижении сопротивления изоляции фазы до 1 Ом)

7.3 Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса II

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке 7.3.
- Отключите (если включен) выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1* питающей электрической сети.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания *G1*.
- Включите устройство защитного отключения *A5*.
- Включите выключатель «ПИТАНИЕ» модели *A1*.
- Включите автоматический выключатель *A11*. При этом должна загореться индикаторная лампа модели электроприемника *A2*.
- Смоделируйте прямое прикосновение человека к частям, находящимся под напряжением, втыканием конца проводника «II», в гнездо

фазы «L» электроприемника *A2*, как это показано на рисунке 7.3. При этом должно сработать устройство защитного отключения *A5*, подтверждая, тем самым, действие защиты. Сопротивление тела человека и путь прохождения тока выбирается по таблице 7.1.

- По завершении эксперимента отключите автоматические выключатели однофазного источника питания *G1* и *A11*, а также - выключатель «ПИТАНИЕ» модели питающей электрической сети *A1*.

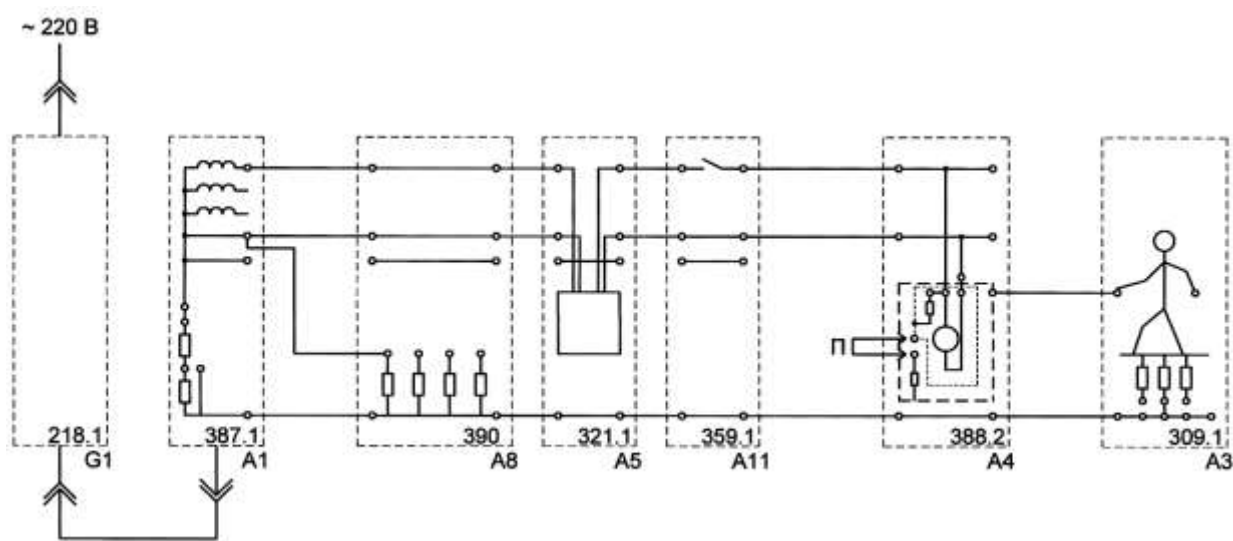


Рисунок 7.3 – Схема для выявления действия защиты при повреждении рабочей изоляции электроприемника класса II

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Работа защиты при прямом прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением.
3. Работа защиты при повреждении основной изоляции электроприемника класса 0.

4. Нецелесообразность применения устройств защитного отключения.
5. Контроль и изоляция электрической сети.
6. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета в форме устного опроса.

1. Дать анализ электробезопасности сетей типа *IT*.
2. Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при аварийном режиме работы.
3. Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при аварийном режиме работы.
4. Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при нормальном режиме работы.

Лабораторная работа № 8

Определение влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности

Цель и содержание работы

Целью данной работы является оценка опасности поражения электрическим током в зависимости от:

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

Теоретическое обоснование

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 четырех-проводные сети с глухо заземлённой 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 трех-фазных электрических сетей, можно сделать вывод, что наиболее опасным является двухфазное прикосновение при любом режиме нейтрали.

В этом случае ток, проходящий через тело человека $I_{ч}$, определяется линейным напряжением $U_{л}$ и сопротивлением его тела $R_{ч}$:

$$I_{ч} = U_{л} / R_{ч} \quad \text{и} \quad U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$$

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:

$$I_h = U_{\phi} / (R_{ч} + Z/3),$$

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:

$$I_{ч} = \frac{U_{\phi}}{R_{ч}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r \cdot (r + 6 \cdot R_{ч})}{9 \cdot R_{ч}^2 \cdot (r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}}$$

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

$$I_{ч} = \frac{U_{\phi}}{R_{ч} + r/3} = \frac{3 \cdot U_{\phi}}{3 \cdot R_{ч} + r},$$

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

$$I_{ч} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{R^2 + (x_c/3)^2}}$$

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:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ч}} + r_0}.$$

Как правило, $r_0 < 10$ Ом, сопротивление же тела человека $R_{\text{ч}}$ не опускается ниже сотен Ом. Следовательно, без большой ошибки в уравнении можно пренебречь значением r_0 и считать, что при прикосновении к одной из фаз трехфазной четырехпроводной сети с заземленной нейтралью человек оказывается практически под фазным напряжением U_{ϕ} , а ток, проходящий через него, равен частному от деления U_{ϕ} 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.

Выбор схемы сети, а также режима нейтрали производится по технологическим требованиям, а также по условиям безопасности.

При напряжении до 1000 В широкое распространение получили обе разрешенные схемы трехфазных сетей: трехпроводная с изолированной нейтралью и четырехпроводная с заземленной нейтралью.

По технологическим требованиям предпочтение часто отдается четырехпроводной сети, поскольку она позволяет использовать два рабочих напряжения – линейное и фазное. Так например от четырехпроводной сети 380 В можно питать как силовую нагрузку – трехфазную или однофазную, включая ее между фазными проводами на линейное напряжение 380 В, так и осветительную, включая ее между фазным и нулевым проводами, т.е. на фазное напряжение 220 В. при этом достигается удешевление электроустановки в целом за счет применения меньшего числа трансформаторов, меньшего сечения проводов и т.п.

По условиям безопасности выбор одной из двух схем сети производится с учетом выводов, полученных при рассмотрении этих сетей: по условиям прикосновения к фазному проводу в период нормального режима работы сети более безопасной является как правило, сеть с изолированной нейтралью, а в аварийный период – сеть с заземленной нейтралью.

Поэтому сети с изолированной нейтралью целесообразно применять в тех случаях, когда имеется возможность поддерживать высокий уровень изоляции проводов и когда емкость сети относительно земли незначительна. Такими являются непротяженные малоразветвленные сети, не подверженные воздействию агрессивной среды и находящиеся под постоянным контролем квалифицированного персонала. Примером могут служить сети небольших предприятий, электротехнических лабораторий и т.п.

Сети с заземленной нейтралью надлежит применять там, где невозможно обеспечить хорошую изоляцию проводов (из-за высокой влажности, агрессивной среды и проч.), когда нельзя быстро отыскать или устранить повреждения изоляции, либо когда емкостные токи сети вследствие значительной ее разветвленности достигают больших значений, опасных для человека. Примером

таких сетей могут служить сети крупных промышленных предприятий, городские и сельские сети и т.п.

Аппаратуры и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Трехфазный источник питания	201.2	400 В /16 А
<i>A1</i>	Блок линейных дросселей	337	6x1,0 Гн; 0,5 А
<i>A2</i>	Трехфазный трансформатор	302	205 В·А 380/380 В Y-0/Y-0/YУ
<i>A3</i>	Модель участка электрической сети	303	380 В / ~3 x 0.5 А
<i>A4</i>	Модель человека	309	380 В / ~ 3 x 0.5 А
<i>A5</i>	Модель замыкания на землю	310	380 В / ~ 3 x 0.5 А
<i>P1</i>	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000В~; 0...10А=; 0...20МОм

Методика и порядок выполнения работы

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления \perp устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника *G1*.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений рисунок 8.1.
- Установите у модели *A5* сопротивление замыкания на землю $R_{зам} = \infty$
- Включите источник *GI* и питание блока мультиметров *PI*.
- Варьируя сопротивление изоляции $R_{из} = R_A = R_B = R_C$ и емкости $C = C_A = C_B = C_C$ фаз модели *A3*, а также сопротивлений $R_{обуви}$ и $R_{пола}$ модели *A4*, снимите в электрической сети с изолированной нейтралью с помощью амперметра блока *PI* следующие зависимости тока через тело человека: $I_h = f(R_{из})$, $I_h = f(C)$, $I_h = f(R_{обуви})$, $I_h = f(R_{пола})$. Значения $R_{из}$, C , $R_{обуви}$, $R_{пола}$ принимаются согласно варианту по таблице 8.1.
- Смоделируйте электрическую сеть с глухозаземлённой нейтралью. Для этого соедините перемычкой гнездо нейтральной точки трансформатора и гнездо сопротивления заземлителя R_0 в блоке трехфазного трансформатора *A2*.
- Снимите аналогичные ранее снятым для электрической сети с изолированной нейтралью зависимости тока через тело человека для электрической сети с глухозаземлённой нейтралью.
- Сопоставьте снятые зависимости и сделайте вывод о влиянии режима нейтрали электрической сети на условия электробезопасности.
- Варьируя сопротивление изоляции $R_{из} = R_A = R_B = R_C$ емкости $C = C_A = C_B = C_C$ фаз модели *A3*, сопротивление замыкания на землю $R_{зам}$ модели *A5*, а также сопротивлений $R_{обуви}$ и $R_{пола}$ модели *A4*, снимите в электрической сети с глухо заземлённой нейтралью с помощью амперметра блока *PI* зависимости тока через тело человека: $I_h = f(R_{из})$, $I_h = f(C)$, $I_h = f(R_{зам})$, а также с помощью вольтметра блока *PI* – зависимость напряжения прикосновения $U_{пр} = f(R_{зам})$. Значения $R_{из}$, C , $R_{обуви}$, $R_{пола}$ и $R_{зам}$ принимаются согласно варианту по таблице 8.1.
- Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о влиянии параметров в электрической сети с глухо заземлённой нейтралью на условия электробезопасности.

- Смоделируйте электрическую сеть с изолированной нейтралью. Для этого уберите перемычку, соединяющую гнездо нейтральной точки трансформатора и гнездо сопротивления заземлителя R_o в блоке трехфазного трансформатора $A2$. Варьируя параметры моделей $A3...A5$, снимите с помощью амперметра и вольтметров блока PI : зависимости тока через тело человека: $I_h = f(R_{из})$, $I_h = f(C)$, $I_h = f(R_{зам})$, зависимости напряжения прикосновения $U_{пр} = f(R_{зам})$, $U_{пр} = f(R_{пола})$ и напряжения фаз электрической сети относительно земли $U_A = f(R_{зам})$, $U_B = f(R_{зам})$, $U_C = f(R_{зам})$.

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о влиянии параметров в электрической сети с изолированной нейтралью на условия электробезопасности.

- По завершении эксперимента отключите источник GI и питание блока мультиметров PI .

Таблица 8.1 – Варианты заданий

№ варианта	$R_{из}=R_A=$ кОм	$R_B=$	R_C	$C=C_A=$ мкФ	$C_B=$	C_C	$R_{пола}$, кОм	$R_{обуви}$, кОм	$R_{зам}$, Ом
1	1			0			1	1	2
2	2			0,1			100	10	5
3	5			0,2			900	300	10
4	10			0,3			2500	3000	50
5	100			0,4			900	300	100
6	500			0,5			100	10	200
7	1			0,6			1	1	500
8	2			0,5			2500	300	1000
9	5			0,4			900	10	500
10	10			0,3			100	1	200
11	100			0,2			1	10	100
12	500			0,1			2500	300	50

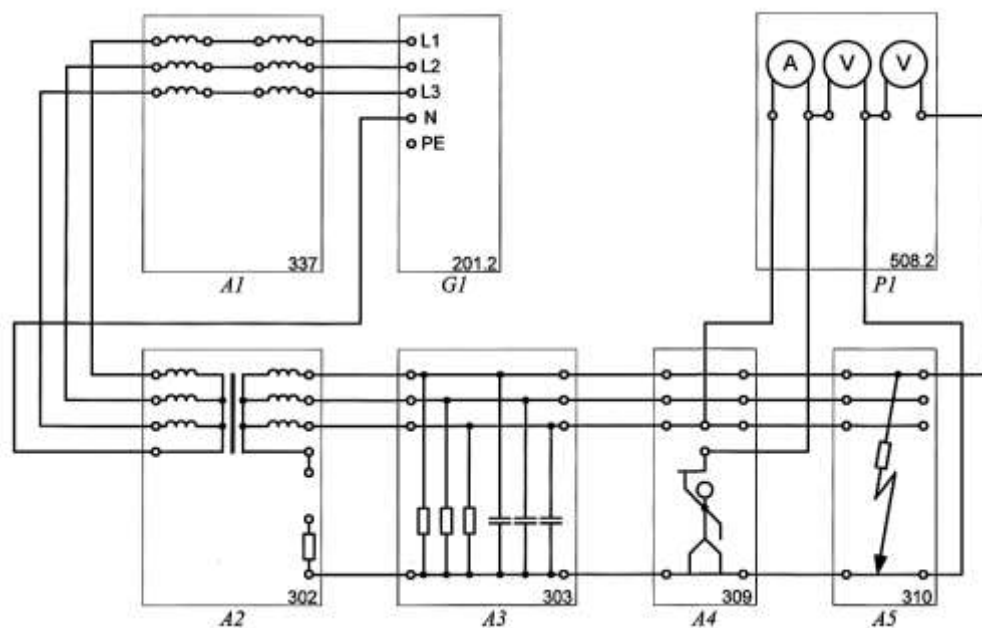


Рисунок 8.1 – Схема для определения влияния режима электрической сети и ее нейтрали на условия электробезопасности

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты измерений для электрической сети с изолированной нейтралью и с глухо заземлённой нейтралью, зависимости тока через тело человека, зависимости напряжения прикосновения и напряжения фаз электрической сети относительно земли.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного

отчета и форме устного опроса.

1. Режимы работы нейтралей.
2. Прикосновения человека к сети с изолированной нейтралью.
3. Прикосновения человека к сети с глухо заземлённой нейтралью.
4. Дать анализ напряжению прикосновения при прямом и косвенном прикосновениях.
5. Какой режим нейтрали является наиболее опасным.
6. Как влияет величина сопротивления изоляции и емкости фаз на зависимость тока через тело человека при различных режимах нейтрали.
7. Изменение зависимости тока через тело человека и зависимости напряжения прикосновения при различных режимах нейтрали.

Лабораторная работа № 9

Определение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока через защитный заземлитель

Цель и содержание работы

Целью данной работы является изучение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока в землю через защитный заземлитель.

Теоретическое обоснование

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_{np} . 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:

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{н}} + Z_{\text{и}}/3),$$

где $\bar{I}_{\text{ч}}$, $\bar{U}_{\text{ф}}$, $\bar{Z}_{\text{и}}$ – комплексы тока, А, фазного напряжения, В и сопротивления изоляции одной фазы, Ом; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, Ом; $R_{\text{об}}$ – сопротивление обуви человека, Ом; $R_{\text{н}}$ – 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 (рисунок 2.1) 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:

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{n}} + R_{\text{з}})$$

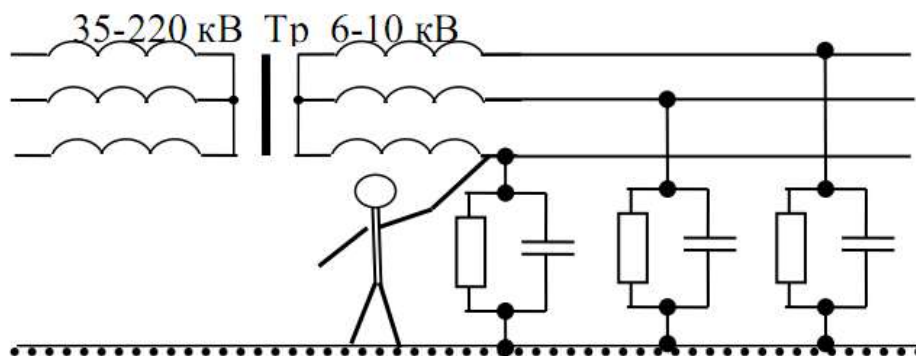


Рисунок 9.1 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью

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 $R_{\text{n}} = 0$. 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 $R_{\text{з}} = 4$ Ом

$$I_{\text{ч}} = 220 / (1000+4) \approx 0,22 \text{ А.}$$

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.

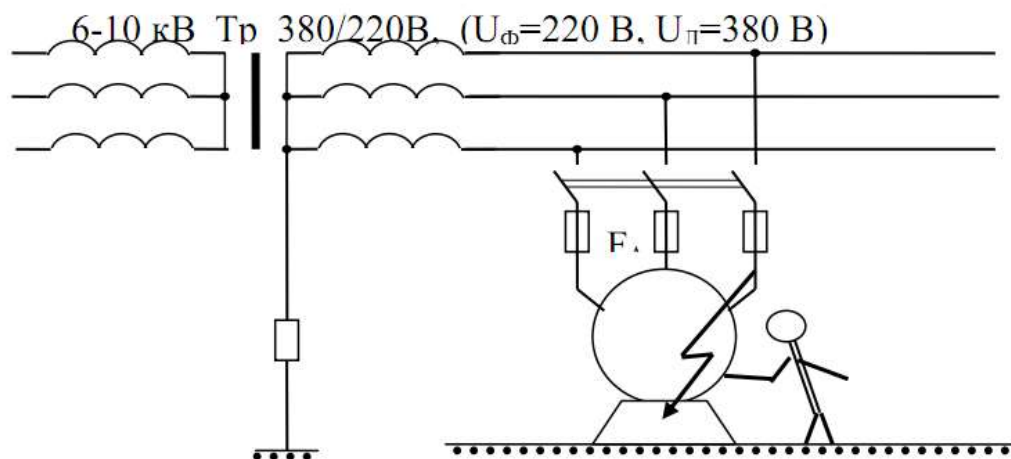


Рисунок 9.2 – Прикосновение человека к фазному проводу трехфазной электрической сети с глухо заземленной нейтралью

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,

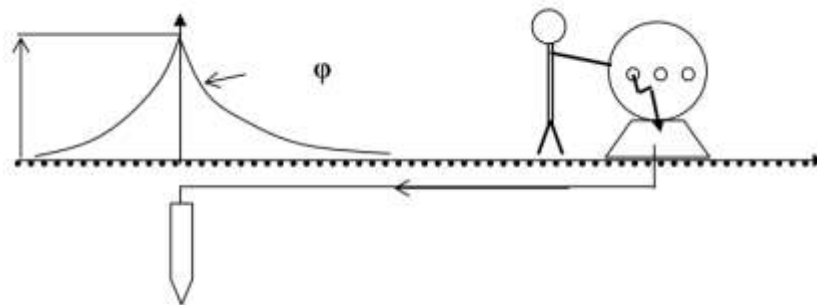


Рисунок 9.3 – Выносной (сосредоточенный) заземлитель

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 φ_3 , а ноги находятся под потенциалом, близким к нулю.

Напряжение прикосновения $U_{пр}$, равное разности потенциалов руки и ног, в данном случае практически равно φ_3 .

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 рисунке 2.3. При этом распределения потенциалов отдельных заземлителей складываются, получается суммарное распределение потенциала $\phi_{\Sigma}(X)$. 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 ϕ_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.

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

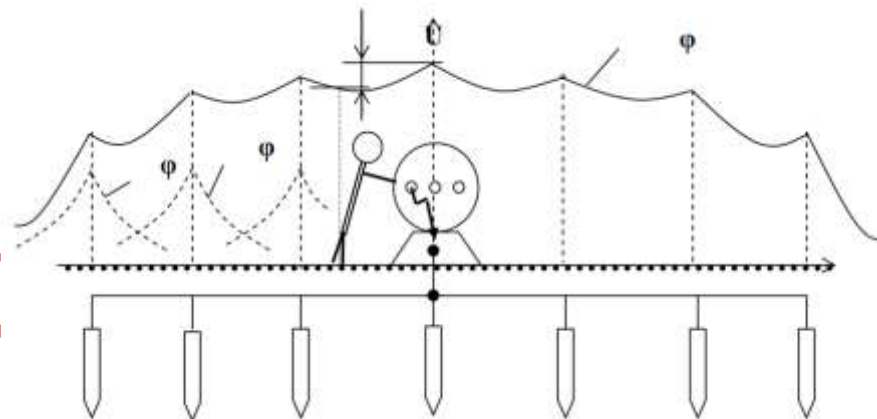


Рисунок 9.4 – Случай контурного (распределенного) заземлителя

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 12.1.030–01):

– 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 при-косновения или шаговое напряжение достигают опасных величин (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Максимально допустимые значения сопротивления 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
$125/I_3$, но не более 10 (I_3 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	
$250/I_3$, 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

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде инженерно–производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Трехфазный источник питания	201.2	400 В /16 А
<i>A1</i>	Блок линейных дросселей	337	6x1,0 Гн; 0,5 А
<i>A2</i>	Трехфазный трансформатор	302	250 В·А 380/380 В Y-0/Y-0
<i>A6</i>	Модель заземлителя полусферическим электродом	325	~ 380 В / 3 x 0.5 А
	Модель заземлителя с в вертикальным трубчатым электродом	326	
	Модель заземлителя с в протяженным трубчатым электродом на поверхности	327	

Продолжение таблицы

<i>P1</i>	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000В~; 0...10А=; 0...20МОм
-----------	-------------------	-------	--

Методика и порядок выполнения работы

- Используйте первоначально в эксперименте, например, модель *A6* заземлителя с полусферическим электродом (код 325).
- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления \perp устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «*PE*» источника *G1*.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений по рисунку 9.1
- Включите источник GI и питание блока мультиметров PI .
- При заданных сопротивлениях грунта ρ модели заземлителя $A6$, снимите с помощью вольтметра блока PI зависимости от расстояния x : потенциала основания электрооборудования $\varphi_{осн} = f(x)$ (вольтметр включать между гнездом « \perp » и гнездами, соответствующими расстоянию X), напряжения прикосновения $U_{пр} = f(x)$ (вольтметр включать между гнездом «0» и гнездами, соответствующими расстоянию x), шагового напряжения $U_{ш} = f(x)$ (вольтметр включать между соседними гнездами, соответствующими расстоянию x). Значения грунта принимаются согласно варианту по таблице 9.2.
- Ток стекания в землю контролируйте с помощью амперметра блока PI . Он не должен превышать $0,5 A$.
- Отключите источник GI и замените в электрической схеме модель $A6$ заземлителя с полусферическим электродом (код 325) на модель $A6$ заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326).
- Включите источник GI и вновь снимите вышеупомянутые зависимости.
- Еще раз отключите источник GI и замените в электрической схеме модель $A6$ заземлителя с вертикальным трубчатым электродом (код 326) на модель $A6$ заземлителя с протяженным трубчатым электродом на поверхности (код 327).
- Вновь включите источник GI и в третий раз снимите вышеупомянутые зависимости.
- По завершении эксперимента отключите источник GI и питание блока мультиметров PI .
- Используйте полученные зависимости 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.

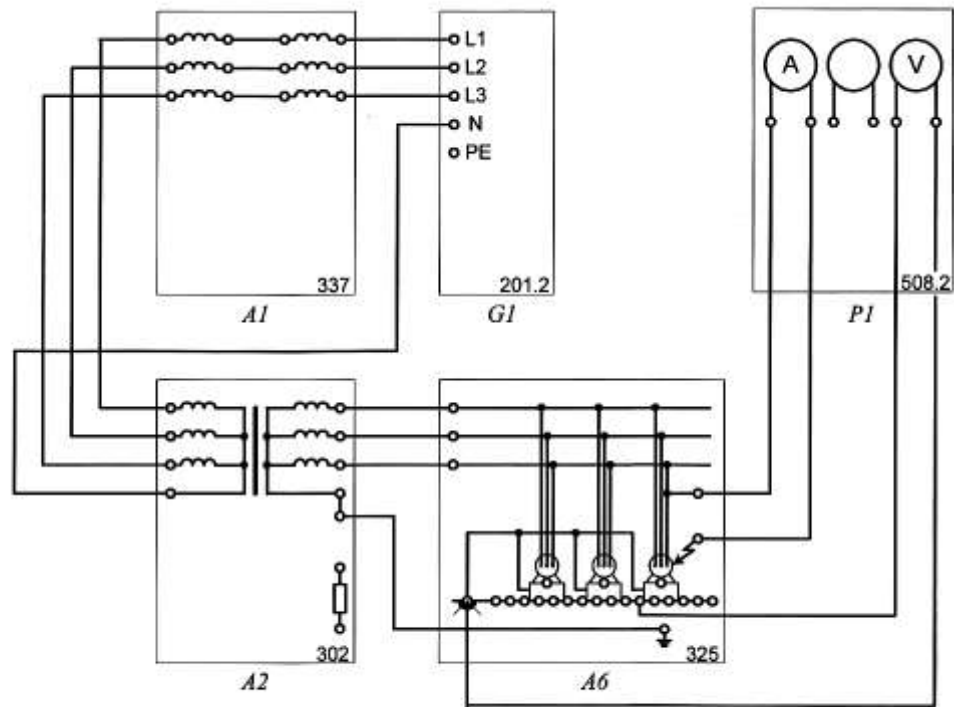


Рисунок 9.1 – Схема для определения зависимостей, характеризующих явление при стекании тока в землю через защитный заземлитель

Таблица 9.2 – Варианты заданий

№ варианта	ρ_1 , Ом м	ρ_2 , Ом м
1	20	700
2	40	300
3	100	100
4	300	40
5	700	20
6	20	300
7	40	700
8	100	20
9	300	300
10	700	100
11	20	40
12	40	100

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты измерений и зависимости потенциала основания электрооборудования, напряжения прикосновения и шагового напряжения от расстояния x .
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Режимы работы нейтралей.
2. Прикосновения человека к сети с изолированной нейтралью.
3. Прикосновения человека к сети с глухо заземлённой нейтралью.
4. Дать анализ напряжению прикосновения при прямом и косвенном прикосновениях.
5. Какой режим нейтрали является наиболее опасным.
6. Как влияет величина сопротивления изоляции и емкости фаз на зависимость тока через тело человека при различных режимах нейтрали.
7. Изменение зависимости тока через тело человека и зависимости напряжения прикосновения при различных режимах нейтрали.

Лабораторная работа № 10

Определение зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека

Цель и содержание работы

Целью данной работы является:

- изучение основных факторов, влияющие на тяжесть поражения человека электрическим током;
- исследование изменение сопротивления тела человека в зависимости от площади контакта при различной частоте электрического тока.

Теоретическое обоснование

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 эти 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 не отпускающим.

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 одновременные 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 не отпускающий 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

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде инженерно–производственного центра «Учебная техника» и согласно данных методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
-	Устройство для исследования сопротивления тела человека	341	0...7 В ~ 0.03 А

Методика и порядок выполнения работы

- Подключите с помощью сетевого шнура устройство для исследования сопротивления тела человека (код 341) к трехпроводной электрической сети 220 В и включите на его лицевой панели выключатель «СЕТЬ».
- Оперирруя кнопками на поле «ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ» по индикатору выставьте требуемые напряжение U и его частоту f , согласно варианту по таблице 10.1.
- Приложите ладони рук порознь к двум электродам с площадью контактной поверхности $S=1250 \text{ мм}^2$ и с верхнего индикатора считайте величину тока I_h , протекающего через тело человека.
- Приложите ладони рук порознь к двум электродам с площадью контактной поверхности $S=2500 \text{ мм}^2$ и с верхнего индикатора считайте величину тока I_h , протекающего через тело человека.
- Рассчитайте электрическое сопротивление тела человека $Z_h=U/I_h$ в обоих случаях и сделайте вывод о влиянии на него площади контактной поверхности.
- Варьируя частоту f напряжения генератора от 2 кГц до 200 кГц, снимите зависимость от нее тока, протекающего через тело человека $I_h(f)$,

согласно варианту по таблице 10.1.

- Рассчитайте зависимость электрического сопротивления тела человека $Z_h(f) = U/I_h(f)$.
- По завершении эксперимента отключите питание устройства для исследования сопротивления тела человека (код 341).

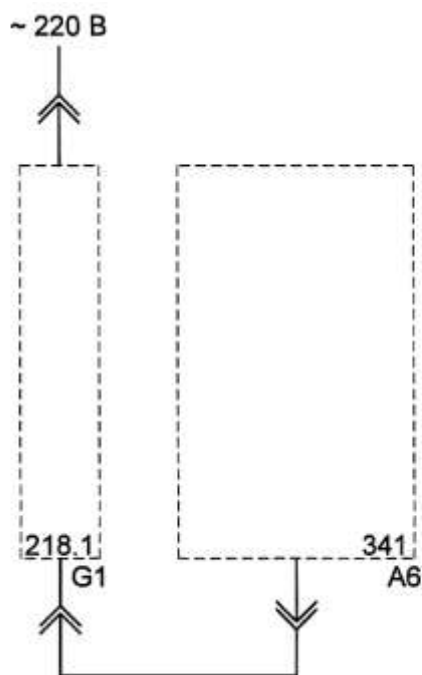


Рисунок 10.1 – Схема для определения зависимостей, характеризующих электрическое сопротивление тела человека

Таблица 10.1 - Варианты заданий

№ варианта	Напряжение, В	Частота, кГц
1	0,5	2
2	1,0	5
3	1,5	10
4	2,0	15
5	2,5	20
6	3,0	40
7	3,5	60
8	4,0	80
9	4,5	100
10	5,0	120
11	5,5	140
12	6,0	160
13	6,5	180
14	7,0	200

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты измерений и зависимости тока через тело человека и электрического сопротивления тела человека.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Режимы работы нейтралей.
2. Прикосновения человека к сети с изолированной нейтралью.
3. Прикосновения человека к сети с глухо заземлённой нейтралью.
4. Дать анализ напряжению прикосновения при прямом и косвенном прикосновениях.
5. Какой режим нейтрали является наиболее опасным.
6. Как влияет величина сопротивления изоляции и емкости фаз на зависимость тока через тело человека при различных режимах нейтрали.
7. Изменение зависимости тока через тело человека и зависимости напряжения прикосновения при различных режимах нейтрали.

кафедра АЭСИЭ ИЭЭИН СКФУ

Лабораторная работа № 11

Контроль изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью

Цель и содержание работы

Целью данной работы является изучение контроля неисправности изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью.

Теоретическое обоснование

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

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~16 А
<i>A1</i>	Блок линейных дросселей	337	6x1,0 Гн; 0,5 А
<i>A2</i>	Трехфазный трансформатор	302	250 В·А 380/380 В Y-0/Y-0-Y
<i>A3</i>	Модель участка электрической сети	303	~ 380 В 3 x 0.5 А
<i>A7</i>	Модель сопротивления изоляции	311	~ 380 В
<i>A8</i>	Устройство контроля изоляции	316	~ 380 В 3 x 0.5 А

<i>P1</i>	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000 В~;= 0...10 А ~; =; 0...20 МОм
-----------	-------------------	-------	--

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления \perp устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника *GI*.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений по рисунку 11.1
 - Установите емкости фаз модели *A3* $C = C_A = C_B = 0$
 - Установите желаемые сопротивления R_A, R_B, R_C изоляции фаз модели *A3* и сопротивления R изоляции модели *A7*. Значения R_A, R_B, R_C принимаются согласно варианту по таблице 11.1.
- Включите источник *GI* и питание блока мультиметров *P1*.
- С помощью вольтметров блока мультиметров *P1* измерьте напряжения фаз электрической сети. По ним судите о соотношении сопротивлений изоляции этих фаз.
 - Величину, равную параллельно соединенным сопротивлениям изоляции всех трех фаз, считывайте с индикатора устройства контроля изоляции.
- По завершении эксперимента отключите источник *GI* и питание блока мультиметров *P1*.

К.А.

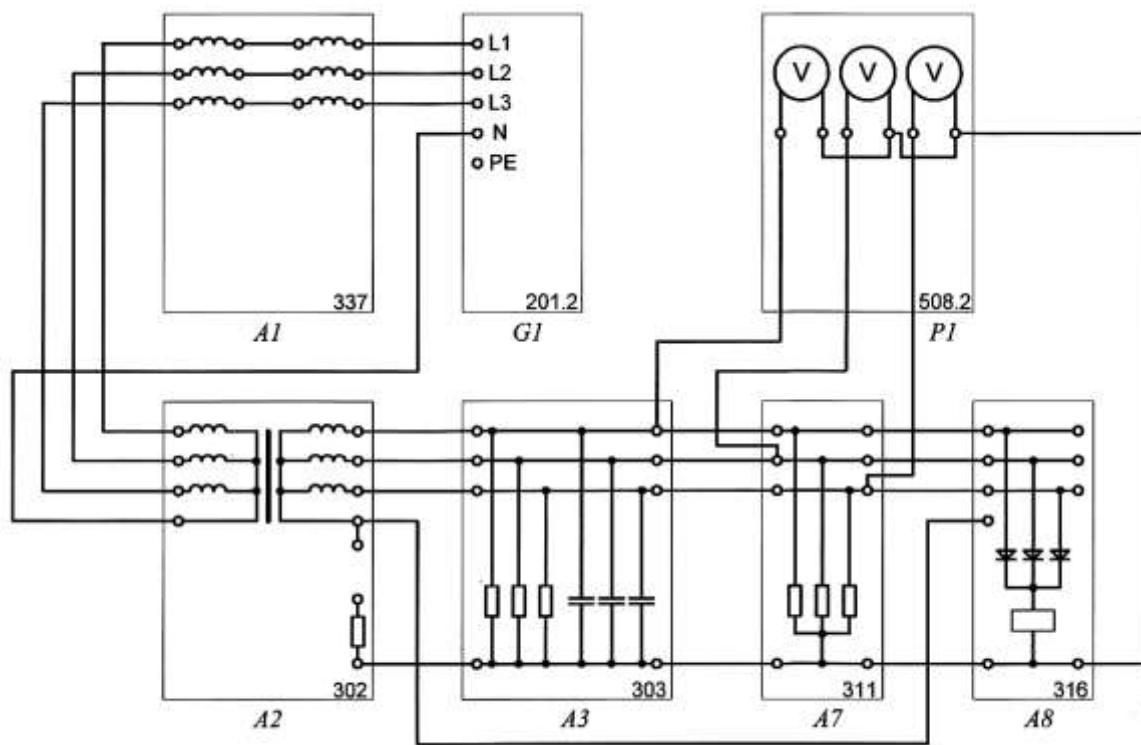


Рисунок 11.1 – Схема для контроля изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью

Таблица 11.1 - Варианты заданий

№ варианта	R_A , кОм	R_B , кОм	R_C , кОм
1	2	5	2
2	2	10	5
3	5	100	10
4	5	500	100
5	500	2	500
6	500	5	2
7	10	100	5
8	10	500	10
9	100	5	100
10	100	10	500
11	5	100	2
12	10	2	5

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты измерений напряжения фаз электрической сети и сопротивления изоляции всех фаз.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Режимы работы нейтралей.
2. Прикосновения человека к сети с изолированной нейтралью.
3. Прикосновения человека к сети с глухо заземлённой нейтралью.
4. Дать анализ напряжению прикосновения при прямом и косвенном прикосновениях.
5. Какой режим нейтрали является наиболее опасным.
6. Как влияет величина сопротивления изоляции и емкости фаз на зависимость тока через тело человека при различных режимах нейтрали.
7. Изменение зависимости тока через тело человека и зависимости напряжения прикосновения при различных режимах нейтрали.

Лабораторная работа № 12

Измерение сопротивления заземления

Цель и содержание работы

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

Сделать вывод об эффективности защитного заземления.

Теоретическое обоснование

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, 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 $U_{пр}$. 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:

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}} / (R_{\text{ч}} + R_{\text{об}} + R_{\text{н}} + Z_{\text{и}}/3),$$

где $\bar{I}_{\text{ч}}$, $\bar{U}_{\text{ф}}$, $\bar{Z}_{\text{и}}$ – комплексы тока, А, фазного напряжения, В и сопротивлений изоляции одной фазы, Ом; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, Ом; $R_{\text{об}}$ – сопротивление обуви человека, Ом; $R_{\text{н}}$ – сопротивление пола (основания), Ом.

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

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 $R_{\text{н}} = 0$. 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

$$I_{\text{ч}} = 220 / (1000+4) \approx 0,22 \text{ А.}$$

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.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде инженерно-производственного центра «Учебная техника» и согласно данным методических указаний.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<i>G1</i>	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~16 А
<i>A1</i>	Блок линейных дросселей	337	6x1,0 Гн; 0,5 А
<i>A2</i>	Трехфазный трансформатор	302	250 В·А 380/380 В Y-0/Y-0 Y-Y
<i>A9</i>	Модель измерения заземления	312	~ 220 В 0.5 А
<i>P1</i>	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000 В~;= 0...10 А ~; =; 0...20 МОм

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления \perp устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника *G1*.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической

соединений по рисунку 12.1

- Переключателем установите у модели *A9* желаемое удельное сопротивление грунта ρ согласно варианту по таблице 12.1.
- Включите источник *G1* и питание блока мультиметров *P1*.
- С помощью амперметра и вольтметра блока мультиметров *P1* измерьте ток стекающий в землю через заземлитель и напряжение между ним и потенциальным электродом на различном удалении от заземлителя.
- Используйте измеренные значения тока и напряжения для определения правильного расположения потенциального электрода относительно заземлителя и последующего расчета сопротивления заземлителя.
- По завершении эксперимента отключите источник *G1* и питание блока мультиметров *P1*.

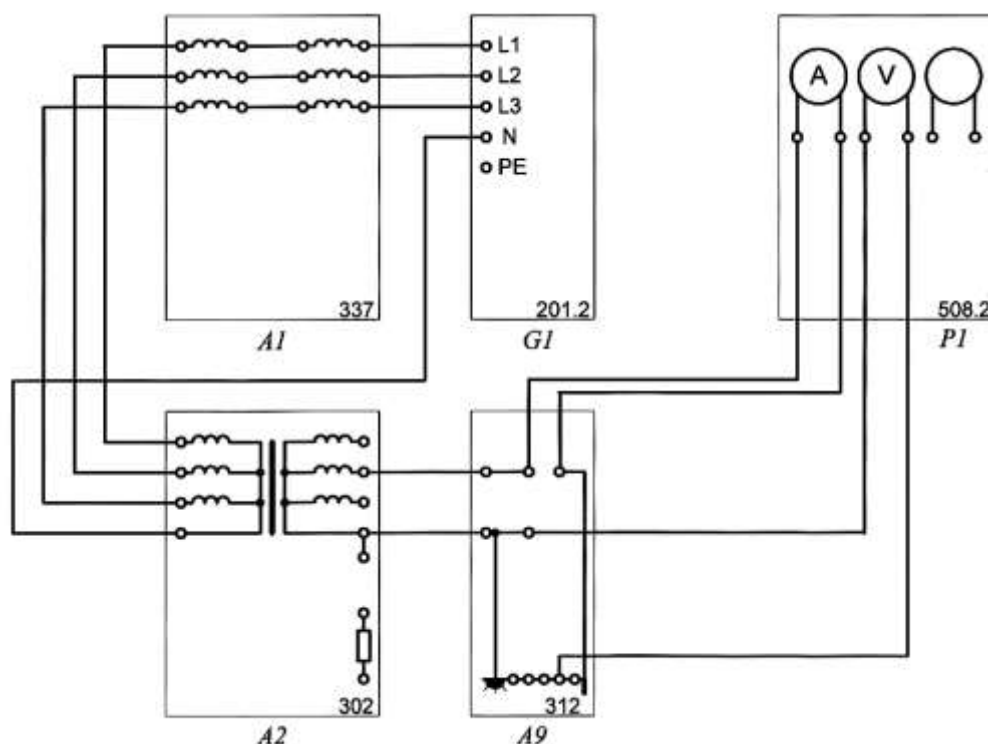


Рисунок 12.1 – Схема для измерения сопротивления заземления

Таблица 12.1 – Варианты заданий

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$\rho = 40 \text{ Ом м}$	$\rho = 100 \text{ Ом м}$	$\rho = 300 \text{ Ом м}$	$\rho = 700 \text{ Ом м}$

Содержание отчёта и его форма

Отчет выполняется в письменном виде.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, группы и даты выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Результаты показаний тока, стекающего в землю через заземлитель, и напряжения между ним и потенциальным электродом на различном удалении от заземлителя, а также расчетное сопротивление заземлителя.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.

Контрольные вопросы и защита работы

Защита лабораторной работы проводится при наличии письменного отчета и форме устного опроса.

1. Режимы работы нейтралей.
2. Прикосновения человека к сети с изолированной нейтралью.
3. Прикосновения человека к сети с глухозаземленной нейтралью.
4. Дать анализ напряжению прикосновения при прямом и косвенном прикосновениях.
5. Какой режим нейтрали является наиболее опасным.
6. Как влияет величина сопротивления изоляции и емкости фаз на зависимость тока через тело человека при различных режимах нейтрали.
7. Изменение зависимости тока через тело человека и зависимости напряжения прикосновения при различных режимах нейтрали.

Литература

1. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов. / Под ред. проф. Э.А. Арустамова – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2013 – 448 с.
2. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. Мастрюков Б. М., изд-во Академия, 2012, 304 с.
3. Сапронов Ю.Г., Сыса А.Б. Шахбазян В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 320 с.
4. Бондин В.И., Семехин Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Инфра-М, АкадемЦентр, 2011, 352 с.
5. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / Мар.гос.ун-т; И.Г. Воробьева. – Йошкар-Ола, 2011. – 276 с.
6. Графкина М.В., Нюнин Б. Н., Михайлов В.А. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во: Форум, Инфра-М, 2013, 416 с.
7. Казаков Н.П. Якубовская Н.А. Безопасность жизнедеятельности. Обеспечение безопасности в туризме. Изд-во Академия., 2011, 240 с.
8. Каракеян В.И., Никулина И.М. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Юрайт, 2012, 464 с.
9. Косолапова Н.В., Прокопенко Н.А., Побежимова Е.Л. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 288 с.
10. Сапронов Ю.Г., Сыса А.Б. Шахбазян В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 320 с.
11. Сапронов Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 336 с.
12. Сапронов Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 336 с.
13. Сенигов П.Н. Основы электробезопасности. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ОЭБ.001 РБЭ (912). – Челябинск: ООО

«Учебная техника», 2004. – 39 с.

21. Безопасность жизнедеятельности. учебник для студентов высших учебных заведений. / [Л.А. Михайлов, В.М Губанов, В.П. Соломин и др.]; под ред. Л.А. Михайлова. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 272 с.

22. Губанов, В.П. Соломин и др.]; под ред. Л.А. Михайлова. –М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 272 с.

23. Лобачев А.И.Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов. – М.: Юрайт - Издат, 2008. – 360 с.

24. Абрамов В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во СПбГУП, 2010, 456 с.

25. Басаков М.И. Охрана труда (безопасность жизнедеятельности в условиях производства): Учебно-практическое пособие. – Москва: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2003. – 400 с.

26. Девисилов В.А. Охрана труда. Изд-во: Форум, 2010, 512 с.

27. Карнаух Н.Н. Охрана труда. Изд-во: Юрайт, 2011, 384 с.

28. <http://www.alleng.ru/d/saf/saf13.htm> .–Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие под ред. Э. А. Арустамова, 2006 .

29. Скляр Н.Е., Рузиев Е.С. Электробезопасность. Учебное пособие для студентов по курсу “Электробезопасность”. М.: Академия. 2008.–168с.

30. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Справочно-методическое пособие по изучению и применению «Межотраслевых правил по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок» ПОТ РМ-016-2001 (с изменениями и дополнительными материалами). Девятое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТ «ЭлектроСервис», 2009 - 224 с.

31. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Опасность поражения человека электрическим током и порядок оказания первой помощи при несчастных случаях на производстве: Практическое руководство. – Десятое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 -84 с.

32. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 1. Общие требования. Основная защита. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с.

33. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 2. Защита при косвенном прикосновении. Дополнительная защита. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с.

34. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 3. Защита при нарушении режимов работы ЭУ. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с

35. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Инструктивные материалы по оказанию первой помощи при поражении человека электрическим током и других несчастных случаях на производстве. Практическое руководство. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2009. - 36с.

36. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок: Справочник. – СПб.: Политехника, 2005. – 400с.

Классификация электрических сетей

Системы электрических сетей классифицируются по ГОСТ 505712-94 (МЭК-364-3-93). Для классификации используются две буквы, указывающие характер заземления:

первая буква – указывает характер заземления нейтрали источника;

вторая буква – указывает характер заземления открытых проводящих нетоковедущих частей электроустановок (корпуса).

В обозначении используются начальные буквы французских слов:

T (terre) – заземлено;

N (neutre) – занулено (присоединено к нейтрали источника питания);

I (isole) – изолировано.

Выделяются три системы сетей: *TT*, *IT*, *TN*.

1) *TT* – нейтраль источника и корпуса электроприемников заземлены;

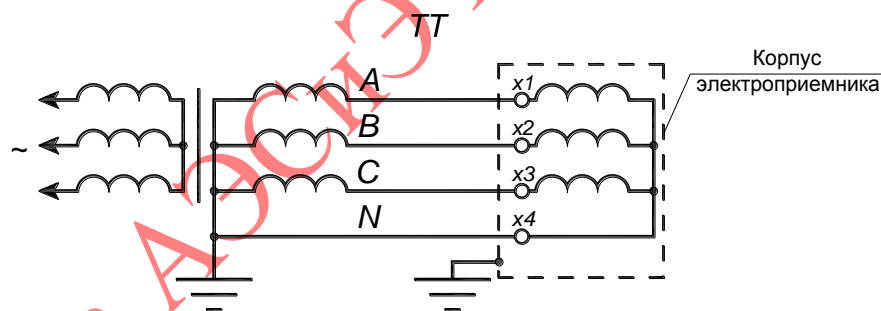


Рисунок А 1

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 110 кВ и выше.

Примечание. В примерах в качестве источников показаны вторичные обмотки трансформаторов. На практике источниками питания могут служить также обмотки генераторов.

2) *IT* – нейтраль источника изолирована, а корпуса электроприемников заземлены;

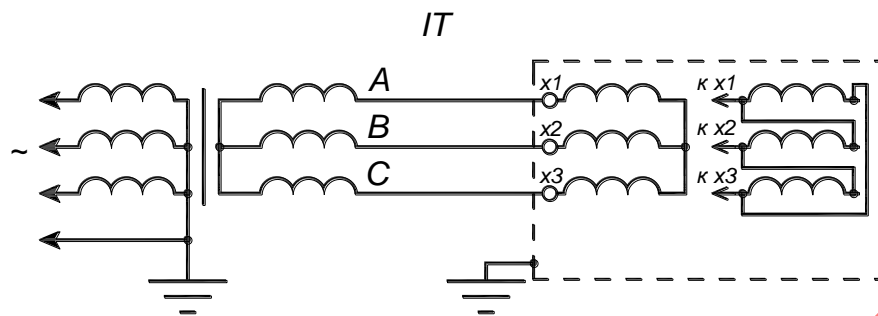


Рисунок А 2

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 6, 10, 35 кВ.

3) *TN* – нейтраль источника заземлена, а корпуса электроприемников занулены.

Схема *TN* имеет 3 модификации в зависимости от устройства нулевого рабочего и нулевого защитного проводников.

Схема *TN-C* (common) – функция нулевого рабочего (*N*) и нулевого защитного (*PE*) проводников объединены в одном проводнике, который называется *PEN*.

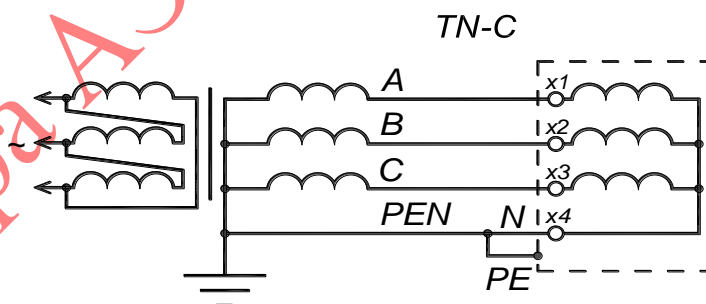


Рисунок А 3

Схема *TN-S* (select) – функция нулевого рабочего и нулевого защитного проводников обеспечивается отдельными проводниками, соответственно *N* и *PE*.

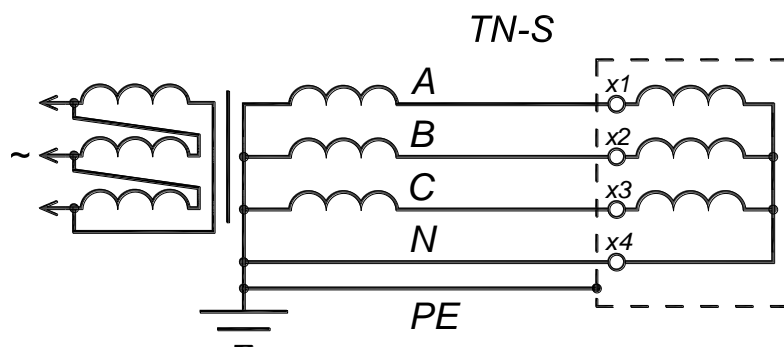


Рисунок А 4

Схема *TN-C-S* – нулевые проводники на головных участках объединены в проводник *PEN*, а далее разделены на проводники *N* и *PE*.

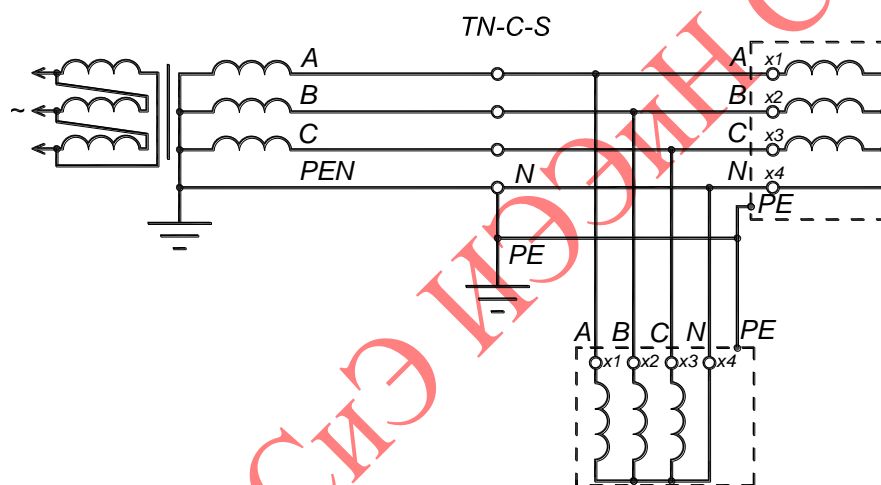


Рисунок А.5

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 0,4 кВ.

Применение УЗО в электроустановках различных систем
заземления

1 Защита в электроустановках системы *TT*

В системе *TT* все открытые проводящие части электроустановки присоединены к заземлению, электрически независимому от заземлителя нейтрали источника питания.

ГОСТ Р 50669-94 предписывает применение системы *TT* как основной в случае подключения указанных электроустановок к вводно-распределительным устройствам соседнего (капитального) здания.

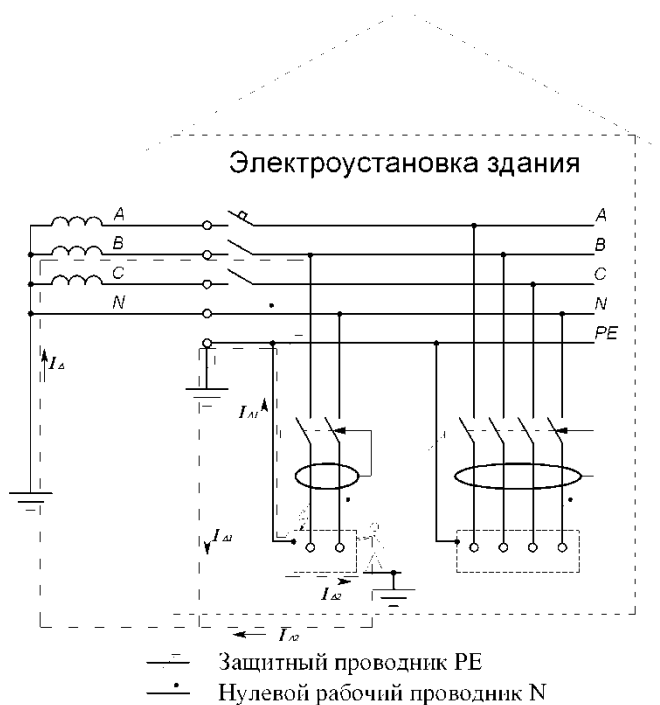


Рисунок Б 1

В стандарте ГОСТ Р 50571.3-94 п. 413.1.4 указано, что в системе *TT* устройства защиты от сверхтока (автоматические выключатели, предохранители) могут использоваться для защиты от косвенного прикосновения только в электро-установках, имеющих заземляющие устройства с очень малым сопротивлением. При этом гарантированное отключение питания электроустановки должно производиться при появлении

на открытых проводящих частях электроустановки напряжения не более 50 В.

В реальных условиях осуществить автоматическое отключение питания электроустановки системы *TT* с помощью автоматических выключателей по ряду причин (необходимости обеспечения большой кратности тока короткого замыкания, низкого сопротивления заземляющего устройства и др.) весьма проблематично. Эффективное решение проблемы автоматического отключения питания дает только применение УЗО.

В п. 1.7.59 ПУЭ (7-е изд.) содержится требование обязательного применения УЗО для обеспечения условий электробезопасности в системе *TT*. При этом уставка (номинальный отключающий дифференциальный ток) должна быть меньше значения тока замыкания на заземленные открытые проводящие части при напряжении на них 50 В относительно зоны нулевого потенциала.

Это означает, что в электроустановках индивидуальных жилых домов, коттеджей, дачных (садовых) домов и других частных сооружений, где не всегда имеется возможность выполнить заземлитель с требуемыми нормами параметрами, необходимо применять систему *TT* с обязательной установкой УЗО. В этом случае требования к значению сопротивления заземлителя значительно снижаются.

Таблица Б 1 – Допустимые значения сопротивления заземления

Сопротивление заземления R_z , Ом	5000	1666	500	166	100
Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta n}$, mA	10	30	100	300	500

2 Защита в электроустановках системы *TN*

Электроустановки системы *TN-C*

В электроустановках системы *TN* все открытые проводящие части электроустановок должны быть присоединены к заземленной нейтральной

точке источника питания посредством защитных проводников. Основное условие электробезопасности системы TN состоит в том, чтобы значение тока при коротком замыкании между фазным проводником и открытой проводящей частью превышало величину тока срабатывания защитного устройства за нормированное время.

В случае использования в качестве защитного устройства УЗО значение тока короткого замыкания следует заменить на значение номинального отключающего дифференциального тока устройства $I_{\Delta n}$. При этом задача обеспечения низкого значения сопротивления "фаза-ноль", которую надо решать при использовании защиты от сверхтока, заменяется на проверку работоспособности УЗО и защитного проводника. Контроль сопротивления цепи "фаза-ноль" следует производить только на входных зажимах УЗО.

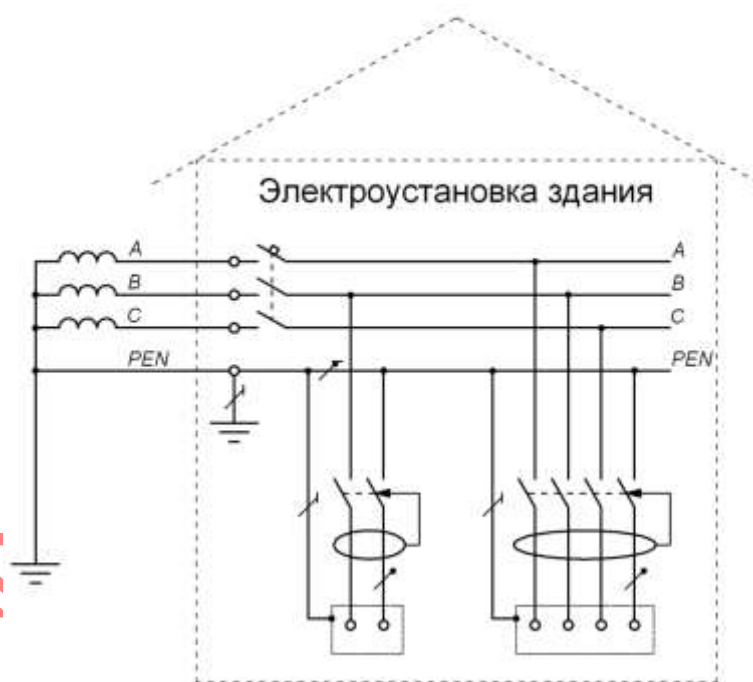


Рисунок Б 2

Самой используемой разновидностью системы TN является система $TN-C$. В качестве защитного проводника при этом используется проводник PEN , который одновременно выполняет функции рабочего и нулевого защитного проводника.

В ПУЭ 7-го издания имеется указание: "Не допускается применять УЗО, реагирующее на дифференциальный ток, в четырехпроводных трехфазных цепях (система *TN-C*). В случае необходимости применения УЗО для защиты отдельных электроприемников, получающих питание от системы *TN-C*, защитный *PE* проводник электроприемника должен быть подключен к *PEN* проводнику цепи, питающей электроприемник, до защитно-коммутационного аппарата".

Это означает, что как исключение для защиты отдельных электроприемников ПУЭ допускают применение УЗО в системе *TN-C*, при соблюдении определенных условий - подсоединения открытых проводящих частей электроприемников к *PEN*-проводнику со стороны источника питания по отношению к УЗО.

Электроустановки системы *TN-S*

Более современной и в большинстве случаев более безопасной является система *TN-S*, где используется самостоятельный нулевой защитный проводник *PE* и нулевой рабочий проводник *N*, которые прокладываются отдельно, начиная от вывода источника питания. Эта система уже долгое время используются в телекоммуникационных сетях (при этом исключаются помехи в слаботочных сетях, образующиеся при протекании части рабочего тока в землю в сети системы *TN-C*). Применение УЗО обязательно, кроме оговоренных особых случаев (например, цепи питания пожарной сигнализации).

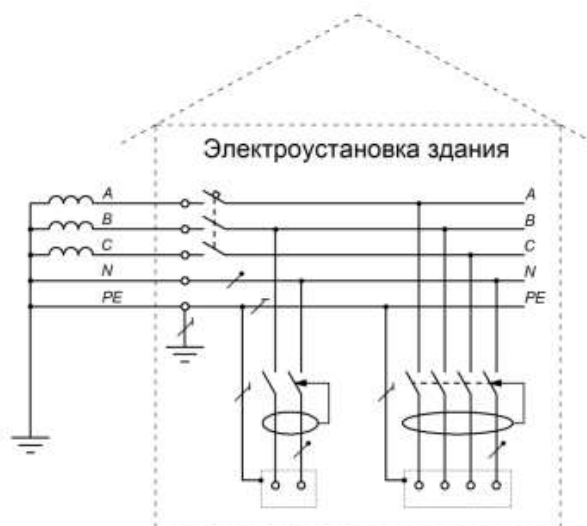


Рисунок Б 3

Электроустановки системы *TN-C-S*

При разделении, например в групповом щитке, в электроустановке системы *TN* проводника *PEN* на отдельные проводники *PE* и *N* образуется система *TN-C-S*. При этом, как в сети системы *TN-S*, проводники *PE* и *N* должны прокладываться раздельно, а их соединение после точки раздела недопустимо. Данная система в настоящее время - основная, которую можно выполнить в отдельной части электроустановки при проведении реконструкции.



Рисунок Б 4

3 Защита в электроустановках системы *IT*

В электроустановках системы *IT* источник питания должен быть изолирован от земли или связан с ней посредством подключения к нейтрали достаточно большого сопротивления. В сети имеется определенное активное сопротивление и емкость по отношению к земле, которые представляют собой путь для тока утечки или тока замыкания на землю.

В системе *IT* значение тока замыкания на землю определяется состоянием изоляции сети относительно земли. При хорошем состоянии изоляции (высоком сопротивлении относительно земли) ток замыкания на землю очень мал. В случае прямого прикосновения человека к токоведущим частям электроустановки ток через тело человека также определяется сопротивлением изоляции и при сопротивлении изоляции выше определенного значения не представляет опасности для жизни. Таким образом, уровень сопротивления изоляции является в системе *IT* фактором, определяющим как надежность, так и электробезопасность ее эксплуатации, поэтому очень важно поддерживать сопротивление изоляции на высоком уровне, а ведение автоматического постоянного контроля изоляции должно быть обязательным электрозащитным мероприятием.

Кафедра Г.



Рисунок Б 5

Применение УЗО в системе *IT* регламентируется ПУЭ 7-го издания следующим образом (п. 1.7.58): "...В таких электроустановках для защиты при косвенном прикосновении при первом замыкании на землю должно быть выполнено защитное заземление в сочетании с контролем изоляции сети или применены УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА".

В электроустановках системы *IT* устройства контроля изоляции подают сигнал при первом замыкании на землю. Если до устранения первого замыкания происходит второе замыкание на землю, то происходит срабатывание УЗО.

К Основное требование при использовании УЗО - устанавливать его необходимо как можно ближе к электроприемнику. Одновременное функционирование устройств контроля изоляции и УЗО не оказывает влияния на работу каждого из этих устройств.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине «Электробезопасность» для студентов
Направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и
электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение»,
«Электроэнергетические системы и сети»,
«Релейная защита и автоматизация электроэнергетических
систем»

Составители: Мустафаев Х. М., Маслов В.В.

Редактор:

Формат 60x84 1/16.	Усл. п. л. – 4,9.	Уч.-изд. л. – 5,1.
Бумага газетная.	Печать офсетная.	Заказ Тираж 50 экз.
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»		
355029, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1		

Издательство « Северо-Кавказского федерального университета »

Отпечатано в типографии СКФУ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

ПРАКТИКУМ

Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

квалификация выпускника «бакалавр»

очная форма обучения

Ставрополь, 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Мустафаев Х. М., Маслов В. В.

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

ПРАКТИКУМ

Направление подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

квалификация выпускника

«бакалавр»

Кафедра АЭСИЭ ИЭЭИИ СКФУ

Ставрополь
2017

УДК
ББК

Рецензенты:

Ивашина А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования СтГАУ,
Чуенкова И.Ю., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, электротехники и электроники СКФУ

Мустафаев Х.М., Маслов В. В. **Электробезопасность: практикум.** — Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2017. – 146 с.

Практикум предназначен для студентов направления подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем») квалификация выпускника «бакалавр» очная форма обучения

В практикуме приводятся теоретические сведения и методика проведения практических занятий по дисциплине «Электробезопасность», индивидуальные задания для выполнения этих работ по темам: защитные меры в электроустановках, основы электробезопасности, действие электрического тока на организм человека.

©ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2017

Содержание

Предисловие	4
Практическое занятие 1 Защитное заземление	8
Практическое занятие 2 Защитное зануление	20
Практическое занятие 3 Защитное отключение	31
Практическое занятие 4 Анализ электробезопасности сетей типа <i>IT</i> и <i>TN-C</i>	35
Практическое занятие 5 Явления при стекании тока в землю Напряжение прикосновения и шага	55
Практическое занятие 6 Сопротивление растеканию полушарового заземлителя	66
Практическое занятие 7 Расчет защитного зануления на отключающую способность	75
Практическое занятие 8 Выбор аппаратов защиты в электроустановках	89
Практическое занятие 9 Расчёт заземляющего устройства п/ст 10/0.4 кВ	108
Практическое занятие 10 Расчет заземляющего устройства подстанции 35/10 кВ	117
Практическое занятие 11 Статистический метод расчета заземления	122
Литература	133
Приложение А	136
Приложение Б	139

Предисловие

Одной из основных дисциплин, на которых базируются курсы направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профилей подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»), является дисциплина «Электробезопасность».

"Электробезопасность" - относится к вариативной части обязательной дисциплины БЗ.В.ОД.5, в которой соединена тематика безопасного взаимодействия человека со средой обитания (производственной, бытовой, городской, природной) и вопросы защиты от негативных факторов электрического тока. Изучением дисциплины достигается формирование у специалистов представления о неразрывном единстве эффективной профессиональной деятельности с требованиями к безопасности и защищенности человека. Реализация этих требований гарантирует сохранение работоспособности и здоровья человека, готовит его к действиям в экстремальных условиях.

Знания, умения и навыки, полученные студентами при изучении данной дисциплины, используются при выполнении магистерской диссертационной работы, а также представляют собой значительную долю знаний, умений и навыков, необходимых выпускникам в профессиональной научной деятельности.

Для освоения дисциплины поставлены следующие **задачи**:

- формирование у студента теоретической базы и практических навыков в области электробезопасности систем электроснабжения

- получение знаний по разработке и реализации мер защиты человека в области электробезопасности;

- в выработке у студентов умений и навыков повышения электробезопасности повседневным улучшением условий труда, совершенствованием

мер и средств защиты персонала и других лиц, занимающихся эксплуатацией электроустановок;

Дисциплина «Электробезопасность» призвана стать теоретической основой для выработки у студентов умений и навыков повышения электробезопасности повседневным улучшением условий труда, совершенствованием мер и средств защиты персонала и других лиц, занимающихся эксплуатацией электроустановок.

Она относится к базовому циклу БЗ.В.ОД.5, ее освоение происходит в 8 семестре.

Практические занятия проводятся в специализированных лабораториях и аудиториях. Занятия обеспечиваются необходимым наглядным материалом, стендами и приборами. Количество студентов в подгруппе составляет 10-12 человек. В ходе учебного занятия студенты проходят входное тестирование (собеседование), самостоятельно и при участии преподавателя выполняют практические занятия, отчитываются за проделанную на занятии учебную работу.

Работа студентов на занятиях оценивается в рамках балльно-рейтинговой системы оценки образовательной деятельности студентов.

Для решения задач образовательного процесса разработан учебно-профессиональный (методический) комплекс, включающий в себя ряд элементов: федеральный государственный образовательный стандарт, рабочая учебная программа, методические разработки для студентов и преподавателей по каждому практическому занятию, экзаменационные материалы, тексты лекций, перечень информационного и материального обеспечения образовательного процесса.

Для достижения планируемых результатов обучения, в дисциплине «Электробезопасность» используются различные образовательные технологии:

Информационно-развивающие технологии, направленные на формирование системы знаний, запоминание и свободное оперирование ими. Используется лекционно-семинарский метод, самостоятельное изучение литературы, применение новых информационных технологий для самостоятельного пополнения знаний, включая использование технических и электронных средств информации.

Деятельностные практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений при проведении экспериментальных исследований, обеспечивающих возможность качественно выполнять профессиональную деятельность. Используется анализ, сравнение методов проведения исследований, выбор метода, в зависимости от объекта исследования в конкретной производственной ситуации и его практическая реализация.

Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие проблемного мышления, мыслительной активности, способности видеть и формулировать проблемы, выбирать способы и средства для их решения. Используются виды проблемного обучения: освещение основных проблем на лекциях, учебные дискуссии, коллективная деятельность в группах при выполнении лабораторных работ, решение задач повышенной сложности. При этом используются первые три уровня (из четырех) сложности и самостоятельности: проблемное изложение учебного материала преподавателем; создание преподавателем проблемных ситуаций, а обучаемые вместе с ним включаются в их разрешение; преподаватель создает проблемную ситуацию, а разрешают её обучаемые в ходе самостоятельной деятельности.

Личностно-ориентированные технологии обучения, обеспечивающие в ходе учебного процесса учет различных способностей обучаемых, создание необходимых условий для развития их индивидуальных способностей, развитие активности личности в учебном процессе. Личностно-

ориентированные технологии обучения реализуются в результате индивидуального общения преподавателя и студента при защите лабораторных работ, при выполнении домашних индивидуальных заданий, решении задач повышенной сложности, на еженедельных консультациях.

Для реализации самостоятельной работы созданы следующие условия и предпосылки:

5. Студенты обеспечены информационными ресурсами (учебниками, справочникам, учебными пособиями, банком индивидуальных заданий);

6. Студенты обеспечены информационными ресурсами (методические указания выдаются заранее в электронном виде).

7. Разработаны контролирующие материалы в тестовой форме, позволяющие оперативно оценить уровень подготовки студентов.

8. Организованы еженедельные консультации (также для отработки пропущенных занятий).

**Компетенции обучающегося,
формируемые в результате освоения дисциплины**

	13.03.02
Цикл, в рамках которого изучается	Обязательная дисциплина вариативной части профессионального цикла БЗ.В.ОД.5
семестр	8 семестр
Количество зачетных единиц	3 з.е.
Реализуемые компетенции	ОК-7, ПК-4, ПК-5, ПК-9, ПК-22, ПК-24, ПК-35, ПК-36

Практическое занятие 1

Защитное заземление

Цель работы: изучить назначение, принцип действия, область применения защитных заземлений и типы заземляющих устройств

Теоретическая часть

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.

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 (рисунок 1.1) . В этом случае напряжение корпуса электроустановки относительно земли уменьшится и станет равным:

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 \quad (1.1)$$

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

$$U_h = I_3 \cdot R_3 \cdot \alpha_1 \quad (1.2)$$

где α_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 (рисунок 1.1).

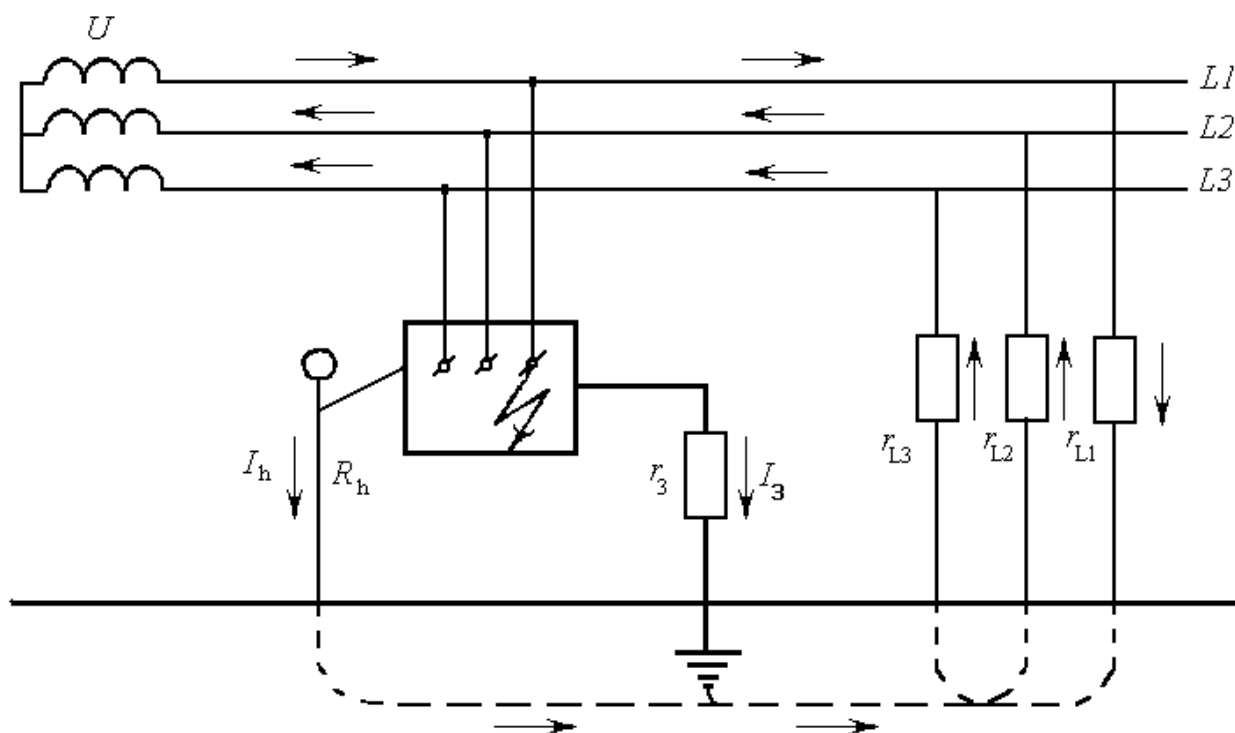


Рисунок 1.1 – Схема сети с изолированной нейтралью (типа *IT*) и защитным заземлением электроустановки

В сетях переменного тока с заземленной нейтралью напряжением до 1кВ защитное заземление в качестве основной защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении не применяется, т.к. оно не эффективно (рисунок 1.2).

Область применения защитного заземления:

- электроустановки напряжением до 1 кВ в трехфазных трехпроводных сетях переменного тока с изолированной нейтралью (система *IT*);
- электроустановки напряжением до 1 кВ в однофазных двухпроводных сетях переменного тока изолированных от земли;
- электроустановки напряжением до 1 кВ в двухпроводных сетях постоянного тока с изолированной средней точкой обмоток источника тока (система *IT*);

- электроустановки в сетях напряжением выше 1 кВ переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали или средней точки обмоток источников тока.

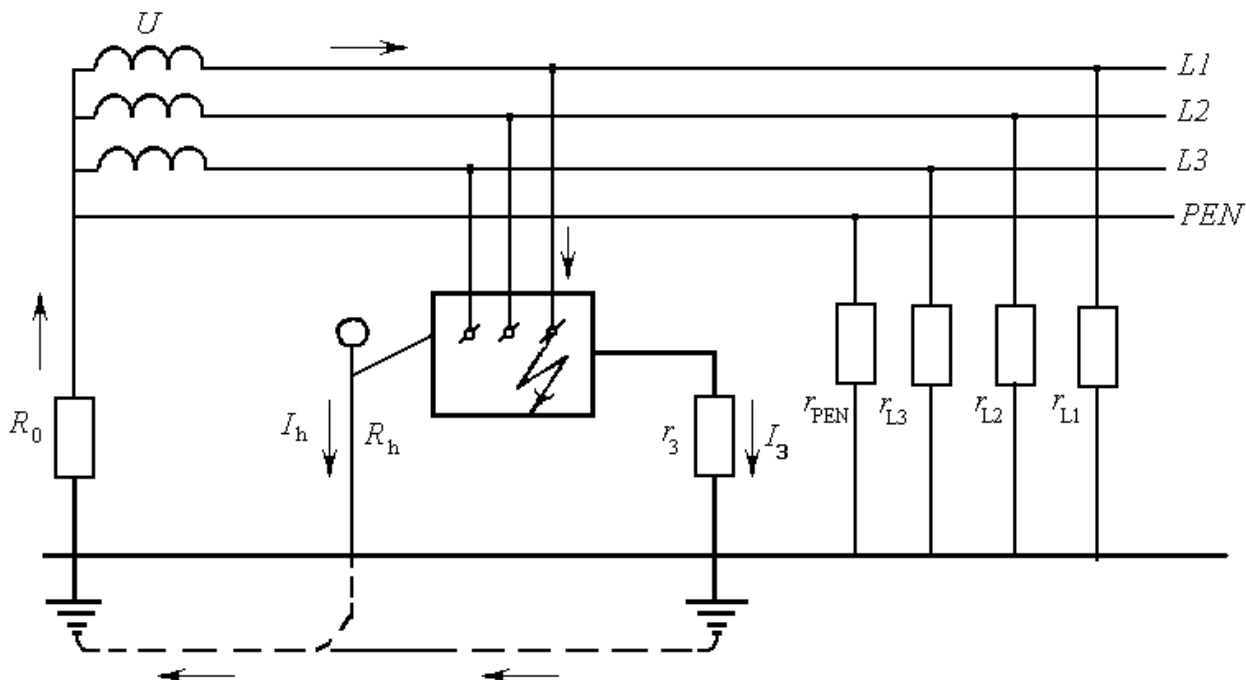


Рисунок 1.2 – Схема сети с заземленной нейтралью и защитным заземлением потребителя электроэнергии

Типы заземляющих устройств

Заземляющим устройством называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

В зависимости от места размещения заземлителя относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

Выносное заземляющее устройство (рисунок 1.3) характеризуется тем, что заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки. Поэтому выносное заземляющее устройство называют также сосредоточенным.

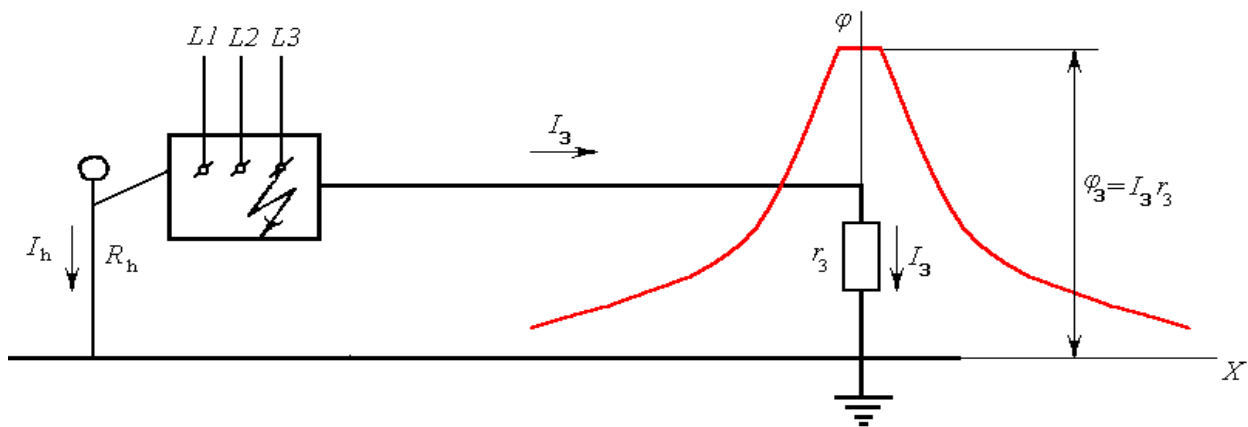


Рисунок 1.3 – Выносное заземляющее устройство

Существенный недостаток выносного заземляющего устройства – отдаленность заземлителя от защищаемого оборудования, вследствие чего на всей или на части защищаемой территории коэффициент прикосновения $\alpha_1=1$. Поэтому заземляющие устройства этого типа применяются лишь при малых токах замыкания на землю, в частности в установках до 1000 В, где потенциал заземлителя не превышает значения допустимого напряжения прикосновения $U_{np.\dot{d}on}$ (с учетом коэффициента напряжения прикосновения, учитывающего падение напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек, α_2):

$$\varphi = I_3 r_3 \leq U_{np.\dot{d}on}$$

где I_3 – ток, стекающий в землю через заземляющее устройство;

r_3 – сопротивление растеканию тока заземляющего устройства.

Кроме того, при большом расстоянии до заземлителя может значительно возрасти сопротивление заземляющего устройства в целом за счет сопротивления заземляющего проводника.

Достоинством выносного заземляющего устройства является возможность выбора места размещения электродов заземлителя с наименьшим сопротивлением грунта (сырой, глинистый, в низинах и т. п.).

Необходимость в устройстве выносного заземления может возникнуть в следующих случаях:

при невозможности по каким-либо причинам разместить заземлитель на защищаемой территории;

при высоком сопротивлении земли на данной территории (например, песчаный или скалистый грунт) и наличии вне этой территории мест со значительно лучшей проводимостью земли;

при рассредоточенном расположении заземляемого оборудования (например, в горных выработках) и т. п.

Контурное заземляющее устройство (рисунок 1.4) характеризуется тем, что электроды его заземлителя размещаются по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки. Часто электроды распределяются на площадке по возможности равномерно, и поэтому контурное заземляющее устройство называется также распределенным.

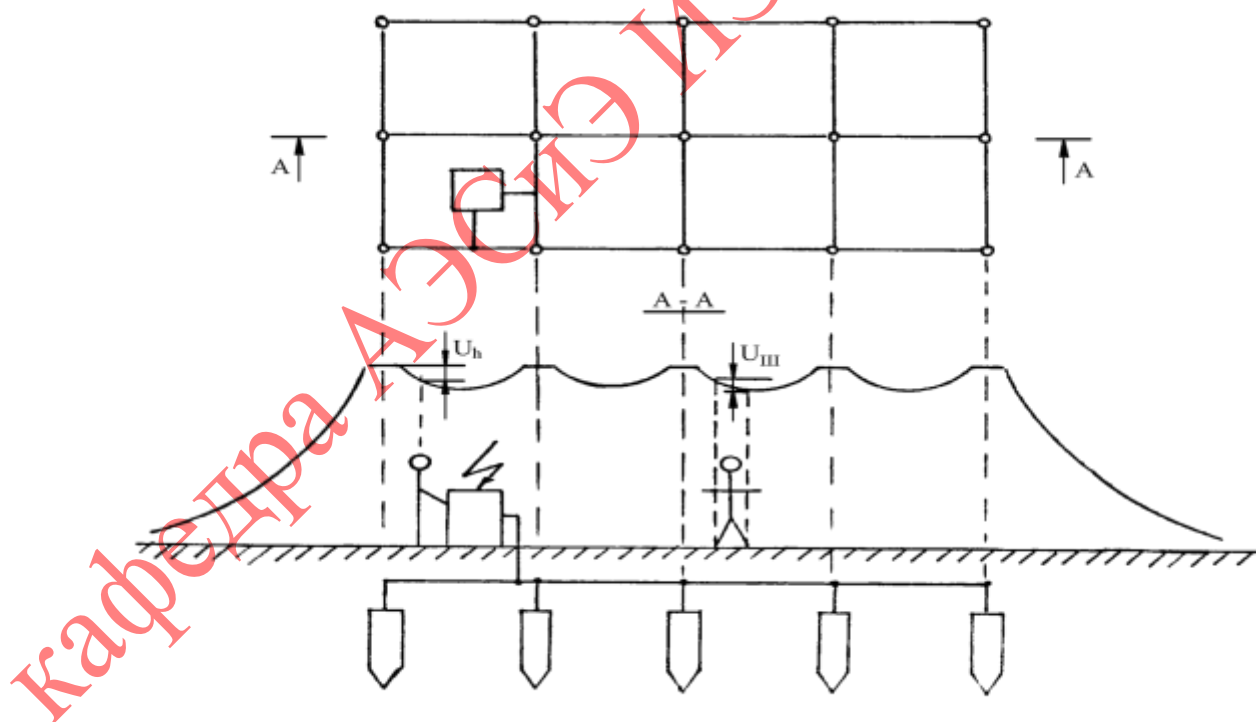


Рисунок 1.4 – Контурное заземляющее устройство

Безопасность при распределенном заземляющем устройстве может быть обеспечена не только уменьшением потенциала заземлителя, но и выравниванием потенциалов на защищаемой территории до таких значений,

чтобы максимальные напряжения прикосновения и шага не превышали допустимых. Это достигается за счет соответствующего размещения одиночных заземлителей на защищаемой территории.

Пример 1

В сети типа IT ($U_n = 380$ В) произошло замыкание двух различных фаз на два отдельно заземленных корпуса. Заземлитель первого корпуса имеет полусферическую форму с радиусом $r = 0,2$ м и расположен на поверхности земли. Человек одной ногой стоит на этом заземлителе. Расстояние до второго заземлителя более 30 м.

Определить напряжение шага $U_{ш}$ и ток I_h , протекающий через человека, если сеть короткая, $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}= 40$ кОм; $R_{31}= 4$ Ом; $R_{32}= 6$ Ом; $R_h=1$ кОм; шаг человека, $a= 0,8$ м; $b_2=0,5$.

Решение:

При замыкании двух различных фаз сети IT на два отдельно заземленных корпуса (например, см. рисунок 1.5) значение тока I_3 , стекающего в землю, практически не зависит от значений сопротивления изоляции фаз относительно земли и определяется как

$$I_3 = \frac{U_n}{R_{31} + R_{32}} = \frac{380}{4 + 6} = 38 \text{ А}$$

При этом потенциал заземлителя первого корпуса составит

$$\varphi_3 = I_3 \cdot R_3 = 38 \cdot 4 = 152 \text{ В}$$

$$U_{ш} = \beta_1 \cdot \beta_1 \cdot \varphi_3$$

где β_1 – коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой. Поскольку человек стоит одной ногой на полусферическом заземлителе, в данном случае $x = r$, и β_1 можно рассчитать следующим образом

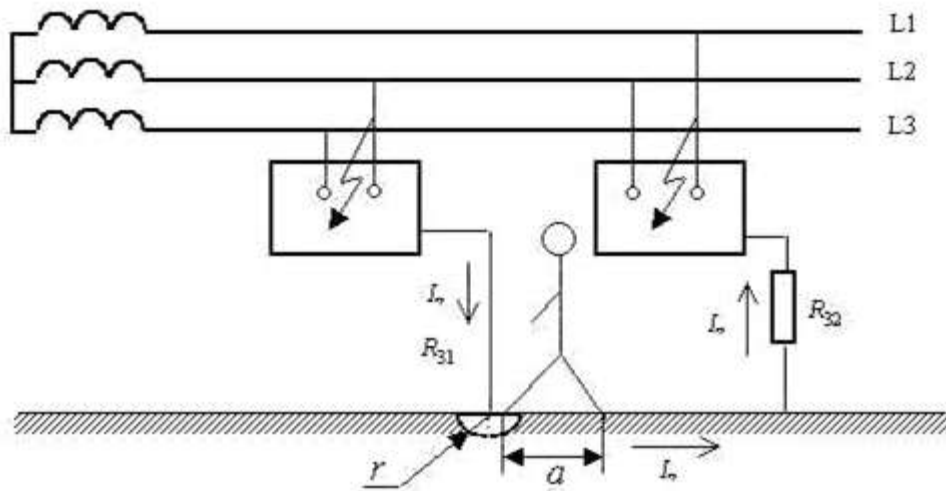


Рисунок 1.5 – Замыкание двух различных фаз на два отдельно заземленных корпуса

В общем случае напряжения шага с учетом формы потенциальной кривой и сопротивления основания растеканию току определяется как

$$\beta_1 = r \cdot a / x(x+a) = a / r+a = 0.8 / 0.2+0.8 = 0.8$$

Коэффициент, учитывающий сопротивление основания растеканию тока, $\beta_2 = 0,5$ по условиям задачи.

Поэтому искомое значение напряжения шага

$$U_{ш} = 0,8 \cdot 0,5 \cdot 152 = 60,8 \text{ В}$$

а ток, протекающий через тело человека,

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} = \frac{60,8}{1000} = 60,8 \text{ мА}.$$

Ответ задачи: $U_{ш}=60,8 \text{ В}$; $I_h = 60,8 \text{ мА}$.

Пример 2

Потребитель электроэнергии подключен к сети типа IT, произошло замыкание одного из фазных проводов на заземленный корпус.

При каком значении сопротивления изоляции напряжение прикосновения человека, касающегося заземленного корпуса, равно длительно допустимому значению.

Дано: $U_{л}=380$ В; $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}=R$; $R_h=1$ кОм; $R_3=4$ Ом; сеть короткая;
 $\alpha_1=\alpha_2=1$.

Решение:

В данном случае значение тока I_3 , стекающего в землю через заземлитель, зависит от значений сопротивления изоляции фаз относительно земли (см. рисунок 1.6) определяется как

$$I_3 = \frac{U_{\phi}}{R_3 + \frac{R}{3}} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot \left(R_3 + \frac{R}{3} \right)}$$

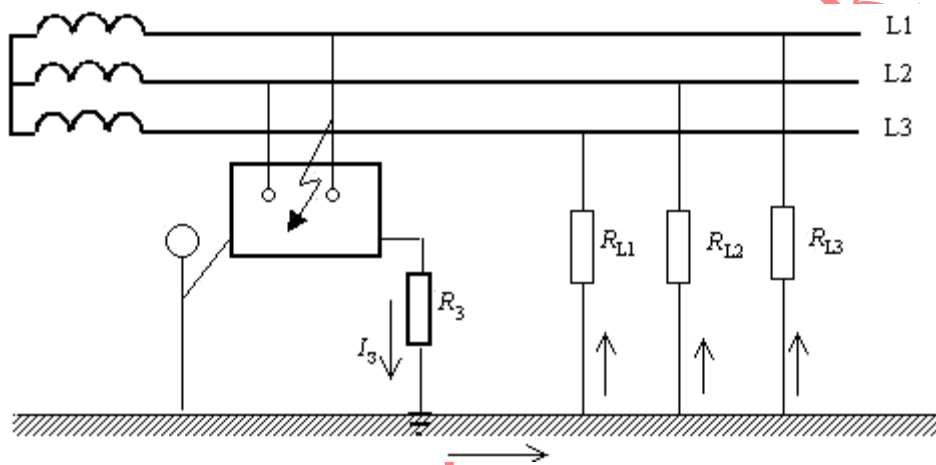


Рисунок 1.6 – Замыкание фазы сети IT на заземленный корпус

Значение напряжения прикосновения человека, касающегося заземленного корпуса, равно в данном случае значению потенциала на заземлителе

$$U_h = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi_3 = \phi_3 = I_3 \cdot R_3,$$

По условиям задачи значение напряжения прикосновения может равняться длительно допустимому значению $U_{д.доп}$, т.е.

$$I_3 \cdot R_3 = U_{д.доп},$$

Из полученного уравнения определяем искомые значения сопротивлений изоляции фаз

$$\frac{U_{л}}{\sqrt{3} \cdot \left(R_3 + \frac{R}{3} \right)} \cdot R_3 = U_{д.доп},$$

$$U_{\text{л}} \cdot R_3 = U_{\text{д.доп}} \cdot \sqrt{3} \cdot \left(R_3 + \frac{R}{3} \right),$$

$$U_{\text{л}} \cdot R_3 - U_{\text{д.доп}} \cdot \sqrt{3} \cdot R_3 = U_{\text{д.доп}} \cdot R_3 \cdot \frac{R}{3},$$

$$R = \frac{R_3 \cdot \sqrt{3}}{U_{\text{д.доп}}} \cdot (U_{\text{л}} - \sqrt{3} \cdot U_{\text{д.доп}}).$$

Подставив в последнее выражение значение длительно допустимого напряжения $U_{\text{д.доп}} = 36$ В, получим искомое значение сопротивления изоляции фаз.

$$R = \frac{4 \cdot \sqrt{3}}{3} (380 - \sqrt{3} \cdot 36) = 63,3 \text{ Ом}.$$

Ответ задачи: при $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 61,3$ Ом

Примечание. При полученном значении сопротивления изоляции (значительно меньшем реального значения) наличие защитного заземления обеспечивает безопасность при замыкании на корпус в сети IT.

Задача 1

Определить значение тока I_h и напряжение прикосновения U_h , если человек прикоснулся к заземленному корпусу электроустановки (рисунок 1.7), на который произошло замыкание фазного провода $L1$ сети типа IT (линейное напряжение – 380 В), а фазный провод $L3$ замкнулся на землю (аварийный режим сети).

Дано: $R_3 = 4$ Ом, $R_{3\text{м}} = 34$ Ом, $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 20$ кОм; человек находится на расстоянии 40 м от заземлителя; $R_h = 1$ кОм; $R_{\text{очн}} = 1$ кОм; сеть короткая.

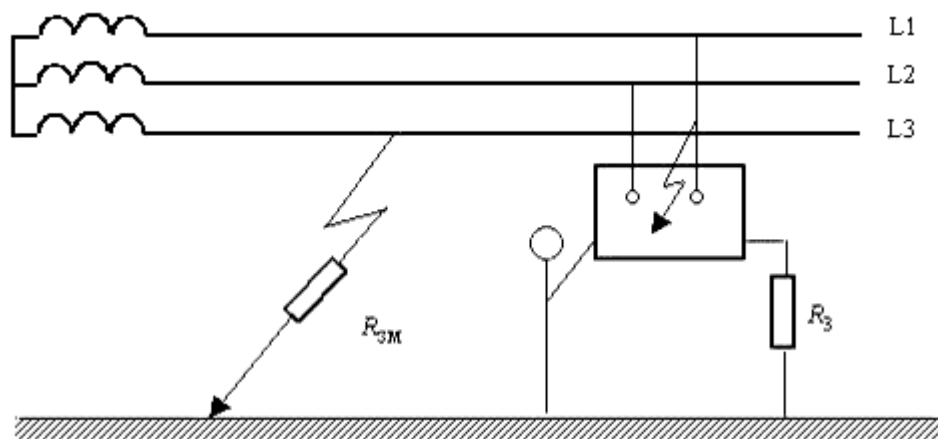


Рисунок 1.7 – Замыкание двух различных фаз на землю и заземленный корпус

Ответ задачи: $I_h = 20$ мА.

Задача 2

Определить значение тока через тело человека, если человек прикоснулся к заземленному корпусу электроустановки, на который произошло замыкание одного из фазных проводов сети типа $TN - C$ (380/220 В) (рисунок 1.8).

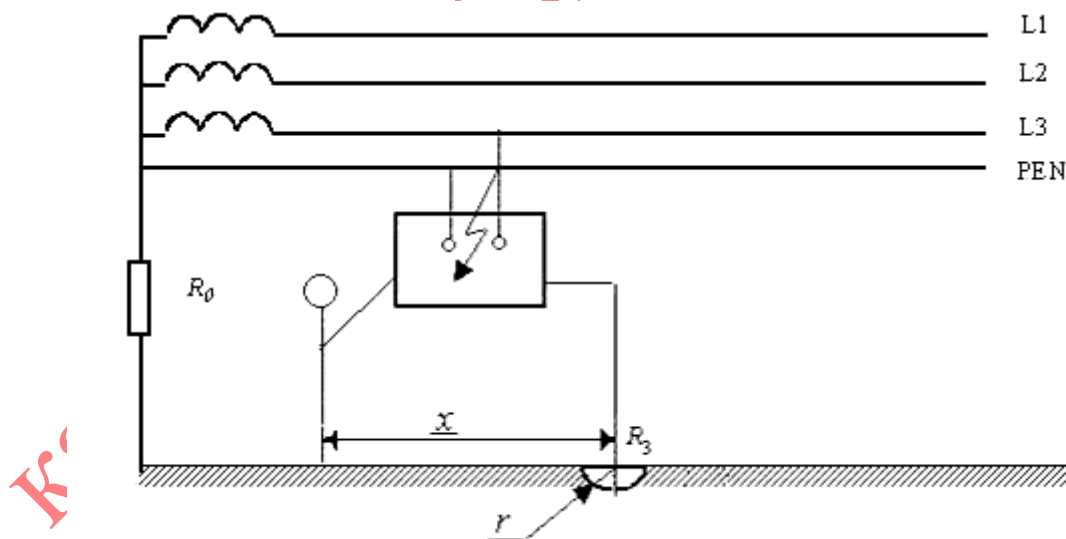


Рисунок 1.8 – Замыкание фазы на заземленный корпус в сети $TN - C$

Дано: $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 30$ кОм; сеть короткая; $R_h = 1$ кОм; $R_0 = 4$ Ом; $R_з = 2$ Ом. Заземлитель полусферой с радиусом $r = 0,4$ м; человек стоит на земле на расстоянии $x = 2$ м от заземлителя; $R_{оч} = 9$ кОм. Оценить опасность

поражения человека током, используя первичные критерии электробезопасности.

Ответ задачи: $I_h=5,9$ мА.

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение защитного заземления.
2. Принцип действия защитного заземления?
3. Область применения защитного заземления?
4. Перечислите типы заземляющих устройств.
5. Перечислите достоинства и недостатки заземляющих устройств.

кафедра АЭСИЭ ИЭЭИНСКФУ

Практическое занятие 2

Защитное зануление

Цель работы: изучить назначение, принцип действия, область применения и расчет защитного зануления

Теоретическая часть

Назначение, принцип действия, область применения. 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 (PE – 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 (рисунок 2.1) 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.

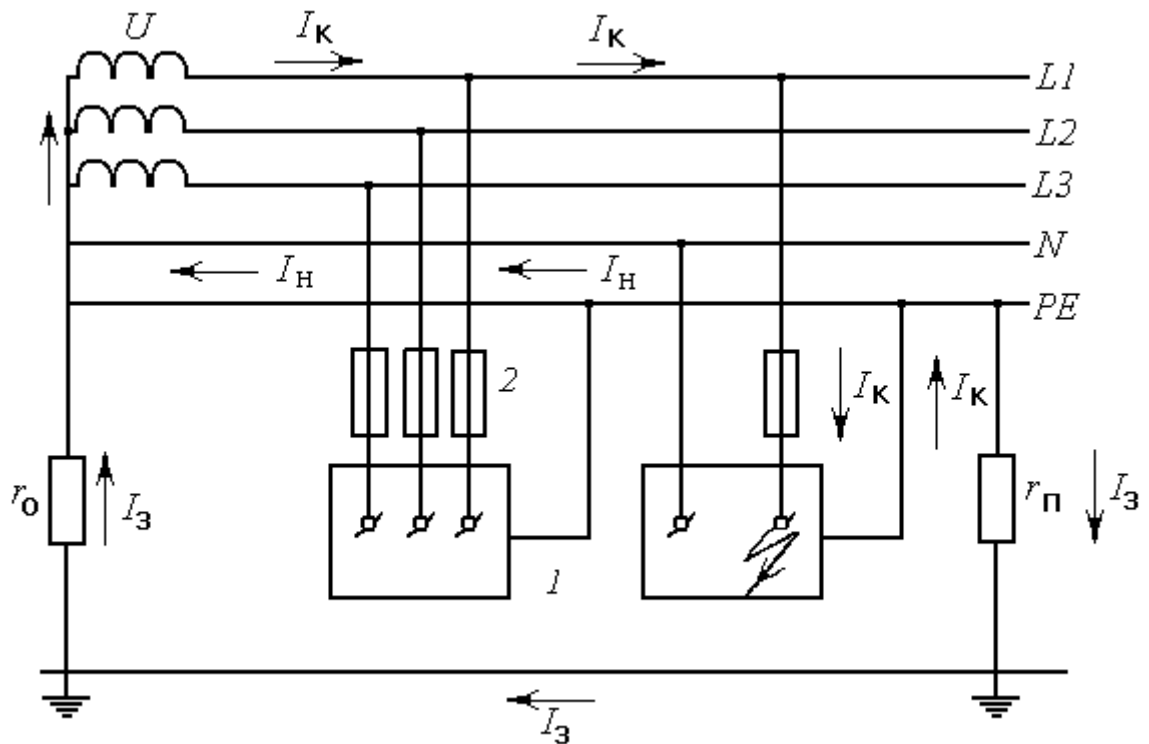


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема зануления в системе TN - S

1 – корпус электроустановки (электродвигатель, трансформатор и т. п.);
 2 – аппараты защиты от токов КЗ (предохранители); R_0 – сопротивление заземления нейтрали обмотки источника тока; R_{II} – сопротивление повторного заземления нулевого защитного проводника; I_k – ток КЗ; I_n – часть тока КЗ, протекающего через нулевой защитный проводник; I_3 – 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 рисунка 2.2 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.

Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока, питающего сеть до 1 кВ, предназначено для снижения напряжения зануленных открытых проводящих частей (а следовательно, нулевого защитного проводника) относительно земли до допустимого значения при замыкании фазного провода 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. 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 ПУЭ 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. При этом в соответствии с ПУЭ должны выполняться следующие требования.

В системе TN время автоматического отключения питания не должно превышать значений, указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – 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 2.1 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 2.1, но не более 5с 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

$$50 \cdot Z_{\Sigma} / U$$

где Z_{Σ} – 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 PE 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 провода на зануленный корпус, вызвал бы срабатывание максимальной токовой защиты за время, указанное в таблице 2.1.

Пример 1

Человек прикоснулся к зануленному корпусу потребителя электроэнергии, питающегося от сети типа $TN-S$ напряжением 380/220 В (рисунок 2.3). При каком соотношении сечений фазного и PE проводников напряжение прикосновения будет равно длительно допустимому при времени срабатывания максимальной токовой защиты 1с ?

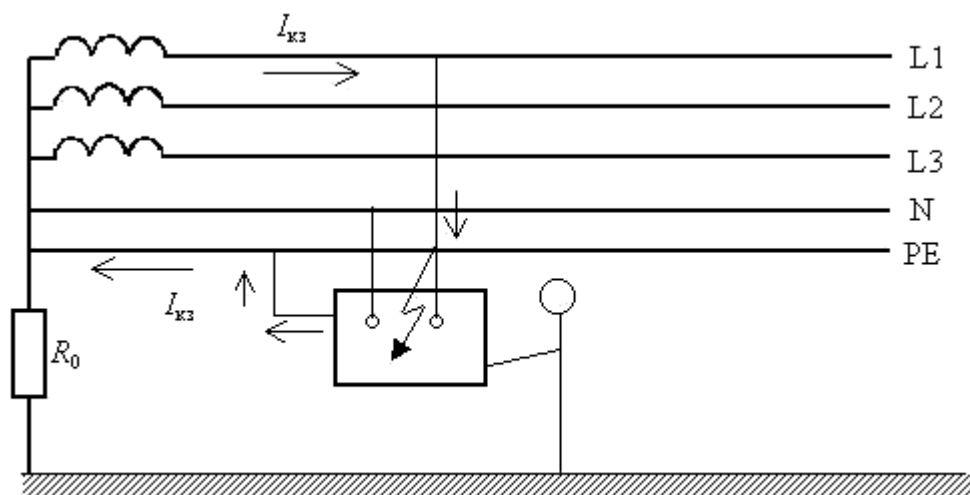


Рисунок 2.3 – Замыкание фазы сети *TN - S* на зануленный корпус

При решении задачи считать, что материал фазного и защитного проводников одинаков, а повторное заземление *PE* – проводника отсутствует.

Решение:

Известно, что сопротивление участка фазного провода до места замыкания на корпус можно определить по формуле:

$$R_{L1} = \rho \cdot l / S_{L1}$$

Аналогично, сопротивление участка *PE* – проводника до места замыкания на корпус можно определить по формуле:

$$R_{PE} = \rho \cdot l / S_{PE}$$

При этом предполагается, что материал фазного и *PE* – проводника одинаков.

При замыкании фазного провода на зануленный корпус возникает ток короткого замыкания, который можно определить по упрощенной формуле:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{R_{L1} + R_{PE}}$$

При этом напряжение корпуса относительно земли, под действие которого попадает человек при прикосновении к корпусу, определяется как:

$$U_{\kappa} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_L}{R_{PE}}}$$

Учитывая, что при прочих одинаковых параметрах проводов

$$\frac{R_{L1}}{R_{PE}} = \frac{S_{PE}}{S_{L1}},$$

а допустимое напряжение прикосновения при заданном времени срабатывания 1с будет равно 50 В, можно определить требуемое соотношение сечений фазного и РЕ – проводов:

$$50 = \frac{220}{1 + \frac{S_{PE}}{S_{L1}}},$$

$$\frac{S_{PE}}{S_{L1}} = 3,4.$$

Ответ задачи: $S_{PE} / S_{L1} = 3,4$.

Пример 2

Два зануленных потребителя электроэнергии питаются от одной сети типа $TN - S$ напряжением 380/220 В. Произошло замыкание фазного провода на корпус второго потребителя, а в это время человек касается корпуса первого потребителя электроэнергии (см. рисунок 2.4).

Определить ток, протекающий через тело человека, прикоснувшегося к корпусу первого потребителя электроэнергии, при условии, что $R_{L1} = R_{PE(2)} = 0,2$ Ом, $R_0 = R_{II} = 3$ Ом, $l_{K1} = 0,3l_{K2}$.

Решение:

Сопротивления участков РЕ проводника до первого и до второго корпусов можно определить по формулам:

$$R_{PE(1)} = \rho \cdot l_{K1} / S_{PE} \quad R_{PE(2)} = \rho \cdot l_{K2} / S_{PE}$$

Если учесть, что $l_{K1} = 0,3 \cdot l_{K2}$, то $R_{PE(1)} = 0,3 \cdot R_{PE(2)}$.

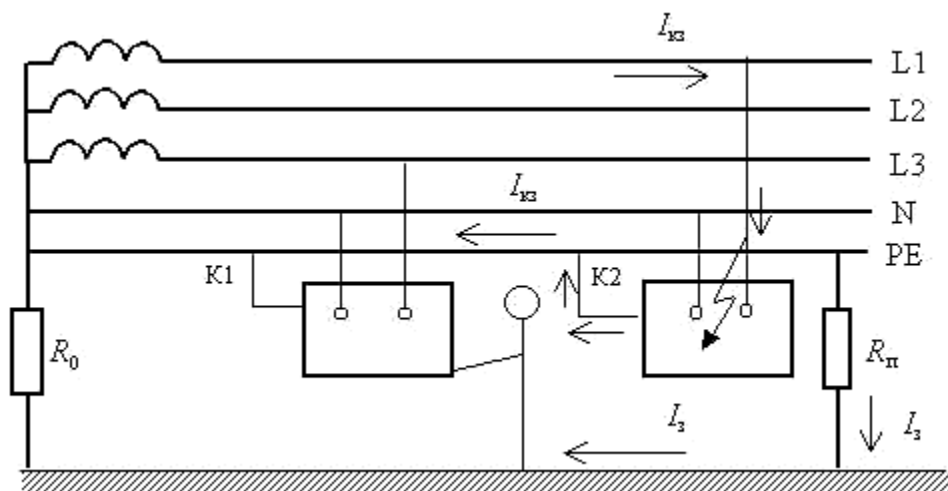


Рисунок 2.4 – Замыкание фазы сети *TN - S* на один из зануленных корпусов при наличии повторного заземления PE провода

При замыкании фазного провода на корпус второго потребителя электроэнергии возникает ток короткого замыкания, который можно рассчитать следующим образом:

$$I_{кз} = \frac{U_{\phi}}{R_{L1} + R_{PE(2)}} = \frac{220}{0,4} = 550 \text{ мА} .$$

Ток замыкания на землю, стекающий через повторное заземление, определяется как:

$$I_3 = \frac{I_{кз} \cdot R_{PE(2)}}{R_0 + R_{п}} = \frac{110}{6} = 18,3 \text{ А} .$$

При этом значение напряжения нулевой точки относительно земли составит:

$$U_0 = I_3 \cdot R_0 = 18,3 \cdot 3 = 55 \text{ В} .$$

Значение напряжения прикосновения для человека, прикоснувшегося к первому корпусу, будет равно значению напряжения на этом корпусе относительно земли, которое можно определить из выражения:

$$U_{K1} = U_0 = I_{кз} \cdot R_{PE(1)} = 55 - 550 \cdot 0,2 \cdot 0,3 = 22 \text{ В} .$$

В итоге искомое значение тока через тело человека, прикоснувшегося к первому корпусу, составит:

$$I_h = \frac{U_{K1}}{R_h} = \frac{22,0}{1} = 22 \text{ мА}.$$

Ответ задачи: $I_h = 22 \text{ мА}$

Задача 1

На зануленный корпус электроустановки произошло замыкание фазного провода трехфазной сети типа *TN-S* напряжением 380/220 В.

Требуется определить, при каком значении сопротивления повторного заземления нулевого защитного проводника (*PE* - провода) напряжение прикосновения для человека, касающегося указанного корпуса, не будет превышать допустимого при времени срабатывания защиты $t = 1 \text{ с}$.

Дано: сопротивление заземления нейтрали питающего трансформатора $R_O = 4 \text{ Ом}$, сопротивление провода на участке от трансформатора до места замыкания фазного $R_\phi = 0,2 \text{ Ом}$, сопротивление нулевого провода $R_{PE} = 0,4 \text{ Ом}$; человек находится на расстоянии более 20 м от заземлителей нейтрали трансформатора и *PE*-провода; сопротивление изоляции и емкости проводов относительно земли равны соответственно бесконечности и нулю; сопротивление основания, на котором стоит человек, и сопротивление его обуви равны нулю.

Ответ задачи: $R_{\Pi} = 2,07 \text{ Ом}$.

Задача 2

От сети типа *TN - C* (380/220 В) запитываются три потребителя электроэнергии, корпуса которых занулены. Открытые проводящие части подсоединяются к *PEN*-проводнику на расстоянии 100, 200 и 400 м от нейтральной точки соответственно. *PEN*-проводник медный ($\rho = 0,018 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) сечением 20 мм^2 . Произошло замыкание на корпус 3. Повторное заземление отсутствует. Два человека касаются 1 и 2 корпусов. Оценить опасность прикосновения для каждого, если известно, что автомат максимальной токовой защиты отключился через 1 сек.

Дано: $R_{h1} = R_{h2} = 1$ кОм, $R_{\phi} = 0,1$ Ом - сопротивление фазного провода до 3 корпуса.

Ответ задачи: $I_{h1} = 43,1$ мА; $I_{h2} = 86,2$ мА.

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение защитного зануления.
2. Принцип действия защитного зануления?
3. Область применения защитного зануления?
4. Как определяется надежность зануления?
5. Требования ПУЭ к системе автоматического отключения.

кафедра АЭСиЭНЭСФУ

Практическое занятие 3

Защитное отключение

Цель работы: изучить назначение, принцип действия, область применения защитного отключения

Теоретическая часть

Назначение, принцип действия, область применения

Защитным отключением называется автоматическое отключение электроустановок при однофазном (однополюсном) прикосновении к частям, находящимся под напряжением, недопустимым для человека, и (или) при возникновении в электроустановке тока утечки (замыкания), превышающего заданные значения.

Назначение защитного отключения - обеспечение электробезопасности, что достигается за счет ограничения времени воздействия опасного тока на человека. Защита осуществляется специальным устройством защитного отключения (УЗО), которое, работая в дежурном режиме, постоянно контролирует условия поражения человека электрическим током.

Область применения: электроустановки в сетях с любым напряжением и любым режимом нейтрали.

Наибольшее распространение защитное отключение получило в электроустановках, используемых в сетях напряжением до 1 кВ с заземленной или изолированной нейтралью.

Принцип работы УЗО состоит в том, что оно постоянно контролирует входной сигнал и сравнивает его с наперед заданной величиной (уставкой). Если входной сигнал превышает уставку, то устройство срабатывает и отключает защищенную электроустановку от сети. В качестве входных сигналов устройств защитного отключения используют различные параметры электрических сетей, которые несут в себе информацию об условиях поражения человека электрическим током.

Все УЗО по виду входного сигнала классифицируют на несколько типов (рисунок 3.1).

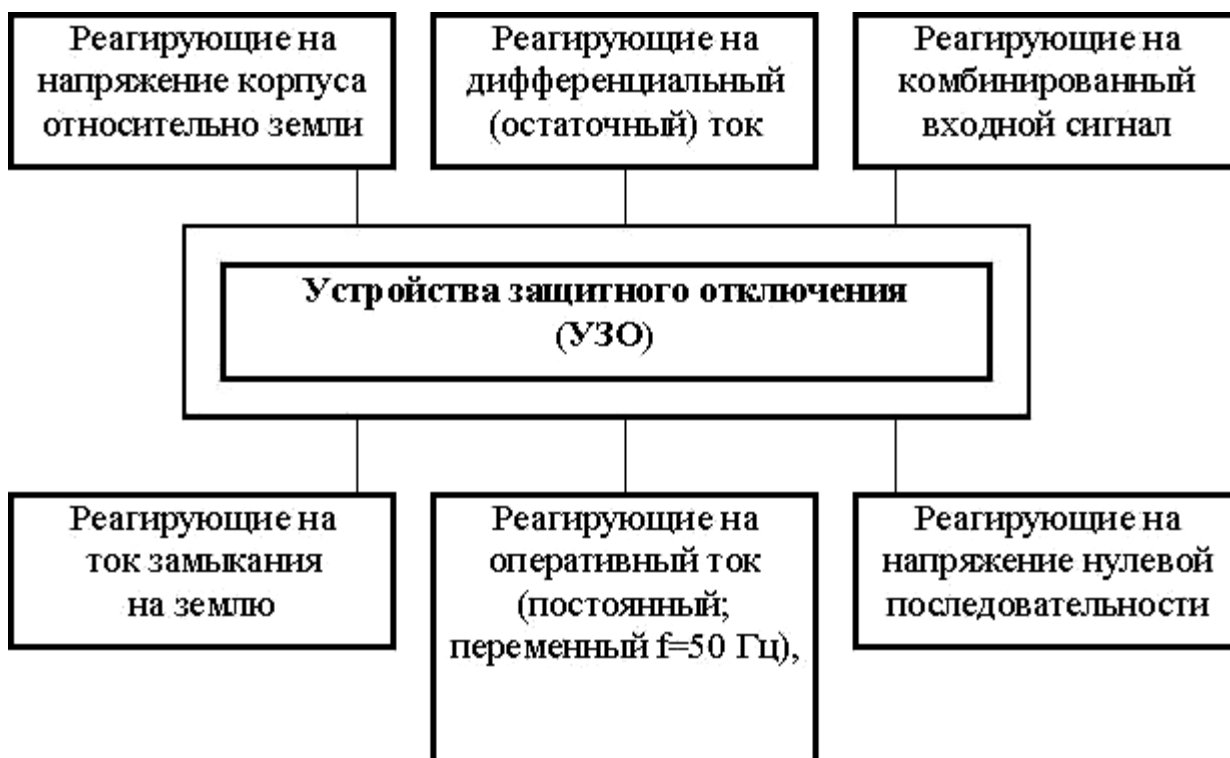


Рисунок 3.1 – Классификация УЗО по виду входного сигнала

Кроме того УЗО могут классифицироваться по другим критериям, например, по конструктивному исполнению.

Основными элементами любого устройства защитного отключения являются датчик, преобразователь и исполнительный орган.

Основными параметрами, по которым подбирается то или иное УЗО являются: номинальный ток нагрузки, т.е. рабочий ток электроустановки, который протекает через нормально замкнутые контакты УЗО в дежурном режиме; номинальное напряжение; уставка; время срабатывания устройства.

Рассмотрим более подробно УЗО, реагирующее на потенциал корпуса относительно земли, предназначенное для обеспечения безопасности при возникновении на заземленном (или зануленном) корпусе электроустановки повышенного потенциала. Датчиком в этом устройстве (рисунок 3.2) служит реле Р, обмотка которого включена между корпусом электроустановки и

вспомогательным заземлителем R_6 . Электроды вспомогательного заземлителя R_6 располагаются вне зоны растекания токов заземлителя R_3 .

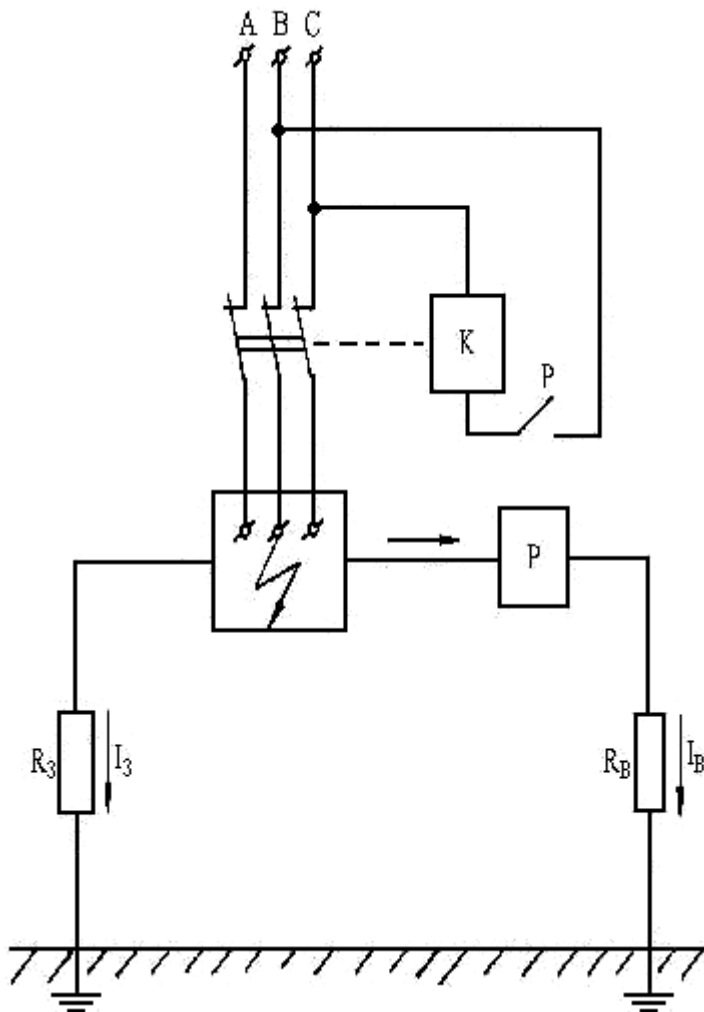


Рисунок 3.2 – Схема УЗО, реагирующего на потенциал корпуса

При замыкании на корпус защитное заземление R_3 снизит потенциал корпуса относительно земли до величины $j_3 = I_3 \cdot R_3$. Если по каким-либо причинам окажется, что $j_3 > j_{доп}$, где $j_{доп}$ - потенциал корпуса, при котором напряжение прикосновения не превышает допустимого, то срабатывает реле P, которое своими контактами замкнет цепь питания катушки коммутационного аппарата и произойдет отключение поврежденной электроустановки от сети.

Фактически данный тип УЗО дублирует защитные свойства заземления или зануления и применяется в качестве дополнительной защиты, повышая надежность заземления или зануления.

Данный тип УЗО может применяться в сетях с любым режимом нейтрали, когда заземление или зануление неэффективно.

УЗО, реагирующее на дифференциальный (остаточный) ток, находят широкое применение во всех отраслях промышленности. Характерной их особенностью является многофункциональность. Такие УЗО могут осуществлять защиту человека от поражения электрическим током при прямом прикосновении, при косвенном прикосновении, при несимметричном снижении изоляции проводов относительно земли в зоне защиты устройства, при замыканиях на землю и в других ситуациях.

Принцип действия УЗО дифференциального типа заключается в том, что оно постоянно контролирует дифференциальный ток и сравнивает его с уставкой. При превышении значения дифференциального тока уставки УЗО срабатывает и отключает аварийный потребитель электроэнергии от сети. Входным сигналом для трехфазных УЗО является ток нулевой последовательности. Входной сигнал УЗО функционально связан с током, протекающим через тело человека I_h .

Область применения УЗО дифференциального типа – сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ (система $TN - S$).

Схема включения УЗО, реагирующего на дифференциальный ток в сети с заземленной нейтралью типа $TN - S$ представлена на рисунке 3.3.

Датчиком такого устройства является трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), на выходных обмотках которого формируется сигнал, пропорциональный току через тело человека I_h . Преобразователь УЗО (П) сравнивает значение входного сигнала с уставкой, значение которой определяется допустимым током через человека, усиливает входной сигнал до уровня, необходимого для управления исполнительным органом (ИО).

Исполнительный орган, например, контактор, отключает электроустановку

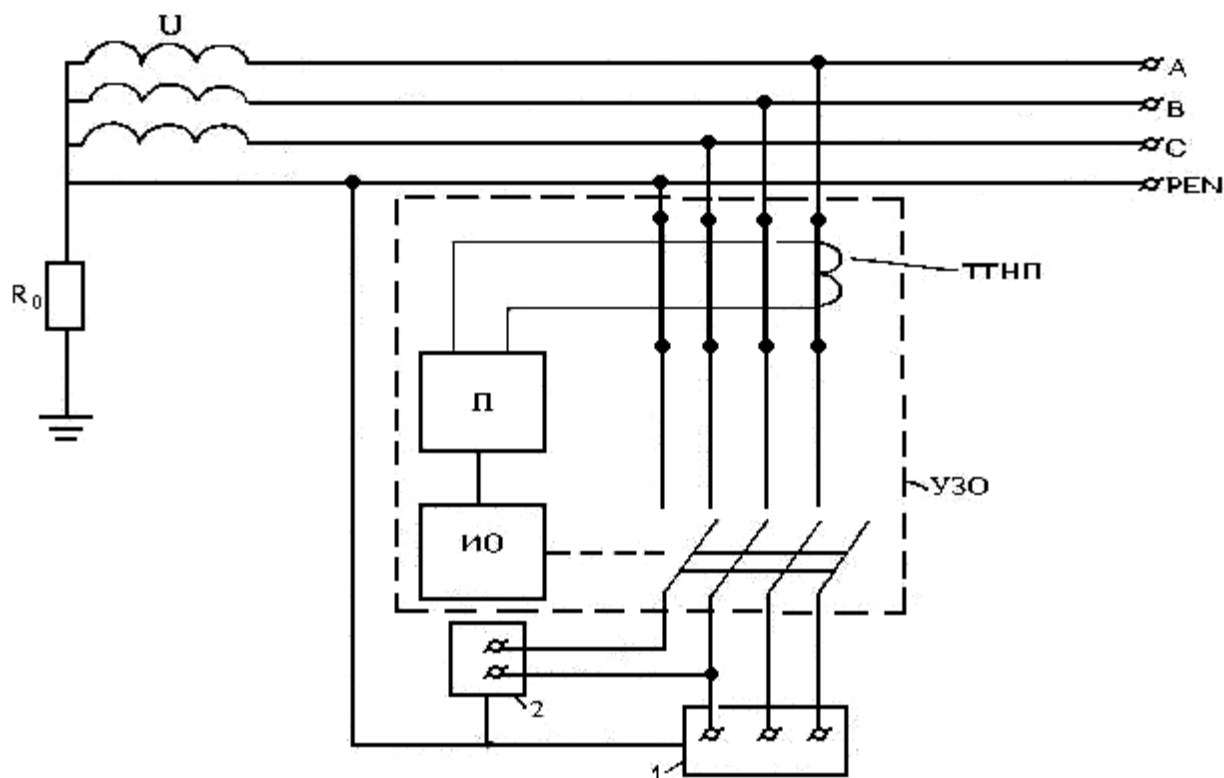


Рисунок 3.3 – Схема подключения к сети УЗО (система $TN - S$), реагирующего на дифференциальный ток

от сети в случае возникновения опасности поражения электрическим током в зоне защиты УЗО.

По условиям функционирования дифференциальные УЗО подразделяются на следующие типы: AC , A , B , S , G .

УЗО типа AC – устройство защитного отключения, реагирующее на переменный синусоидальный дифференциальный ток, возникающий внезапно, либо медленно возрастающий.

УЗО типа A – устройство защитного отключения, реагирующее на переменный синусоидальный дифференциальный ток и пульсирующий постоянный дифференциальный ток, возникающие внезапно, либо медленно возрастающие.

УЗО типа *B* – устройство защитного отключения, реагирующее на переменный, постоянный и выпрямленный дифференциальные токи.

УЗО типа *S* – устройство защитного отключения, селективное (с выдержкой времени отключения).

УЗО типа *G* – то же, что и типа *S*, но с меньшей выдержкой времени

Конструктивно дифференциальные УЗО разделяются на два типа:

Электромеханические УЗО, функционально не зависящие от напряжения питания. Источником энергии, необходимой для функционирования таких УЗО – выполнения защитных функций, включая операцию отключения, является сам входной сигнал – дифференциальный ток, на который оно реагирует.

Электронные УЗО, функционально зависящие от напряжения питания. Их механизм для выполнения операции отключения нуждается в энергии, получаемой либо от контролируемой сети, либо от внешнего источника.

Основными параметрами УЗО дифференциального типа являются:

- Уставка (дифференциальный отключающий ток);
- Время срабатывания;
- Ток нагрузки;
- Напряжение питания.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается целый ряд УЗО различного назначения. Кроме того, широко используются УЗО известных зарубежных фирм, таких как Siemens, ABB, GE Power, ABL Sursum, Hager, AEG, Vaco, Legrand, Merlin-Gerin, Circutor и др.

Пример 1

Определить допустимое время срабатывания УЗО (в предположении, что оно может быть установлено) для случая прикосновения человека к проводу сети типа *IT* в нормальном режиме.

Параметры сети: $U_{JI} = 380$ В, $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 200$ кОм; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C = 10$ мкФ; сопротивление тела человека $R_h = 2$ кОм.

Решение:

Так как по условиям задачи емкость фазных проводов относительно земли $C = 10$ мкФ весьма большая, то влиянием их полного сопротивления на значение тока через тело человека при прямом однофазном прикосновении можно пренебречь и определить его по формуле:

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h} = \frac{220}{2} = 110 \text{ мА} .$$

Время срабатывания УЗО определяется из соотношения

$$I_{h\text{макс}} = \frac{50}{T} .$$

Исходя из того, что в данном случае $I_{h\text{макс}} = 110$ мА

$$T = \frac{50}{110} = 0,45 \text{ с} .$$

Ответ задачи: $t_{cp} = 0,45$ с.

Задача

В сети типа $TN-S$ с напряжением 380/220В установлено дифференциальное устройство защитного отключения на ТТНП.

Требуется определить, сработает ли УЗО и каким должно быть его время срабатывания, чтобы обеспечить безопасность при прикосновении человека к фазному проводу в нормальном режиме работы сети.

Дано: ток уставки.

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение и принцип действия УЗО.
2. Область применения защитного отключения?
3. Принцип действия УЗО дифференциального типа?
4. Типы дифференциального УЗО?

Практическое занятие 4

Анализ электробезопасности сетей типа *IT* и *TN-C*

Цель работы: получить представление об анализе электробезопасности электрических сетей типа *IT* и *TN-C* при различных прикосновениях человека

Теоретическая часть

Анализ электробезопасности электрических сетей типа *IT*

Для трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью типа *IT*, напряжением до 1 кВ (рисунок 4.1) характерным является то, что 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.

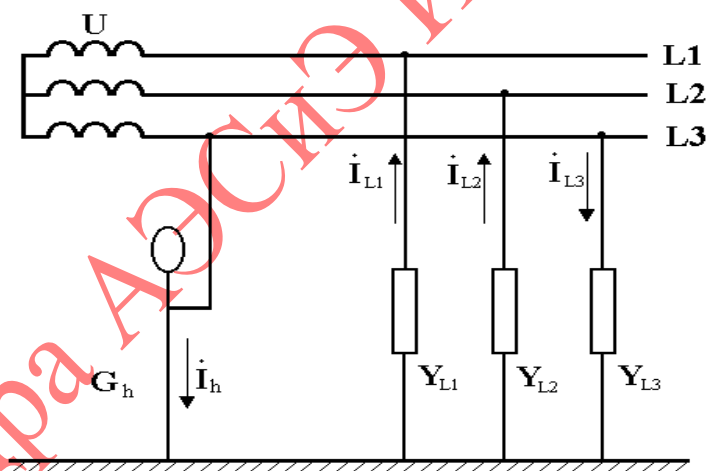


Рисунок 4.1 – Однофазное прикосновение в сети с изолированной нейтралью типа *IT* при нормальном режиме работы

Действительно, ток через тело человека и напряжение прикосновения описываются следующими выражениями (при условии, что $Y_0 = 0$; $Y_{PEN} = 0$):

$$I_h = UG_h \frac{Y_{L2}(1-a^2) + Y_{L3}(1-a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h}, \quad U_h = U \frac{Y_{L2}(1-a^2) + Y_{L3}(1-a)}{Y_{L1} + Y_{L2} + Y_{L3} + G_h}.$$

где Y_{L1}, Y_{L2}, Y_{L3} – полные проводимости изоляции фазных проводов относительно земли в комплексной форме:

$$Y_{L1} = \frac{1}{R_{L1}} + j\omega C_{L1}, \quad Y_{L2} = \frac{1}{R_{L2}} + j\omega C_{L2}, \quad Y_{L3} = \frac{1}{R_{L3}} + j\omega C_{L3},$$

U – действующее значение фазного напряжения сети;

$G_h = \frac{1}{R_h}$ – проводимость человека;

При равенстве проводимостей фазных проводов относительно земли $Y_{L1} = Y_{L2} = Y_{L3} = Y$ (т.е. при равенстве сопротивлений изоляции и емкостей фазных проводов относительно земли $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$ и $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C$), ток через тело человека и напряжение прикосновения определяется:

$$I_h = UG_h \frac{3Y}{3Y + G_h}, \quad \text{или} \quad I_h = \frac{U}{R_h + Z/3},$$

где Z – полное сопротивление фазного провода относительно земли в комплексной форме:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C},$$

R – активное сопротивление изоляции фазного провода относительно земли; C – емкость фазного провода относительно земли.

В действительной форме этот ток равен:

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

При равенстве сопротивление изоляции фазных проводов относительно земли $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R$ и отсутствии емкостей, т.е. $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C = 0$, выражение для нахождения тока через человека упрощается:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3}.$$

Таким образом, в сетях с изолированной нейтралью при нормальном режим 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 опасность уменьшается. Этот вывод иллюстрируется графиками зависимости $I_h = f(R)$ при $C = 0$ (что может иметь место в коротких сетях) и $I_h = f(C)$ при $R = const$, представленными на рисунке 4.2:

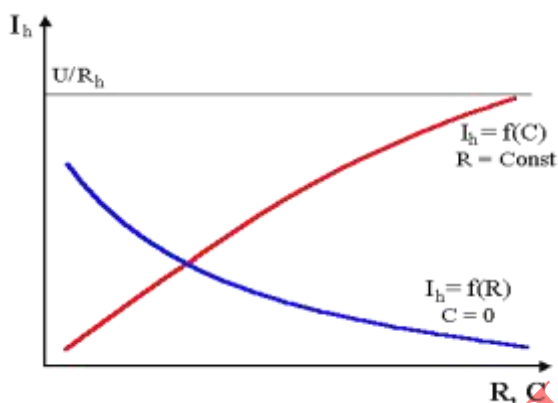


Рисунок 4.2 – Зависимость значения тока, протекающего через тело человека, прикоснувшегося к фазному проводу в сети IT с симметричными параметрами в нормальном режиме работы, от сопротивления изоляции и емкости фазных проводов относительно земли

При аварийном режиме работы сети (рисунок 4.3), когда один из фазных проводов, например, провод $L2$, замкнулся на землю, опасность поражения током человека, прикоснувшегося к исправному фазному проводу, значительно возрастает.

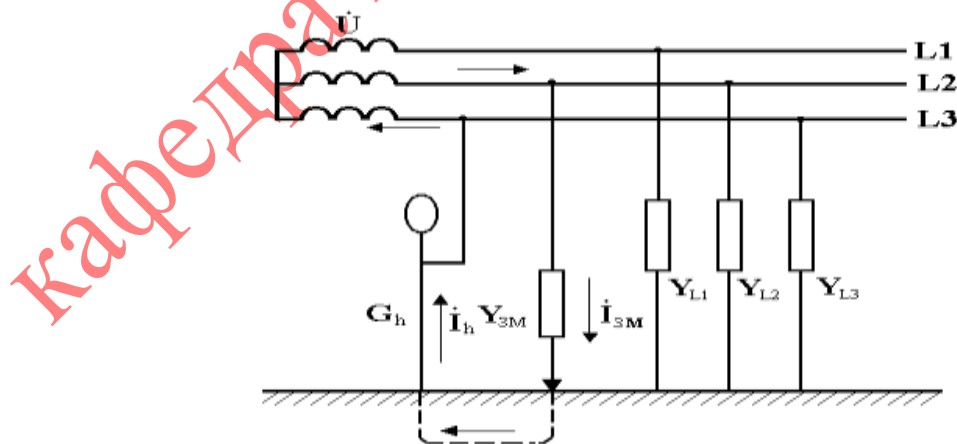


Рисунок 4.3 – Однофазное прикосновение к исправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

В этом случае ток через тело человека будет равен:

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h + R_{3M}},$$

где R_{3M} - сопротивление растеканию тока в месте замыкания фазного провода на землю (на рисунке 4.3 – фазного провода $L2$).

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

$$I_h = \frac{U\sqrt{3}}{R_h}, \quad U_h = U\sqrt{3}.$$

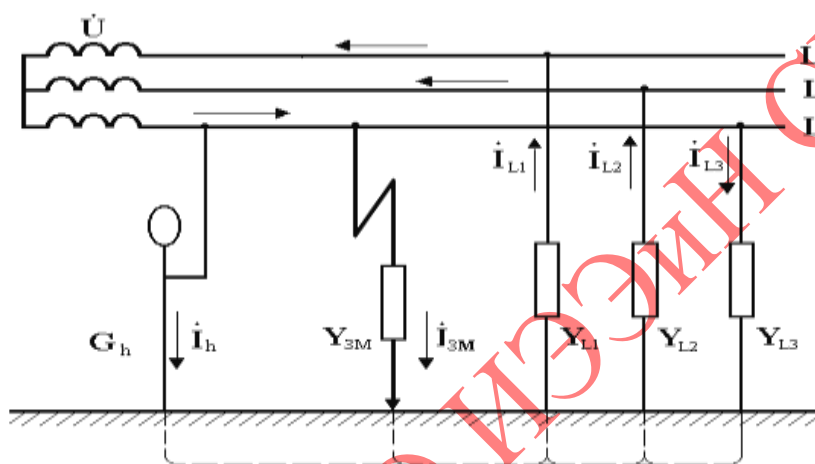


Рисунок 4.4 – Однофазное прикосновение к неисправному проводу в сети с изолированной нейтралью типа IT при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа IT, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (на рисунке 4.4 человек касается фазного провода $L3$) ток через тело человека будет определяться падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю R_{3M} :

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h} \alpha_1 \alpha_2,$$

где I_{3M} - ток замыкания на землю; α_1, α_2 - коэффициенты напряжения прикосновения.

При $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$:

$$I_h = \frac{I_{3M} R_{3M}}{R_h}.$$

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:

$$I_h = \frac{U}{R_{3M} + Z/3}.$$

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.

Анализ электробезопасности сетей типа $TN-C$

Для трехфазной сети с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ типа $TN-C$ (рисунок 4.5) значения тока, протекающего через тело человека и напряжение прикосновения определяются фазным напряжением сети и не зависят от сопротивления изоляции и емкости проводов относительно земли.

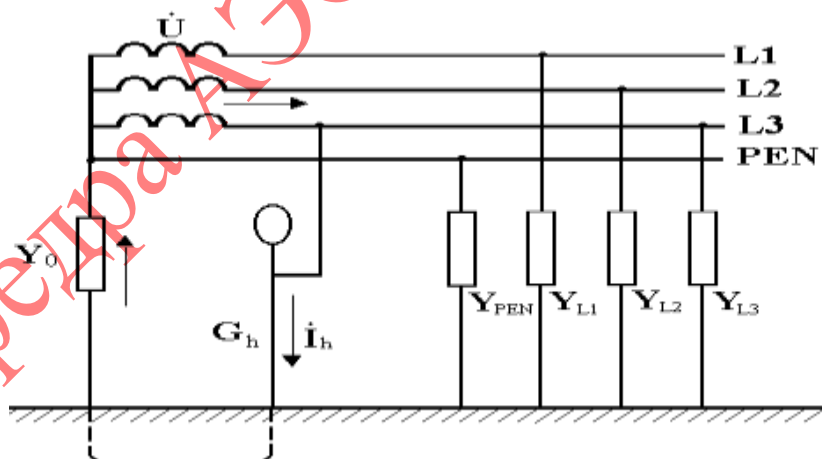


Рисунок 4.5 – Однофазное прямое прикосновение в сети с заземленной нейтралью типа $TN-C$ при нормальном режиме работы

Действительно, проводимости фазного и нулевого проводников относительно земли по сравнению с $U_0 = 1/R_0$ проводимостью заземления

нейтрали малы ($U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} \ll U_0$). При этом выражение для тока, протекающего через тело человека при прикосновении к фазному проводу при нормальном режиме работы сети $TN - C$ (рисунок 4.5), принимает вид:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R_0},$$

где R_0 – сопротивление рабочего заземления нейтрали.

Напряжение прикосновения в этом случае определяется из уравнения:

$$U_h = \frac{UR_h}{R_h + R_0}.$$

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

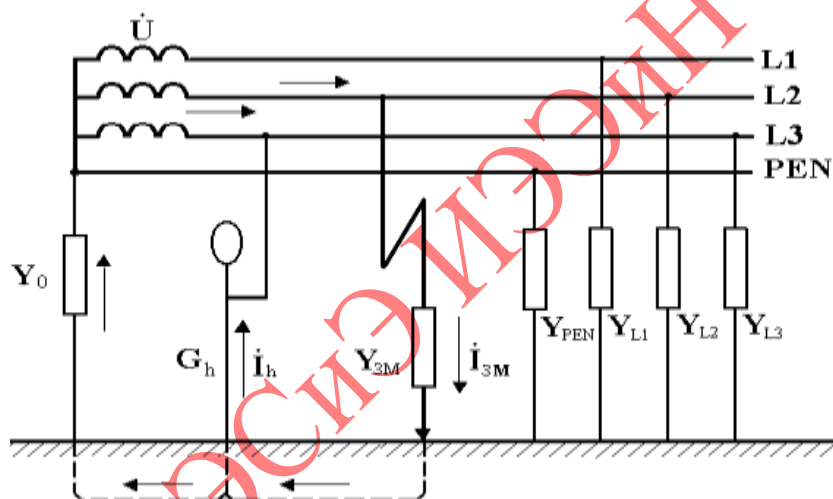


Рисунок 4.6 – Прикосновение к исправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа $TN - C$ при аварийном режиме работы

При аварийном режиме, когда один из фазных проводов сети, например, провод $L2$ (рисунок 4.6), замкнут на землю через относительно малое сопротивление R_{3M} , а человек прикасается к исправному фазному проводу, уравнение напряжения прикосновения имеет следующий вид:

$$U_h = U \frac{Y_{3M}(1-a) + Y_0}{Y_{3M} + Y_0 + Y_h}.$$

Здесь учтено, что Y_{L1}, U_{L2} и U_{PEN} малы по сравнению с U_0 , а U_{L3} – по сравнению с U_0 и U_{3M} , т.е. ими можно пренебречь и считать равными нулю.

С учетом того, что:

$$Y_{3M} = \frac{1}{R_{3M}}, Y_0 = \frac{1}{R_0}, Y_h = \frac{1}{R_h},$$

Напряжение прикосновения в действительной форме имеет вид:

$$U_h = UR_h \frac{\sqrt{R_{3M}^2 + 3R_{3M}R_0 + (R_0 \cdot \sqrt{3})^2}}{R_{3M} + R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)},$$

Учитывая, что:

$$3R_{3M}R_0 \approx 2\sqrt{3R_{3M}R_0},$$

предыдущее выражение можно записать как:

$$U_h = UR_h \frac{R_{3M} + R_0 \cdot \sqrt{3}}{R_{3M}R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)},$$

При этом выражение для определения тока через тело человека имеет вид:

$$I_h = U \frac{R_{3M} + R_0 \sqrt{3}}{R_{3M}R_0 + R_h(R_{3M} + R_0)}.$$

Рассмотрим два характерных случая:

1. Если принять, что сопротивление замыкания фазного провода на землю R_{3M} равно нулю, то напряжение прикосновения:

$$U_h = U\sqrt{3}.$$

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

2. Если принять равным нулю сопротивления заземления нейтрали R_0 , то:

$$U_h = U,$$

т.е. напряжение, под которым окажется человек, будет практически равно фазному напряжению.

Однако в реальных условиях сопротивления R_{3M} и R_0 всегда больше нуля, поэтому напряжение, под которым оказывается человек, прикоснувшийся в аварийный период к исправному фазному проводу трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью, т.е. напряжение прикосновения U_h всегда меньше линейного, но больше фазного, то есть:

$$U_\phi \sqrt{3} > U_h > U_\phi.$$

С учетом того, что всегда $R_{3M} > R_0$, напряжение прикосновения U_h в большинстве случаев незначительно превышает значение фазного напряжения, что менее опасно для человека, чем в аналогичной ситуации в сети типа *IT*.

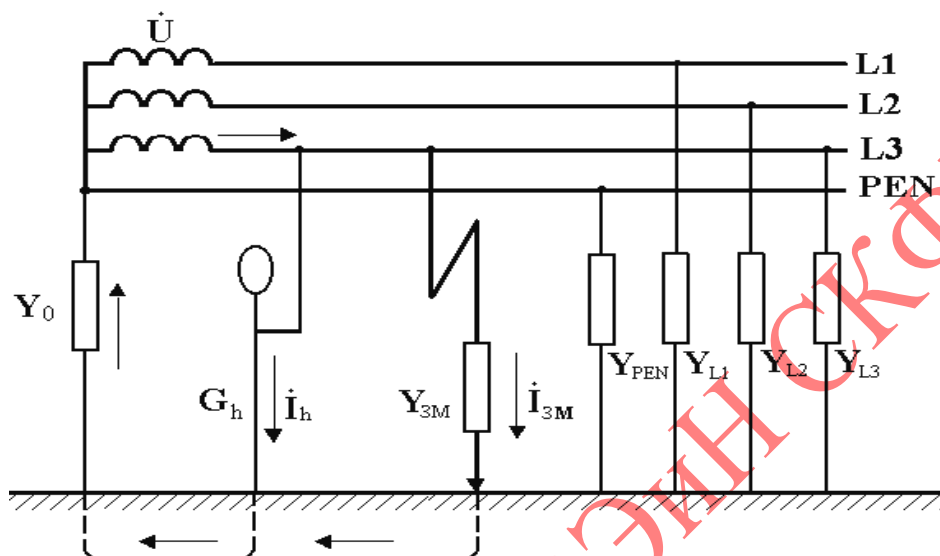


Рисунок 4.7 – Прикосновение к неисправному проводу в сети с заземленной нейтралью типа *TN - C* при аварийном режиме работы

При аварийном режиме работы сети типа *TN - C*, когда человек касается провода, замкнувшегося на землю (рисунок 4.7 человек касается фазного провода *L3*) ток через тело человека будет определяться, также, как и в сети типа *IT*, падением напряжения на сопротивлении растеканию тока в месте замыкания на землю R_{3M} :

$$I_h = (I_{3M} R_{3M} \cdot \alpha_1 \alpha_2) / R_{3M}:$$

где I_{3M} – ток замыкания на землю; α_1, α_2 – коэффициенты напряжения прикосновения.

При $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$:
$$I_h = (I_{3M} R_{3M}) / R_h:$$

Ток замыкания на землю в сети *TN-C* зависит только от сопротивления растеканию тока R_{3M} , сопротивления заземления нейтрали R_0 и сопротивления тела человека R_h . Если принять во внимание, что обычно $R_{3M} \ll R_h$, то:

$$I_{\text{зм}} = \frac{U}{R_{\text{зм}} + R_0}.$$

В этом случае напряжение прикосновения лишь незначительно отличается от значения фазного напряжения.

Таким образом, прикосновение к неисправному фазному проводу (замкнувшемуся на землю) в сети *TN - C* практически также опасно, как к исправному. Значение тока, протекающего через тело человека, в этом случае почти такое же, как при прямом однофазном прикосновении в нормальном режиме работы в сети *TN-C*.

Задача 1

В сети напряжением $380/220 \text{ В}$, 50 Гц с заземленной нейтралью типа *TN-C* произошло замыкание на землю фазного провода, при этом: $R_{\text{зм}}=18 \text{ Ом}$; $R_0=4 \text{ Ом}$; $R_h=1 \text{ кОм}$.

Какой ток протекает через тело человека при прикосновении к поврежденной фазе, если человек находится на расстоянии 40 м от места замыкания на землю?

Принципиальная схема, соответствующая условию задачи, приведена ниже.

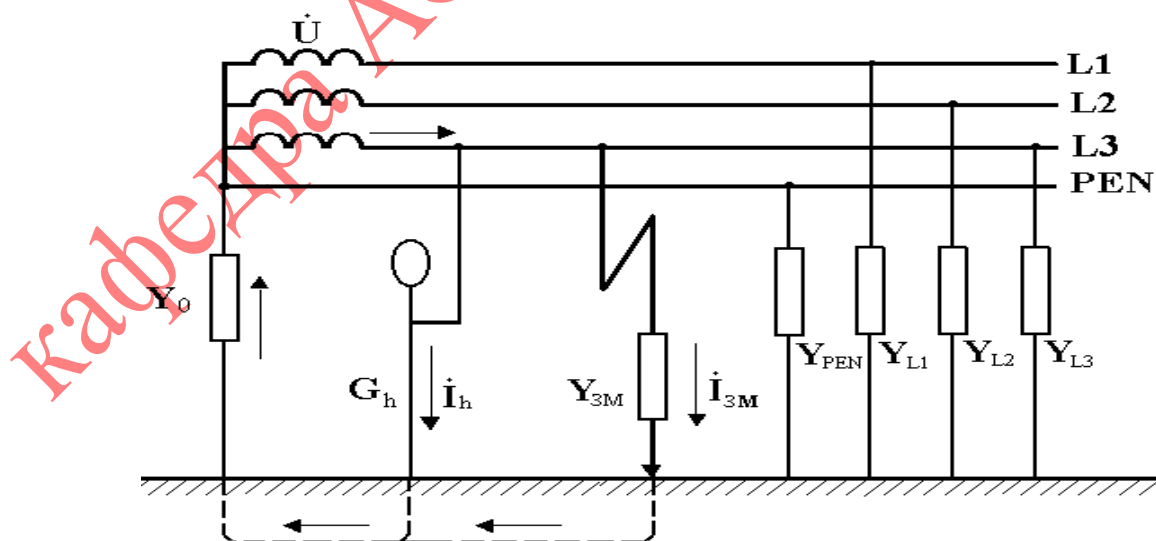


Рисунок 4.8 – Замыкание фазного провода на землю в сети типа *TN - C*

Решение

1. Рассчитаем ток замыкания на землю по формуле:

$$I_{\text{зм}} = \frac{U}{R_{\text{зм}} + R_0} = \frac{220}{18 + 4} = 10 \text{ А.}$$

При этом учтено, что R_h и $R_{\text{зм}}$ включены параллельно и $R_h \gg R_{\text{зм}}$.

2. Определим напряжение поврежденного фазного провода относительно земли по формуле:

$$U_{\text{зм}} = I_{\text{зм}} \cdot R_{\text{зм}}, U_{\text{зм}} = 10 \cdot 18 = 180 \text{ В}$$

3. Рассчитаем ток через тело человека по формуле:

$$I_h = \frac{U_{\text{зм}}}{R_h} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2,$$

Так как человек находится на расстоянии 40 м от места замыкания на землю, α_1 и α_2 равны единице получим:

$$I_h = \frac{U_{\text{зм}}}{R_h} = \frac{180}{1} = 180 \text{ мА.}$$

Ответ : $I_h = 180 \text{ мА}$ - справедлив в том случае, когда человек стоит вне зоны растекания тока с поврежденного провода.

Задача 2

Определить ток, протекающий через тело человека I_h при однофазном прикосновении к замкнувшемуся на землю проводу 3-х фазной 3-х проводной сети с изолированной нейтралью типа IT, если человек находится на расстоянии 30 м от места замыкания на землю.

Дано: $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, $R_h = 2 \text{ кОм}$; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = 0$;

$R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 12 \text{ кОм}$; $R_{\text{зм}} = 16 \text{ Ом}$.

Ответ: 88 мА.

Задача 3

Человек прикоснулся к фазному проводу сети типа *IT* при нормальном режиме работы. Определить ток, протекающий через тело человека I_h для двух случаев:

1) $U = 220 \text{ В}$, $R_h = 1 \text{ кОм}$; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = 0$; $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 30 \text{ кОм}$.

2) $U = 220 \text{ В}$, $R_h = 1 \text{ кОм}$; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = \infty$; $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 30 \text{ кОм}$

Принципиальная схема, соответствующая условию задачи, приведена ниже.

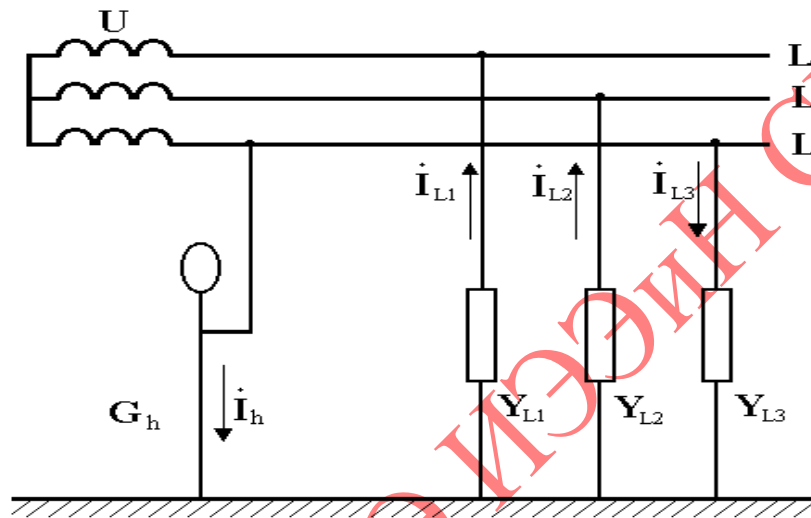


Рисунок 4.9 – Прикосновение к фазному проводу сети типа *IT* при нормальном режиме работы.

Решение

1. Рассчитаем ток, протекающий через тело человека в первом случае, по формуле:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3} = \frac{220}{1 + 30/3} = 20 \text{ мА}$$

2. Во втором случае ток, протекающий через тело человека, определяется по формуле:

$$I_h = \frac{U}{R_h + Z/3}, \quad Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{1/R + j\omega C}$$

$$I_h = \frac{U}{R_h + R/3}, \quad Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{1/R + j\omega C}$$

С учетом того, что при $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = \infty$ $Z=0$:

$$I_h = \frac{U}{R_h} = \frac{220}{1} = 220 \text{ мА.}$$

Ответ задачи: 1) 20 мА; 2) 220 мА.

Задача 4

Определить ток, протекающий через тело человека I_h при прямом однофазном прикосновении к проводу сети типа $TN - C$ при нормальном режиме работы. Параметры сети: $U = 220 \text{ В}$, $R_h = 2 \text{ кОм}$; $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = 0,3 \text{ мкФ}$; $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R = 50 \text{ кОм}$; $R_0 = 4 \text{ Ом}$. Ответ: 110 мА.

Задача 5 Человек прикоснулся к проводу однофазной двухпроводной сети $R_h = 1000 \text{ Ом}$. Определить U_{np} и I_h при нормальном и аварийном режимах работы. Определить I_h в случае прикосновения в сети с заземленным проводом а) с учетом r_n и $r_{об}$; б) без учета r_n и $r_{об}$:

Таблица 1.2 – Варианты заданий

№ вар	$U, \text{ В}$	$r_1=r_2=r_3 \times 10^3, \text{ Ом}$	$r_{зм}, \text{ Ом}$	$r_0, \text{ Ом}$	$r_n \times 10^3, \text{ Ом}$	$r_{об} \times 10^3, \text{ Ом}$
1	220	1	25	10	30	20
2	1000	10	40	15	40	30
3	220	20	30	20	40	15
4	220	30	45	15	25	15
5	1000	40	35	10	30	25
6	1000	1	25	15	35	20
7	220	10	40	20	30	30
8	1000	20	30	10	40	15
9	220	30	25	20	35	25
10	1000	40	15	10	25	35

Задача 6 Человек прикоснулся к проводу 3х-фазной 3х- проводной сети $U=380\text{В}$ с изолированной нейтралью $R_h = 1000 \text{ Ом}$. Определить I_h .

Таблица 1.3 – Варианты заданий

№ вар	Режим работы.	$X_c, \times 10^3, \text{ Ом}$	$r, \text{ Ом}$	$r_{зм}, \text{ Ом}$
1	Норм	100	∞	-
2	Авар	32	10^4	100
3	Авар	32	10^4	50

Продолжение таблицы 1.3

4	Норм	0	3×10^3	-
5	Авар	32	10^4	4
6	Норм	32	∞	-
7	Норм	0	5×10^3	-
8	Авар	32	10^4	0,5
9	Норм	10	∞	-
10	Авар	32	10^4	20
11	Норм	6	∞	-
12	Норм	5	∞	-
13	Норм	0	40×10^3	-
14	Авар	32	10^4	80
15	Норм	2,7	∞	-

Контрольные вопросы

1. Ответьте на вопрос: Как разделяются электроустановки по условиям электробезопасности в зависимости от напряжения?

Варианты ответа:

- На электроустановки напряжением до 1000 В и электроустановки выше 1000 В
- На электроустановки высокого и низкого напряжения
- На электроустановки безопасного (до 42 В) и опасного напряжения .

2. Решите задачу: Определить ток, протекающий через тело человека I_h при однофазном прикосновении к исправному проводу 3-х фазной 3-х проводной сети с изолированной нейтралью в аварийном режиме, если человек находится на расстоянии 30 м от места замыкания на землю.

Исходные данные: $U=220 \text{ В}$, $R_h=1 \text{ кОм}$; $C_{L1}=C_{L2}=C_{L3}=0$; $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}=R=100 \text{ кОм}$; $R_{зм}=100 \text{ Ом}$.

Как изменится ток, если учесть сопротивление обуви человека $R_{об}=50 \text{ кОм}$ и пола помещения $R_{пол}=50 \text{ кОм}$?

Варианты ответа: $180,7 \text{ мА}$, $25,3 \text{ мА}$; $220,1 \text{ мА}$, $0,5 \text{ мА}$; $375,5 \text{ мА}$, $1,6 \text{ мА}$; $345,5 \text{ мА}$, $3,8 \text{ мА}$; $360,8 \text{ мА}$, $10,2 \text{ мА}$.

3. Решите задачу: Каким сопротивлением относительно земли должны обладать фазные провода сети типа IT , чтобы при прямом однофазном

прикосновении значение тока, проходящего через тело человека, не превышало длительно допустимого значения (10 мА).

Исходные данные: напряжение сети $380/220 \text{ В}$, $R_h=1 \text{ кОм}$; $C_{L1}=C_{L2}=C_{L3}=0$; $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}=R$.

Варианты ответа: 220 кОм ; 380 кОм ; 63 кОм ; 100 кОм ; 56 кОм .

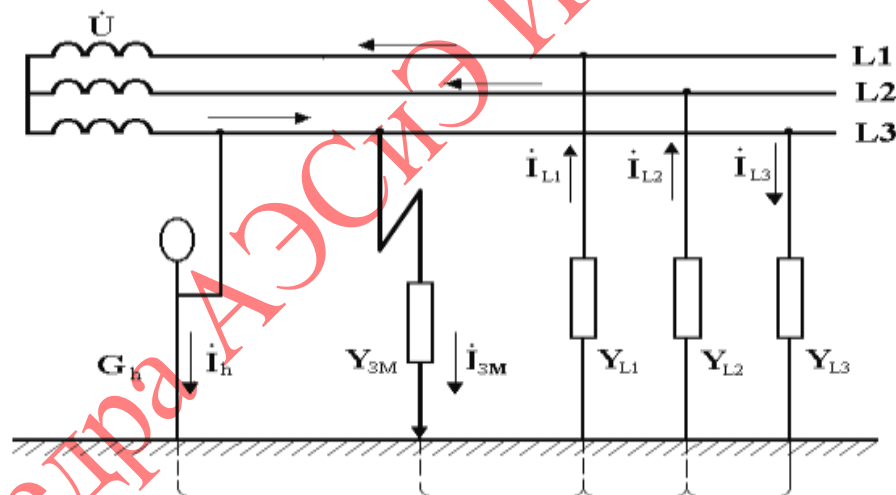
4. Решите задачу: Человек прикоснулся к PEN-проводу сети типа TN-C напряжением $380/220 \text{ В}$ при аварийном режиме работы (фазный провод $L3$ замкнулся на землю). Определите ток, протекающий через тело человека, если человек находится на расстоянии 40 м от места замыкания на землю.

Исходные данные: $R_h=1 \text{ кОм}$; $C_{L1}=C_{L2}=C_{L3}=0$; $R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}=100 \text{ кОм}$; $R_{зм}=18 \text{ Ом}$; $R_0=4 \text{ Ом}$.

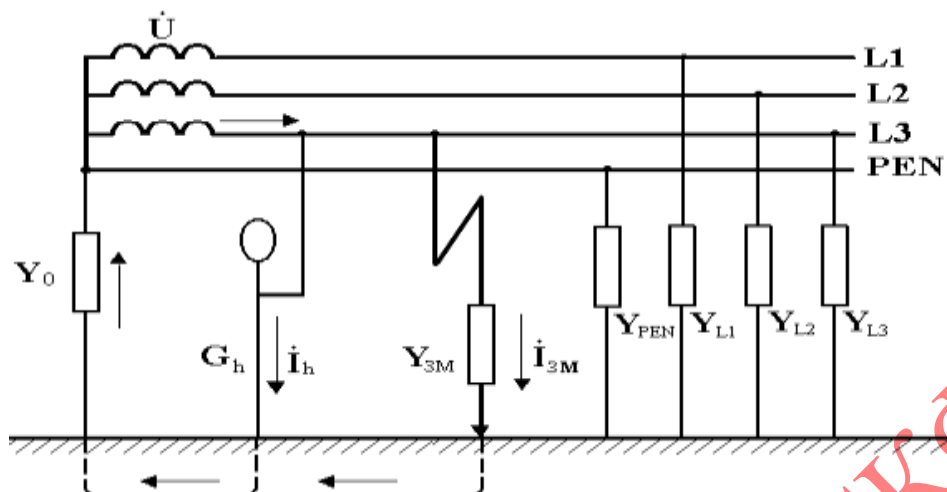
Варианты ответа: 180 мА ; 40 мА ; 22 мА ; 220 мА ; 18 мА .

5. В каком случае прикосновение опаснее:

А)



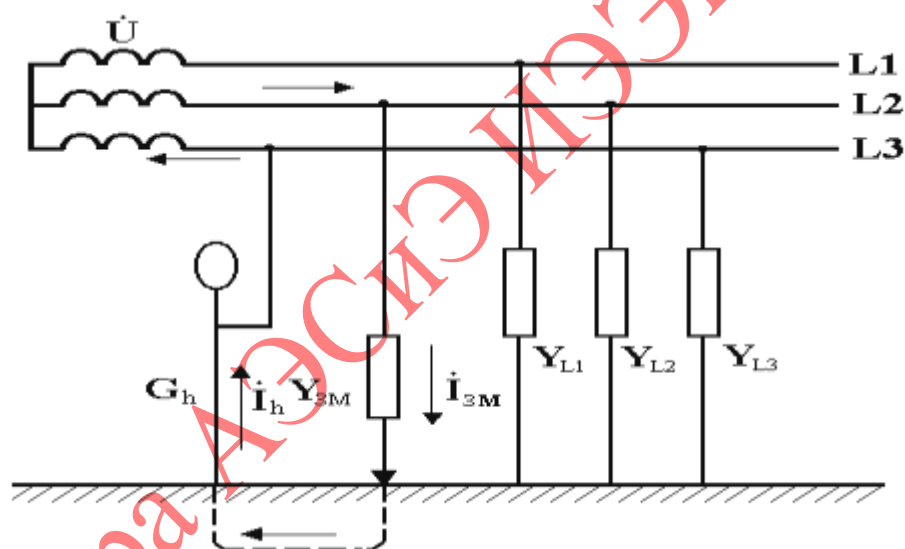
Б)



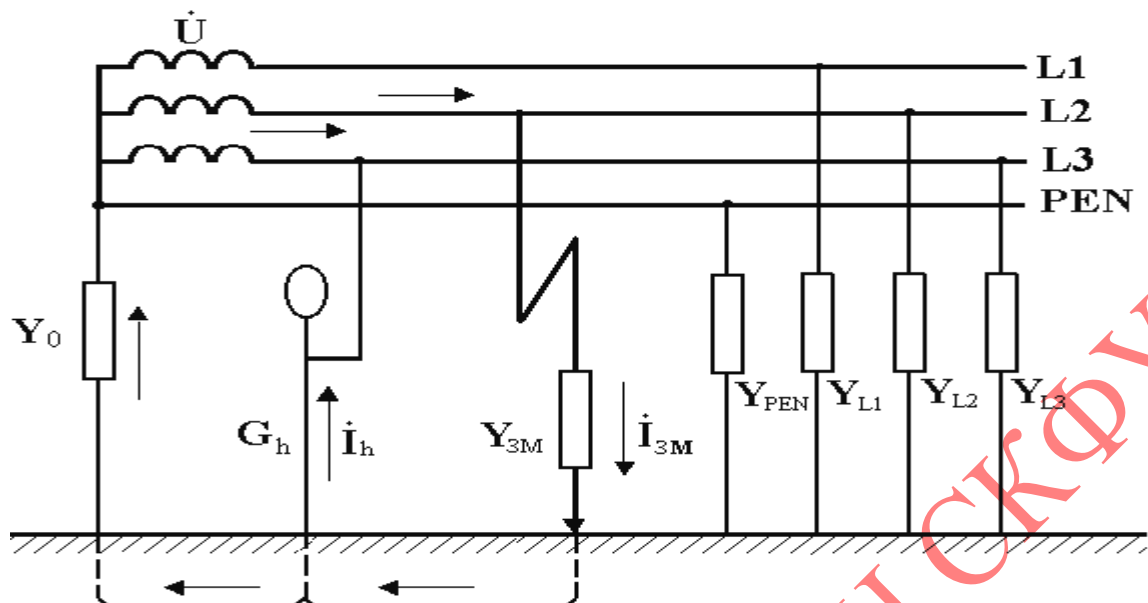
Варианты ответа: А; Б; Одинаково опасны.

6. В каком случае прикосновение опаснее:

А)



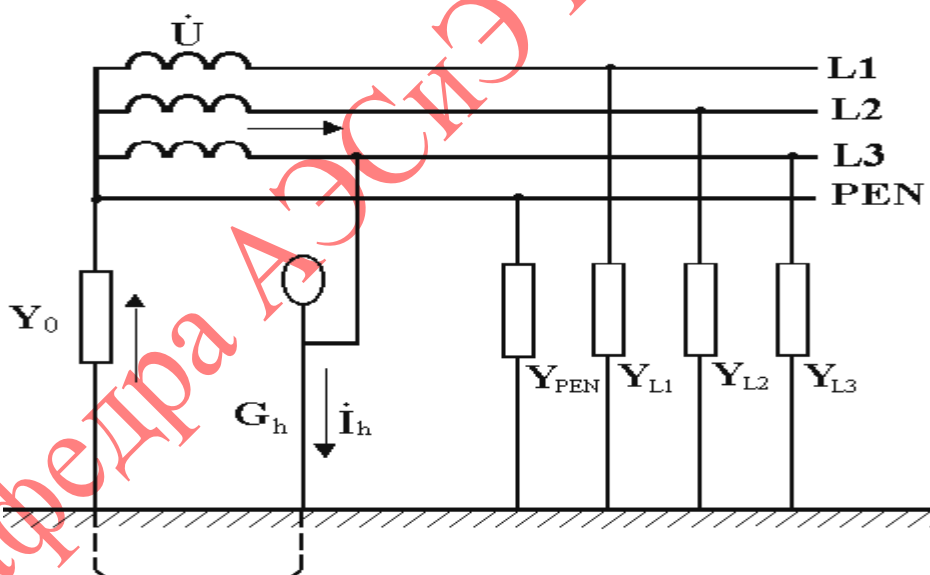
Б)



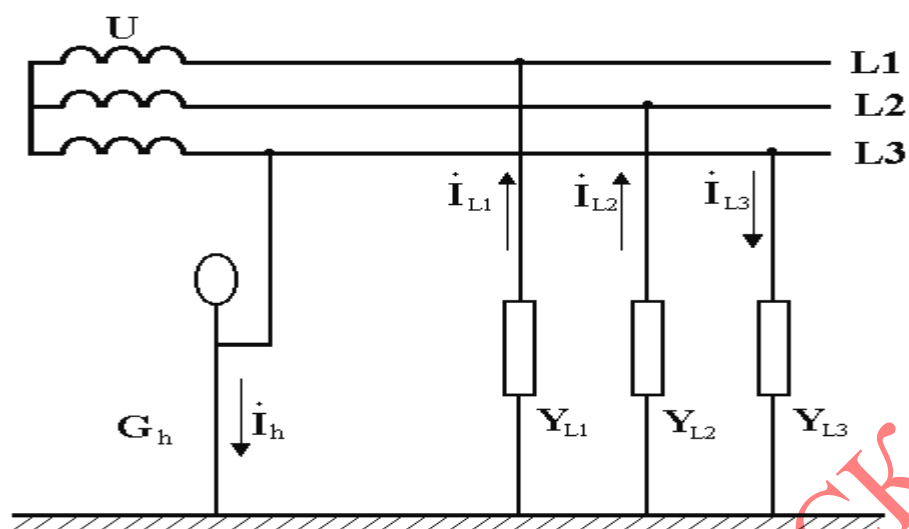
Варианты ответа: А; Б; Одинаково опасны.

7. В каком случае прикосновение опаснее:

А)



Б)



Варианты ответа: А; Б; Одинаково опасны.

кафедра АЭСиЭНСиСКФУ

Практическое занятие 5

Явления при стекании тока в землю. Напряжение прикосновения и шага

Теоретическая часть

При работе в действующих электроустановках всегда существует определенная вероятность попадания человека под действие электрического тока. Эта вероятность может быть меньше или больше в зависимости от разных факторов. Но в любом случае при оценке действия тока на человека определяются значения:

- напряжения прикосновения;
- напряжения шага.

Напряжение прикосновения

Согласно нормативным документам напряжение прикосновения – это напряжение между двумя проводящими частями или между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

Другими словами напряжением прикосновения (для человека) U_{np} называется напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек, или падение напряжения в сопротивлении тела человека, В:

$$U_{np} = I_h R_h, \quad (5.1)$$

где I_h — ток, проходящий через человека по пути "рука - ноги", А;
 R_h — сопротивление тела человека, Ом.

В области защитных заземлений, занулений и т. п. одна из этих точек имеет потенциал заземлителя φ_3 , а другая — потенциал основания в том месте, где стоит человек, $\varphi_{осн}$. При этом напряжение прикосновения:

$$U_{пр} = \varphi_3 - \varphi_{осн} \quad (5.2)$$

Если принять во внимание характер изменения потенциала по поверхности грунта и пренебречь сопротивлением растеканию тока основания, то

$$U_{\text{пр}} = \varphi_3 \cdot \alpha_1, \quad (5.3)$$

где α_1 — коэффициент, называемый коэффициентом напряжения прикосновения или просто коэффициентом прикосновения, учитывающим форму потенциальной кривой:

$$\alpha_1 = \left(1 - \frac{\varphi_{\text{осн}}}{\varphi_3}\right) \leq 1 \quad (5.4)$$

Поскольку напряжение прикосновения зависит от значения потенциала заземлителя и от характера его потенциальной кривой, опасность для человека будет различной при использовании различных типов одиночных заземлителей и групповых заземлителей:

- Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе;
- напряжение прикосновения при групповом заземлителе.

Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек. Ток, стекающий в землю через человека, стоящего на земле, полу или другом основании, преодолевает сопротивление не только тела человека, но и этого основания, вернее, тех его участков, с которыми имеют контакт подошвы ног человека (сопротивление обуви в данном случае во внимание не принимается).

Сопротивление основания, на котором стоит человек, правильнее называть (аналогично сопротивлению заземлителя) сопротивлением растеканию тока основания ног; нередко это сопротивление именуют также сопротивлением растеканию тока основания или сопротивлением растеканию тока ног человека.

Все положения, рассмотренные выше, справедливы для случаев, когда сопротивление растеканию основания, на котором стоит человек, равно нулю. В действительных условиях это сопротивление не равно нулю и в ряде

случаев бывает довольно велико.

Следовательно, разность потенциалов $(\varphi_3 - \varphi_{осн}) = \varphi_3 \cdot \alpha_1$, В, оказывается приложенной не только к сопротивлению тела человека R_h , Ом, но и к последовательно соединенному с ним сопротивлению основания $R_{осн}$, Ом, на котором стоит человек (рисунок 5.1): $\varphi_3 \alpha_1 = I_h (R_h + R_{осн})$.

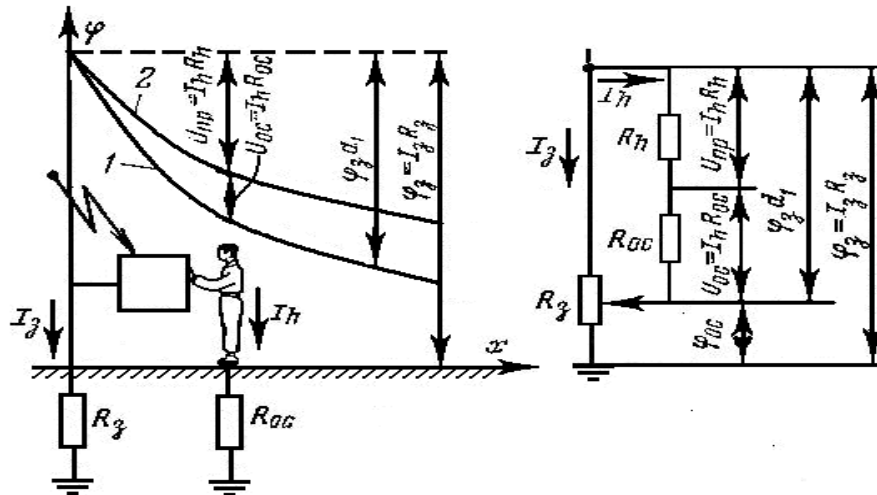


Рисунок 5.1 – К определению напряжения прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию тока основания, на котором стоит человек:

1 — потенциальная кривая;

2 — кривая, характеризующая изменение $U_{пр}$ с изменением расстояния от заземлителя

Заменив в этом выражении ток I_h , А, проходящий через человека, его значением из (5.1), получим:

$$\varphi_3 \alpha_1 = \frac{U_{пр}}{R_h} (R_h + R_{осн}), \quad (5.5)$$

откуда напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении растеканию основания, В:

$$U_{пр} = \varphi_3 \cdot \alpha_1 \cdot (R_h / R_h + R_{осн}) \quad (5.6)$$

или

$$U_{пр} = \varphi_3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2, \quad (5.7)$$

где α_2 — коэффициент напряжения прикосновения, учитывающий падение

напряжения в сопротивлении растеканию основания, на котором стоит человек:

$$\alpha_2 = R_h / (R_h + R_{осн}) \quad (5.8)$$

Решение задач на растекание тока с одиночных заземлителей

Задача 1

Определить сопротивления растеканию тока одиночных заземлителей вертикального стержневого $R_в$ и горизонтального полосового $R_г$ и сравнить их значения. Размеры одиночных заземлителей и их размещение в земле показаны на рисунке 5.2. Удельное сопротивление грунта 1 Ом·м.

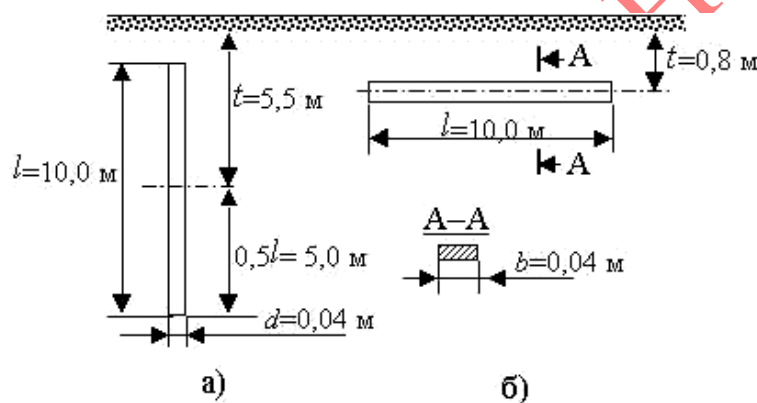


Рисунок 5.2 – Одиночные заземлители: (а) - вертикальный стержневой, (б) - горизонтальный полосовой

Решение

Подставив исходные данные в выражение для определения сопротивления растеканию тока (смотри таблицу 5.1) получим:

для вертикального электрода

$$R_в = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right) = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 10} \left(\ln \frac{2 \cdot 10}{0,04} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10} \right) = 10,8 \text{ Ом} \quad (5.9)$$

для горизонтального электрода

$$R_г = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 10} \ln \frac{2 \cdot 10^2}{0,04 \cdot 0,8} = 14 \text{ Ом} \quad (5.10)$$

Ответ задачи: $R_g = 10,8 \text{ Ом}$; $R_z = 14 \text{ Ом}$.

Задача 2

Ток стекает в землю через стержневой заземлитель круглого сечения, погруженный в землю на глубину $l = 3 \text{ м}$ (см. рисунок 5.3).

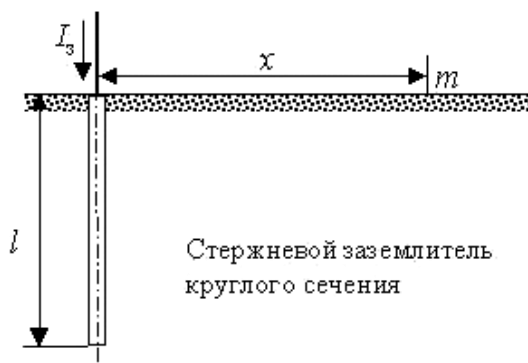


Рисунок 5.3 – Стержневой заземлитель круглого сечения

Определить потенциал точки m на поверхности земли, отстоящей от центра заземлителя на расстояние $x = 20 \text{ м}$, при токах I_3 , равных 1; 10; 50; 100; 500; 1000 А. Принять удельное сопротивление земли $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Решение

Пользуясь известным уравнением потенциальной кривой одиночного стержневого заземлителя (электрода):

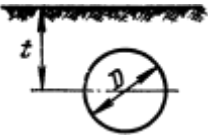

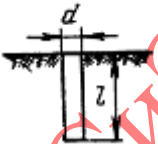
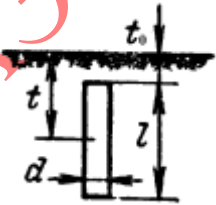
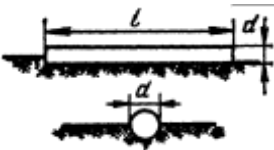
$$\varphi = \frac{I_3 \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x}, \quad (5.11)$$

вычисляем потенциалы на поверхности земли в точке m , отстоящей от центра заземлителя на расстояние $x = 20 \text{ м}$, при указанных значениях тока по формуле:

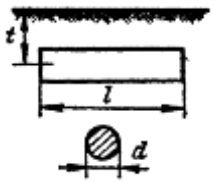
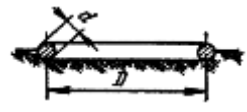
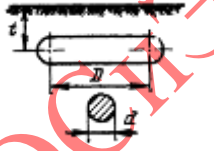
$$\varphi = \frac{I_3 \cdot 100}{2 \cdot \pi \cdot 3} \ln \frac{\sqrt{20^2 + 3^2} + 3}{20} = 0,8 \cdot I_3 \text{ В}$$

Ответ задачи: Результаты вычислений представлены в таблице 5.2

Таблица 5.1 – Формулы для вычисления сопротивлений одиночных заземлителей растеканию тока в однородном грунте

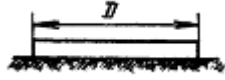
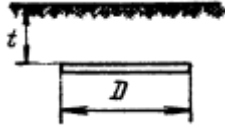
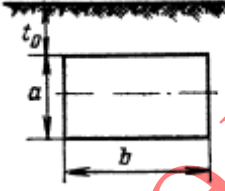
Тип заземлителя	Схема	Формулы для расчета
Шаровой в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4z}\right)$
Полушаровой у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi D}$
Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t_0 + l}{4t_0 - l} \right)$
Протяженный на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и т.п.)		$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$

Продолжение таблицы 5.1

<p>То же в земле</p>		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{dt}$
<p>Кольцевой на поверхности земли</p>		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d}$
<p>То же в земле</p>		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{dt}$

кафедра АЭЭиНКСОУ

Продолжение таблицы 5.1

Круглая пластина на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2D}$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t_0^2 + D^2}} \right)$
Пластинчатый в земле (пластина, поставленная на ребро)		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{2t_0} \right)$

кафедра АЭС ИЭИ ЭНЕРГЕТИКИ

Таблица 5.2 – Результаты расчета

Ток I_3 , стекающий в землю, А	1	10	50	100	500	1000
Потенциал φ в точке m , В	0,8	8,0	40	80	400	800

Примечание. Широко распространено мнение, что потенциал земли на расстоянии 20 и более метров от заземлителя, с которого стекает ток, незначителен, и поэтому его можно принимать равным нулю. Однако ответ, полученный при решении настоящей задачи, свидетельствует, что это мнение справедливо лишь при малых токах, стекающих в землю. В частности, такое положение возможно в сетях до 1000 В.

Задача 3

Ток $I_3 = 100$ А стекает в землю через металлический предмет неправильной формы, который может быть условно уподоблен шару с радиусом $r = 0,5$ м (см. рисунок 5.4). Предмет погружен в землю на глубину $t_1 = 3$ м; ток к нему подается по изолированному проводу. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м.

Требуется определить потенциал φ на металлическом трубопроводе C , проложенном в земле на глубине $t_2 = 4$ м и на расстоянии по горизонтали от центра шара $x = 3$ м.

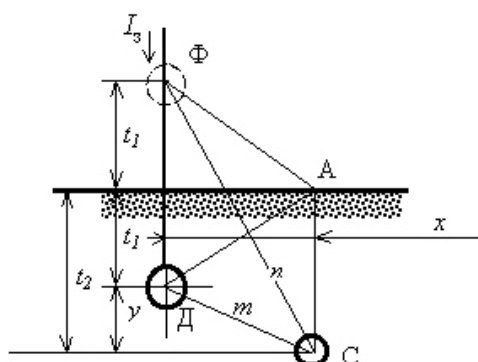


Рисунок 5.4 – К определению потенциалов на трубопроводе (с), на поверхности земли (А) и на заземлителе, с которого в землю стекает ток

Решение

Известно, что при бесконечно большой глубине погружения шарового заземлителя в землю потенциал φ в некоторой точке земли, создаваемый током I_3 , А, стекающим с заземлителя, выражается зависимостью 5.13:

$$\varphi = \frac{I_3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot x}, \quad (5.13)$$

где ρ – удельное сопротивление земли, x – расстояние от центра шара до интересующей нас точки.

Однако, в данном случае шар находится вблизи поверхности земли, поэтому для решения задачи следует воспользоваться методом зеркального отображения. При этом потенциал φ_c , В в некоторой точке С (трубопровод) будет равен сумме потенциалов φ_∂ и φ_ϕ , В, создаваемых в этой точке полями токов, стекающих как с действительного, так и с фиктивного заземлителей, В (см. рисунок 5.4):

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_T}$$

$$3 + \sqrt{(R_\phi + R_{H.3.})^2 + (X_\phi + X_{H.3.} + X_{II})^2}$$

$$I_{кз}^{факт} = \frac{220}{0.195} = 1260 \text{ А}$$

$$3 + \sqrt{(0,0395 + 0,07)^2 + (0,0039 + 0,0039 + 0,015)^2}$$

$$R_{3y}(10,6) < R_{3y}(12)$$

$$\rho_p = K_c \cdot \rho = 3 \cdot 86 = 264$$

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_{каб}} + \frac{1}{R_\phi} + \frac{1}{R_{c,m.o}}} = \frac{\rho_{вс}}{8 \cdot 0,08} = 1,5 \rho_{вс} \cdot 0,3 \cdot I_{кз}^{факт} = \frac{U}{Z_{мп} / 3 + \sqrt{(R_\phi + R_H)^2 + (X_\phi + X_H + X_n)^2}}$$

$$R_g = A \cdot \frac{\rho_2}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_2}{L_2 + L_g}$$

$$\frac{h_1 - t}{l_g} = \frac{2 - 0,7}{5} = 0,26$$

$$A = \left(0,385 - 0,25 \cdot \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \right) = 0,385 - 0,25 \cdot \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,293$$

$$0,1 \leq \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5$$

$$\tau_{\epsilon} = t_{p3} + t_{\text{омк.}\epsilon}$$

$$I_{3\text{max}} = \frac{U_{\text{np.}\dot{\text{don}}}}{K_n \cdot R_3} = \frac{400}{0,057 \cdot 2,044} = 3433$$

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_{\epsilon} \cdot L_{\epsilon}}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,806 \cdot 0,18}{\left(\frac{5 \cdot 125}{5 \cdot \sqrt{15 \cdot 20}}\right)^{0,45}} = 0,057$$

$$\frac{l_{\epsilon} + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,368 > 0,1$$

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot \rho_{\text{ec}}} \beta' = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 3000} = 0,18$$

$$b = \frac{15,5}{3} = 5,17$$

$$L_{\epsilon} = l_{\epsilon} \cdot n_{\epsilon} = 5 \cdot 12 = 60$$

$$n_{\epsilon} = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{l_{\epsilon}} = \frac{15,5 \cdot 4}{5} = 12,4$$

$$L_{\epsilon}' = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1) = 2 \cdot 15,5 \cdot 4 = 124$$

$$m = \frac{L_{\epsilon}}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1 = \frac{125}{2 \cdot 15,5} = 3,03$$

$$R'_{3,\dot{\text{don}}} = \frac{R_3 \cdot R_{\epsilon}}{R_3 + R_{\epsilon}} R'_{3,\dot{\text{don}}} = \frac{7017}{1900} = 3,69$$

$$U_{\text{np}} = K_n^1 \cdot I_3 \cdot R_3 = 0,057 \cdot 1900 \cdot 2,044 = 221$$

$$\sqrt{S} = \sqrt{15 \cdot 20} = 15,5$$

$$U_3 = \frac{400}{0,057} = 7017 U_{\text{np}} \leq 0,1 \cdot 1000 + 1, I_k = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{mp}} / 3 + \sqrt{(R_{\phi} + R_{\text{H}}) + (X_{\phi} + X_{\text{H}} + X_{\text{n}})^2}}$$

$$\left(\frac{a}{L_{\epsilon}}\right)_{\text{cp}} = \frac{1}{2} \left(\frac{a_B + a_A}{3}\right) =$$

$$a_A = \frac{A'}{n_A - 1} =$$

$$r_{\epsilon} = \frac{0,366 \cdot 108}{5} \cdot \left(lq \frac{2 \cdot 5}{12 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \cdot lq \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 24,4$$

$$I_{\text{уст.эм}} = 300 A > I_{\text{нук}} = 144 A$$

$$I_{\text{нл}}^{\text{mp}} > 100 A$$

$$I_{\text{нл}}^{\text{mp}} \geq \frac{I_{\text{нук1}} + I_{\text{н2}} + I_{\text{н3}}}{\alpha} = \frac{229,2 + 18,4 + 4,5}{2,5} = 100,8 A$$

(5.14)

$$r_{\epsilon} = \frac{r_{\epsilon} \cdot R_3}{R_{\epsilon} \cdot \eta} = \frac{24,4}{24,4 \cdot 0,57} = 9,13$$

$$I_3 = \frac{U_{\text{H}} \cdot (35 \cdot L_{\text{кл}} + L_{\text{вл}})}{350}$$

С учетом приведенного выше уравнения можно записать:

$$\varphi_c = \frac{I_3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot m} + \frac{I_3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot n} = \frac{I_3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right), \quad (5.15)$$

где m и n – расстояния от центров действительного и фиктивного заземлителей до трубопровода (точки C), м:

$$m = \sqrt{x_2^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + (t_2 - t_1)^2} = \sqrt{3^2 + (4 - 3)^2} = 3,16 \text{ м} \quad (5.16)$$

$$n = \sqrt{x^2 + (t_2 + t_1)^2} = \sqrt{3^2 + (4 + 3)^2} = 7,6 \text{ м} \quad (5.17)$$

Искомый потенциал на трубопроводе C :

$$\varphi_c = \frac{I_3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right) = \frac{100 \cdot 100}{4 \cdot \pi} \left(\frac{1}{3,16} + \frac{1}{7,6} \right) = 360 \text{ В} \quad (5.18)$$

Ответ задачи: 360 В.

Задача

С металлического шара с радиусом $r = 0,5$ м, погруженного в землю на глубину $t_1 = 3$ м, стекает ток $I_3 = 80$ А, который подается к шару по изолированному проводу (см. рисунок к предыдущей решенной задаче).

Требуется определить потенциал φ_A на поверхности земли в точке A , находящейся на расстоянии $x = 3$ м от вертикали, проходящей через центр шарового заземлителя, и потенциал заземлителя (шара) φ_3 . Удельное сопротивление земли $\rho = 90$ Ом·м.

Ответ задачи: $\varphi_A = 270$ В; $\varphi_3 = 1240$ В.

Если Ваш ответ не совпал с приведенным, повторите раздел «Стекание тока в землю через одиночные заземлители».

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение напряжения прикосновения.
2. Дайте определение напряжения шага
3. Стекание тока в землю через одиночные заземлители
4. Стекание тока в землю через групповые заземлители

Практическое занятие 6

Сопротивление растеканию полушарового заземлителя

Теоретическая часть

Сопротивление заземлителя растеканию тока. Ток, проходящий через заземлитель в землю, преодолевает сопротивление, называемое сопротивлением заземлителя растеканию тока или просто сопротивлением растекания.

Оно имеет три слагаемых:

- сопротивление самого заземлителя;
- переходное сопротивление между заземлителем и грунтом (т. е. контактное сопротивление между поверхностью заземлителя и прилегающими к ней частицами земли);
- сопротивление грунта.

Два первых слагаемых по сравнению с третьим малы, поэтому под сопротивлением заземлителя растеканию тока понимают сопротивление грунта растеканию тока.

Поскольку плотность тока в земле на расстоянии больше 20 м от заземлителя практически равна нулю, можно считать, что сопротивление стекающему току ρ оказывает лишь соответствующий объем земли; для одиночного заземлителя это полусфера радиусом 20 м. Однако при разных формах и размерах заземлителя сопротивление этого объема земли различно.

Поэтому выражения для вычисления сопротивлений растеканию тока одиночных заземлителей различной формы имеют свои особенности:

- Сопротивление растеканию тока одиночного шарового заземлителя;
- Сопротивление растеканию тока полушарового заземлителя;
- Сопротивление растеканию тока одиночных заземлителей других типов.
- Сопротивление группового заземлителя растеканию тока при расстоянии между электродами более 40 м

При очень больших расстояниях между электродами группового заземлителя (более 40 м) сопротивление всей группы заземляющих электродов в Ом, описывается равенством:

$$R_{\infty} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{R_0}} \quad (6.1)$$

Если электроды одинаковы, а следовательно, одинаковы и их сопротивления растеканию, то сопротивление группового заземлителя в Ом, будет

$$R_{\infty} = \frac{R_0}{n} \quad (6.2)$$

До сих пор, рассматривая явления стекания тока в землю, мы считали, что земля во всем своем объеме однородна, т. е. в любой точке обладает одинаковым удельным сопротивлением ρ , Ом·м. В действительности земля имеет слоистое строение и реально необходимо определять сопротивления заземлителей растеканию тока в многослойных грунтах.

Сопротивление группового заземлителя растеканию тока зависит от количества электродов, входящих в состав группового, их собственных сопротивлений растеканию тока и расстояния между электродами:

- Сопротивление группового заземлителя растеканию тока при расстоянии между электродами более 40 м;
- Сопротивление группового заземлителя растеканию тока при расстоянии между электродами менее 40 м;
- Коэффициент использования группового заземлителя.

Сопротивление растеканию полушарового заземлителя радиусом r , м, получаем с использованием метода зеркального отображения (рисунок 6.1), полагая, что воздушное пространство над поверхностью земли заполнено средой с таким же, как у земли, удельным сопротивлением ρ .

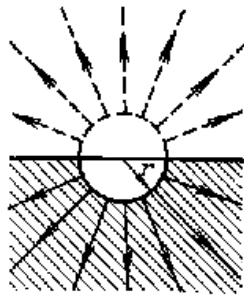


Рисунок 6.1 – Полушаровой заземлитель, расположенный у поверхности земли

В этом случае мы имеем дело с шаром, находящимся в однородной безграничной среде. Однако учитывая, что действительный электрод является полушаром, емкость его в 2 раза меньше, а сопротивление растеканию в 2 раза больше, чем целого шара. Значит, искомое сопротивление растеканию тока для полушарового заземлителя:

$$R_0 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (6.3)$$

Решение задач на растекание тока с групповых заземлителей

Задача

Ток I_3 стекает с группового заземлителя, состоящего из трех одинаковых полушаровых электродов радиусом $r = 0,5$ м, размещенных в вершинах равностороннего треугольника (см. рисунок 6.2).

Решение

Поскольку электроды одинаковы и находятся в одинаковых условиях, значения сопротивлений растеканию тока с них, токов, стекающих через них в землю, и их собственные потенциалы равны. При этом сопротивление растеканию тока одиночного электрода:

$$R_0 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{120}{2 \cdot \pi \cdot 0,5} = 40 \text{ Ом} \quad (6.4)$$

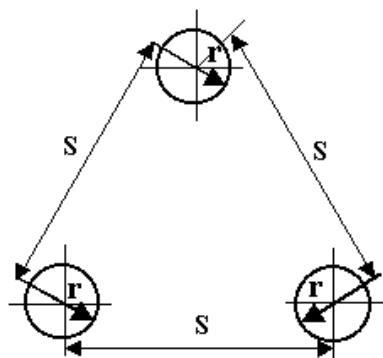


Рисунок 6.2 – Групповой заземлитель, состоящий из полушаровых электродов. Определить значение потенциала группового заземлителя φ_{gp} при расстояниях между центрами электродов S , равных 2,5; 10; 40 м и значении удельного сопротивления грунта ρ , равном 120 Ом·м (земля однородная).

ток, стекающий через одиночный электрод в землю

$$I_0 = \frac{I_3}{n} = \frac{30}{3} = 10 \text{ А} \quad (6.5)$$

собственный потенциал одиночного электрода

$$\varphi_0 = I_0 R_0 = 10 \cdot 40 = 400 \text{ В.} \quad (6.6)$$

С учетом наведенных потенциалов φ_n на один из электродов потенциалами двух других электродов потенциал группового заземлителя:

$$\varphi_{gp} = \varphi_0 + (n - 1)\varphi_n \quad (6.7)$$

Учитывая, что:

$$\varphi_n = \varphi_0 \cdot \frac{r}{s - r}, \quad (6.8)$$

получим:

$$\varphi_{gp} = \varphi_0 \cdot \frac{s + r}{s - r} = 400 \cdot \frac{s + 0,5}{s - 0,5} \quad (6.9)$$

Искомые значения потенциалов группового заземлителя будут равны:

при $S = 2,5$ м $\varphi_{gp} = 1,5$; $\varphi_0 = 600$ В;

при $S = 10$ м $\varphi_{gp} = 1,1$; $\varphi_0 = 440$ В;

при $S = 40$ м $\varphi_{gp} = 1,0$; $\varphi_0 = 400$ В.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что при уменьшении расстояний между одиночными электродами группового

заземлителя значение потенциала группового заземлителя возрастает.

Ответ задачи: 600 В; 440 В; 400 В.

Решите аналогичные задачи самостоятельно.

Задача 1

Ток I_3 стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из двух одинаковых полушаровых заземлителей, расположенных в противоположных углах квадрата со стороной $a = 40$ м. $I_3 = 20$ А; радиус каждого заземлителя $r = 0,5$ м; удельное сопротивление земли растеканию тока $\rho = 120$ Ом·м.

Определить: 1) потенциал группового заземлителя ρ_{gp} ;

2) сопротивление группового заземлителя растеканию тока R_{gp} ;

Ответ задачи: $\rho_{gp} = 382$ В, $R_{gp} = 19,1$ Ом.

Если Ваш ответ не совпал с приведенным, повторите разделы «Сопротивление растеканию тока группового заземлителя» и «Сопротивление растеканию тока одиночного полушарового заземлителя»

Задача 2

Определить потенциал $\varphi_{гр}$, сопротивление R_{gp} и коэффициент использования проводимости η группового заземлителя, состоящего из четырех полушаровых электродов одинакового размера, расположенных на прямой линии (см. рисунок 6.3). Электроды соединены между собой проводником, размещенным над землей.

Радиус каждого полушарового электрода $r = 0,05$ м; расстояние между соседними электродами $a = 1$ м, $b = 25$ м, земля однородная с удельным сопротивлением $\rho = 100$ Ом·м. Показания амперметра $I_0 = 5$ А.

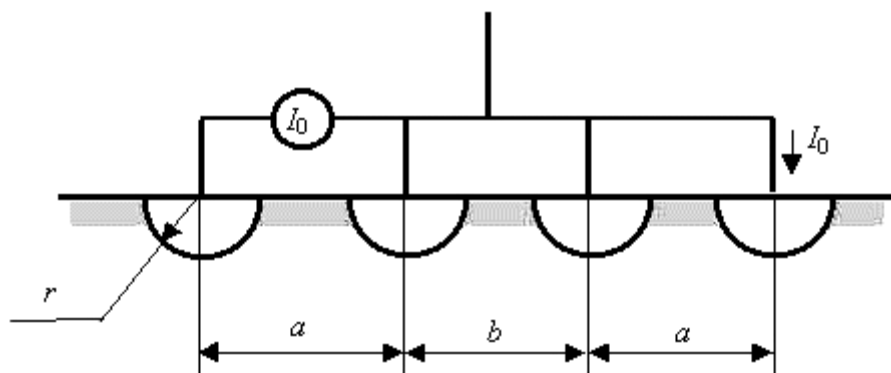


Рисунок 6.3 – Групповой заземлитель, состоящий из четырех полушаровых электродов одинакового размера, расположенных на прямой линии

Ответ задачи: $\eta = 0,65$; $\varphi_{гр} = 1670$ В; $R_{зп} = 83,7$ Ом.

Если Ваш ответ не совпал с приведенным, повторите разделы «Сопротивление растеканию тока одиночного и группового заземлителя»

1 Решите задачу: Ток I_3 стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из четырех одинаковых полушаровых заземлителей, расположенных в углах квадрата со стороной $a = 40$ м.

Дано: $I_3 = 28$ А; радиус каждого заземлителя $r = 0,5$ м; удельное сопротивление земли растеканию тока $\rho = 120$ Ом·м.

Определить: 1) потенциал группового заземлителя $\varphi_{зп}$;

2) сопротивление группового заземлителя растеканию тока $R_{зп}$;

3) как изменятся полученные значения $\varphi_{гр}$ и $R_{зп}$ при уменьшении расстояния a между заземлителями.

Варианты ответа:

а) $\varphi_{гр} = 487,4$ В, $R_{зп} = 19,64$ Ом, при уменьшении a увеличится только значение $\varphi_{гр}$;

б) $\varphi_{гр} = 300,9$ В, $R_{зп} = 12,65$ Ом, при уменьшении a уменьшатся значения $\varphi_{гр}$ и $R_{зп}$;

в) $\varphi_{гр} = 267,4$ В, $R_{зп} = 9,55$ Ом, при уменьшении a увеличатся значения $\varphi_{гр}$ и $R_{зп}$;

г) $\varphi_{гр} = 170,63$ В, $R_{зп} = 5,45$ Ом, при уменьшении a уменьшится значение

R_{zp} ;

д) $\varphi_{гр} = 1200$ В, $R_{zp} = 100$ Ом, при уменьшении а значения $\varphi_{гр}$ и R_{zp} не изменятся.

2 Решите задачу: Стеkanie тока в землю происходит с круглой пластины, лежащей на поверхности земли. Сопротивление пластины растеканию тока определяется по формуле

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot D}, \quad (6.10)$$

где $D = 1$ м – диаметр пластины.

Дано: $I_3 = 5$ А; сопротивление тела человека $R_h = 1$ кОм; коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой $\beta = 0.8$, сопротивление растеканию тока с одной ноги человека $R_n = 2$ кОм; удельное сопротивление грунта растеканию тока $\rho = 50$ Ом·м.

Определить: ток I_h , протекающий через тело человека, находящегося в поле растекания тока, по пути "нога-нога".

Варианты ответа: 20 мА; 38 мА; 63 мА; 100 мА; 50 мА.

3 Решите задачу: Стеkanie тока в землю происходит с полушарового заземлителя.

Дано: $I_3 = 62,8$ А; удельное сопротивление грунта растеканию тока $\rho = 100$ Ом·м.

Определить: на каком расстоянии до полушарового заземлителя напряжение шага будет равно длительно допустимому значению, если принять размер шага человека $a = 1$ м.

Варианты ответа: 18 м; 4 м; 12 м; 8 м; 5 м

4 Решите задачу: Групповой заземлитель состоит из четырех полушаровых электродов, расположенных в вершинах квадрата со стороной $a = 3$ м (см. рисунок 6.4).

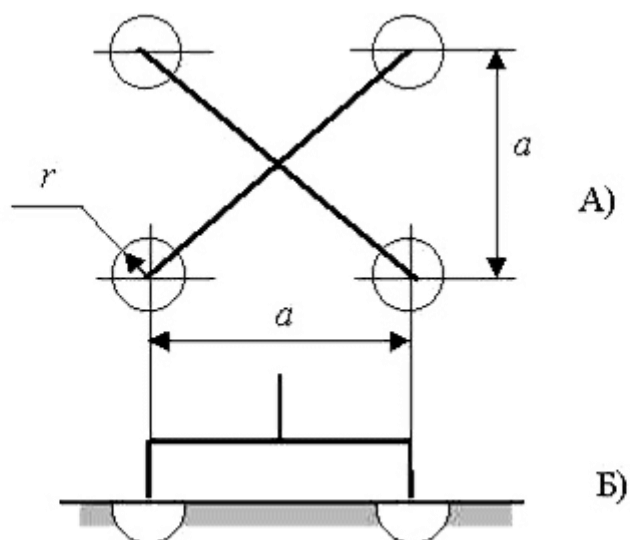


Рисунок 6.4 – Групповой заземлитель, состоящий из четырёх полушаровых электродов, размещенных в вершинах квадрата: а) вид сверху, б) вид сбоку

Дано: Радиус электродов $r = 0,5$ м; земля однородная с удельным сопротивлением $\rho = 157$ Ом·м.

Определить: коэффициент использования h и сопротивление R_{gp} группового заземлителя.

Варианты ответа:

а) $h = 0,35$, $R_{gp} = 34,5$ Ом;

б) $h = 0,65$, $R_{gp} = 19,2$ Ом;

в) $h = 0,8$, $R_{gp} = 14,1$ Ом;

г) $h = 0,75$, $R_{gp} = 20,3$ Ом;

д) $h = 0,5$, $R_{gp} = 20$ Ом.

5 Решите задачу: Корпус электроустановки заземлен через полушаровой заземлитель.

Дано: максимальное значение тока через заземлитель $I_3 = 3$ А; удельное сопротивление грунта растеканию тока $\rho = 50$ Ом·м.

Определить: Радиус полушарового заземлителя, необходимый для обеспечения безопасности человека, касающегося заземленного корпуса электроустановки при замыкании фазы на этот корпус, если допустимое напряжение прикосновения равно 100 В. Максимальное расстояние от

человека до заземлителя $x = 10$ м.

Варианты ответа: 1 м; 0,4 м; 1,2 м; 0,25 м; 0,8 м

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение полушарового заземлителя
2. Из каких слагаемых состоит сопротивление растекания.
3. Формы сопротивлений растеканию тока одиночных заземлителей

Кафедра АЭСиЭ ИЭЭиН СКФУ

Практическое занятие 7

Расчет защитного зануления на отключающую способность

Цель практического занятия – ознакомить студентов с назначением, устройством, принципом действия защитного зануления и методикой расчета защитного зануления на отключающую способность.

Теоретическая часть

Назначение, устройство, принцип действия защитного зануления

Защитное зануление, также как и защитное заземление, является одной из мер защиты от опасности косвенного прикосновения и обеспечивает безопасность за счет ограничения времени воздействия тока.

Выполняется защитное зануление в электроустановках напряжением до 1 кВ систем $TN - C$, $TN - S$ и $TN - C - S$ и представляет собой преднамеренное соединение открытых проводящих частей с глухозаземленной нейтралью источника питания посредством нулевых защитных проводников.

Первая буква в обозначении системы определяет состояние нейтрали источника питания относительно земли: T – заземленная нейтраль; вторая буква – состояние открытых проводящих частей относительно земли: N – открытые проводящие части присоединены к глухозаземленной нейтрали источника питания; третья буква – функции нулевого проводника: C – функции нулевого защитного (PE) и нулевого рабочего (N) проводников совмещены в одном проводнике (PEN -проводник); S – нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники разделены; $C - S$ – функции нулевого защитного и рабочего проводников совмещены, начиная от источника питания, с последующим разделением функций.

Система $TN - C$ является четырехпроводной системой трехфазного переменного тока с глухозаземленной нейтралью источника питания (рисунок 7.1)

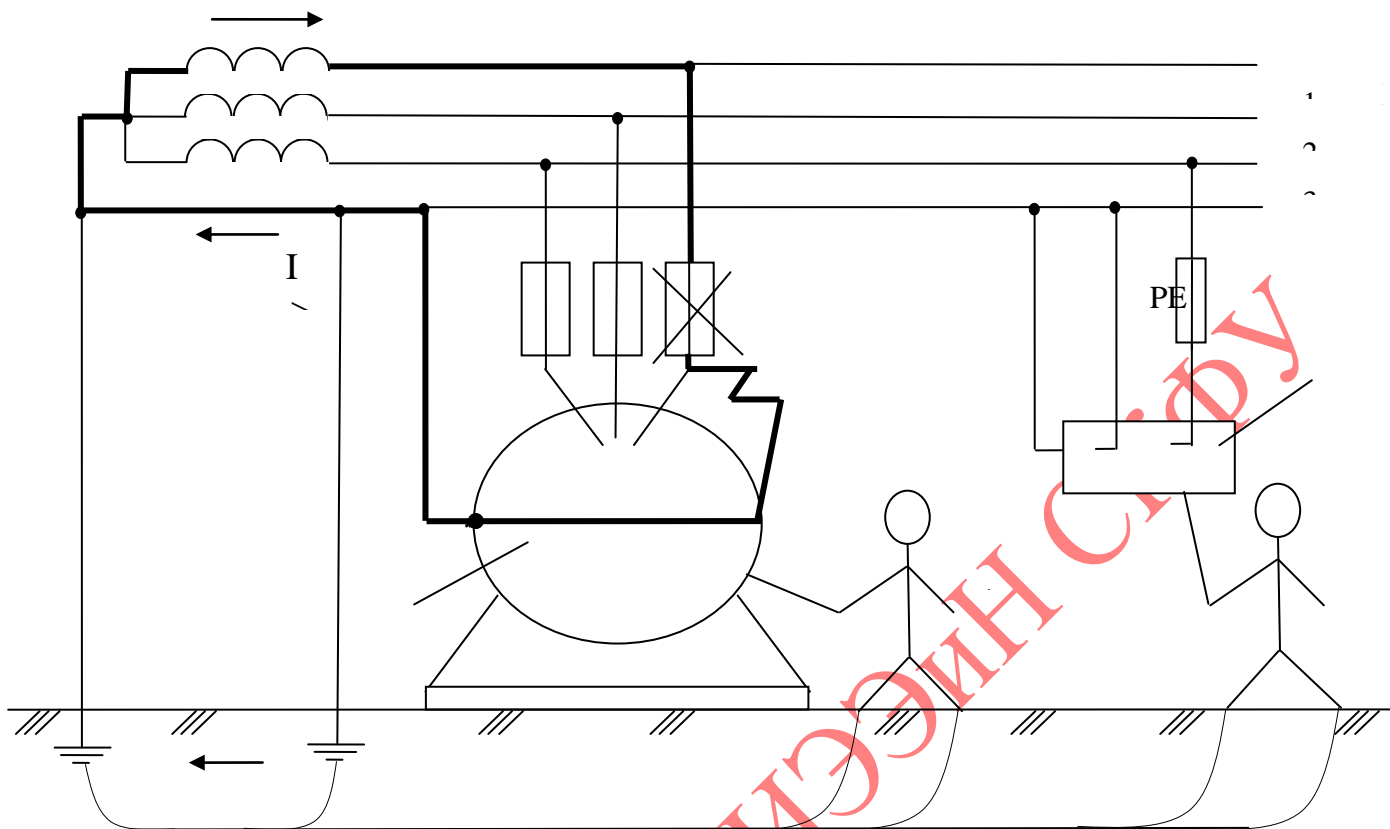


Рисунок 7.1 – Схема защитного зануления в системе $TN - C$:

1 – трехфазный потребитель; 2 – однофазный потребитель; L_1, L_2, L_3 – линейные проводники; PE – защитный нулевой проводник; N – рабочий нулевой проводник; PEN – совмещенный защитный и рабочий нулевой проводник; r_{ϕ} – сопротивление фазного провода; r_n – сопротивление нулевого проводника; r_o – сопротивление рабочего заземления; $r_{п}$ – сопротивление повторного заземления нулевого проводника; R_1 и R_2 – сопротивления человека; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания; I_3 – ток, протекающий через заземляющие устройства; $I_{пл}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя; U – фазное напряжение сети

Цель защитного зануления – нарушение изоляции на открытые проводящие части электроустановок превратить в однофазное короткое замыкание, создать в петле «фаза – нуль» (жирно обведенная цепь) ток короткого замыкания, достаточный для срабатывания защиты и отключения

поврежденного участка в минимально необходимое время (согласно ПУЭ [7] при фазном напряжении 220 В – 0,4с).

При несрабатывании защиты в указанное время человек будет длительно находиться под напряжением прикосновения $U_{пр}$ (если пренебречь малым сопротивлением r_o), равном падению напряжения в нулевом проводнике U_n , и это напряжение будет вынесено на все зануленное оборудование (рисунок 1.2).

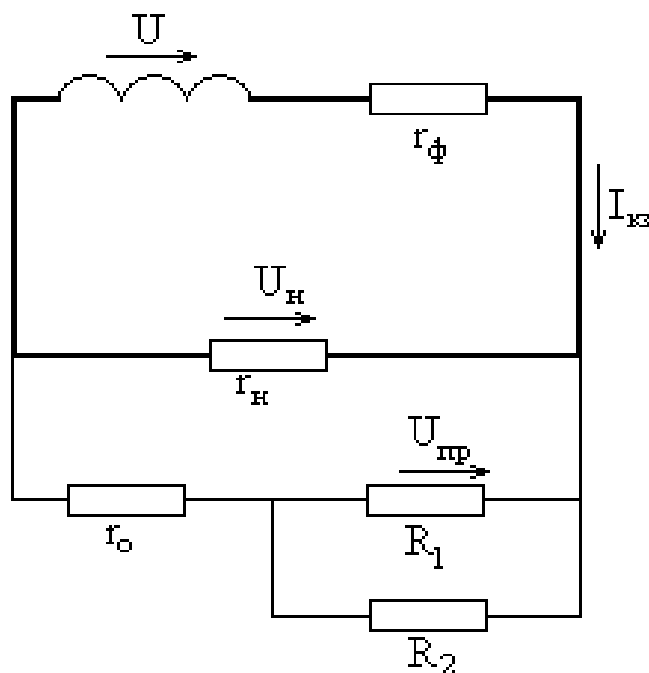


Рисунок 7.2 – Схема замещения петли «фаза – нуль»:

r_ϕ – сопротивление фазного проводника; r_n – сопротивление нулевого проводника; r_o – сопротивление рабочего заземления; R_1 и R_2 – сопротивления человека; $U_{пр}$ – напряжение прикосновения; U_n – падение напряжения в нулевом проводнике; U – фазное напряжение сети; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания

Как правило, сопротивление нулевого проводника r_n выше сопротивления фазного r_ϕ , поэтому падение напряжения в нулевом проводнике U_n и соответственно напряжение прикосновения $U_{пр}$ составляет больше половины фазного напряжения.

Снижение напряжения прикосновения при защитном занулении обеспечивается дополнительной мерой защиты – повторным заземлением нулевого проводника $r_{\text{п}}$ (рисунок 7.3).

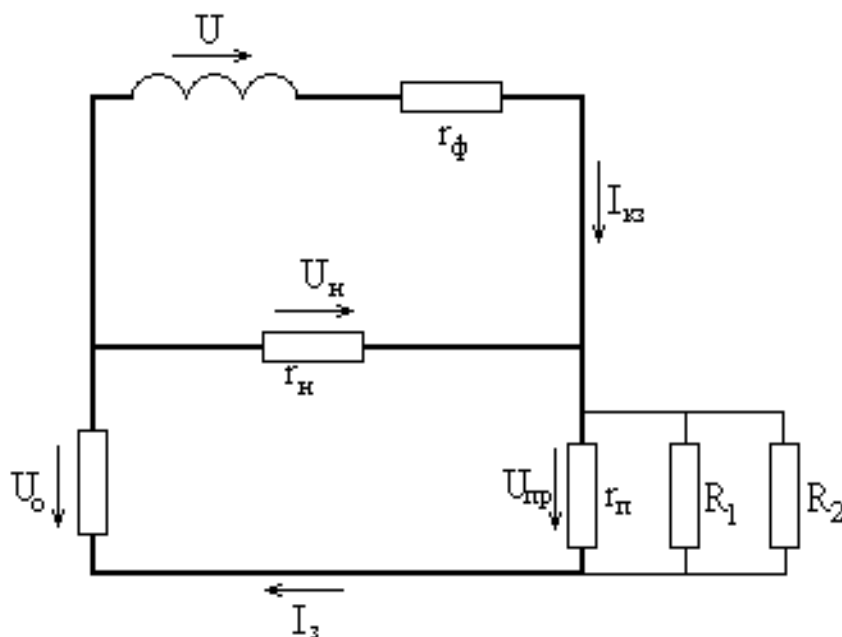


Рисунок 7.3 – Схема замещения при наличии повторного заземления нулевого проводника:

$r_{\text{ф}}$ – сопротивление фазного проводника; $r_{\text{н}}$ – сопротивление нулевого проводника; $r_{\text{о}}$ – сопротивление рабочего заземления; $r_{\text{п}}$ – сопротивление повторного заземления нулевого проводника; R_1 и R_2 – сопротивления человека; $U_{\text{пр}}$ – напряжение прикосновения; $U_{\text{н}}$ – падение напряжения в нулевом проводнике; U – фазное напряжение сети. $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания; $I_з$ – ток, протекающий через заземляющие устройства

Если принять $r_{\text{о}} = r_{\text{п}}$, то падение напряжения на сопротивлении повторного заземления $U_{\text{п}}$ составит половину падения напряжения в нулевом проводнике. Как правило, оно значительно выше допустимых 50 В.

Поэтому повторное заземление нулевого проводника должно рассматриваться как вспомогательная мера защиты, смягчающая аварийный режим при длительном срабатывании защиты или обрыве нулевого проводника.

Безопасность при защитном занулении может быть обеспечена только ограничением времени воздействия тока. С целью обеспечения срабатывания защиты в минимально необходимое время Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) [9] регламентируют ток короткого замыкания.

При защите предохранителями:

$$I_{кз} \geq 3 \cdot I_{пл.вст} \quad (7.1)$$

при защите автоматическими выключателями с электромагнитным расцепителем:

$$I_{кз} \geq 1,1 \cdot I_y \quad (7.2)$$

при защите автоматическими выключателями, имеющими обратозависимую от тока характеристику:

$$I_{кз} \geq 3 \cdot I_p \quad (7.3)$$

где $I_{кз}$ – необходимый для срабатывания защиты ток короткого замыкания, А;

$I_{пл.вст}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А;

I_y – ток уставки (отсечки) автоматического выключателя, имеющего только электромагнитный расцепитель, А;

I_p – номинальный ток нерегулируемого расцепителя или уставка тока регулируемого расцепителя, А.

Расчет защитного зануления на отключающую способность проводится с целью определения соответствия фактического значения тока короткого замыкания в петле «фаза-нуль» требованиям ПТЭЭП.

Фактическое значение тока короткого замыкания в петле «фаза – нуль» с достаточной для практики точностью определяется по формуле:

$$I_{кз}^1 = \frac{U}{Z_m / 3 + Z_n} \quad (7.4)$$

где $I_{кз}^1$ – ток короткого замыкания в петле «фаза-нуль», А;

U – фазное напряжение сети, В;

Z_T – полное сопротивление обмоток источника питания, Ом;

Z_n – полное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников, Ом;

$$Z_n = \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + (X_\phi + X_n + X_n)^2}, \quad (7.5)$$

где R_ϕ и R_n – соответственно активные сопротивления фазного и защитного нулевого проводников, Ом;

X_ϕ и X_n – соответственно внутренние индуктивные сопротивления фазного и защитного нулевого проводников, Ом;

X_n – внешнее индуктивное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников, Ом.

Учитывая равенства (1.4) и (5.5), величина тока короткого замыкания в петле «фаза – нуль» определяется по формуле:

$$I_{кз}^1 = \frac{U}{Z_m / 3 + \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + (X_\phi + X_n + X_n)^2}}, \quad (7.6)$$

Активные сопротивления фазных и защитных нулевых проводников определяются по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (7.7)$$

где R – активное сопротивление проводника, Ом;

ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом · мм²/м;

l – длина проводника, м;

S – площадь сечения проводника, мм².

Активные сопротивления можно определить посредством погонного сопротивления по формуле:

$$R = R' \cdot l, \quad (7.8)$$

где R' – активное погонное сопротивление проводника, Ом/км;

l – длина проводника, км.

Внешнее индуктивное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников определяется по формуле:

$$X_n = 2 \cdot f \cdot \mu \cdot l \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot D}{d}\right) \quad (7.9)$$

где X_{Π} – внешнее индуктивное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников, Ом; f – частота переменного тока, Гц; l – длина линии, м;

D – расстояние между проводами, мм; d – диаметр провода, мм;

μ – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м;

$$\mu = \mu_c \cdot \mu_0 \quad (7.10)$$

где μ_c – относительная магнитная проницаемость среды;

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad \text{– магнитная постоянная.}$$

Полные сопротивления обмоток масляных и сухих трансформаторов Z_T приведены соответственно в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 – Приближенные значения полных сопротивлений Z_T обмоток масляных трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	Z_T , Ом, при схеме соединения обмоток		Мощность трансформатора, кВ·А	Номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, кВ	Z_T , Ом, при схеме соединения обмоток	
		Y/Y_H	Δ/Y_H и Y/Z_H			Y/Y_H	Δ/Y_H и Y/Z_H
25	6-10	3,110	0,906	400	6-10	0,195	0,056
40	6-10	1,949	0,562		20-35	0,191	-
63	6-10	1,237	0,360	630	6-10	0,129	0,042
	20-35	1,136	0,407		20-35	0,121	-
100	6-10	0,799	0,226	1000	6-10	0,081	0,027
	20-35	0,764	0,327		20-35	0,077	0,032
160	6-10	0,487	0,141	1600	6-10	0,054	0,017
	20-35	0,478	0,203		20-35	0,051	0,020
250	6-10	0,312	0,090				
	20-35	0,305	0,130				

Таблица 7.2 – Приближенные значения полных сопротивлений Z_T обмоток сухих трансформаторов

Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	Z_T , Ом	Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения обмоток	Z_T , Ом,
160	Δ/Y_H	0,165	560	Y/Y_H	0,13
180	Y/Y_H	0,453	630	Δ/Y_H	0,042
250	Δ/Y_H	0,106	750	Y/Y_H	0,109
320	Y/Y_H	0,254	1000	Δ/Y_H	0,027
400	Δ/Y_H	0,066			

Внешнее индуктивное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников можно определить посредством погонного внешнего индуктивного сопротивления по формуле

$$X_{II} = X'_{II} \cdot l, \quad (7.11)$$

где X'_{II} – внешнее индуктивное погонное сопротивление, Ом/км;

l – длина линии, км;

Внутреннее индуктивное сопротивление фазных X_ϕ и нулевых защитных X_n проводников можно определить посредством внутреннего индуктивного погонного сопротивления по формуле

$$X = X' \cdot l, \quad (7.12)$$

где X' – внутреннее индуктивное погонное сопротивление проводника, Ом/км;

l – длина проводника, км.

Внутреннее индуктивное погонное сопротивление медных и алюминиевых проводников сравнительно мало $X' = 0,00156$ Ом/км, поэтому значениями X_ϕ и X_n в формуле 1.6 иногда пренебрегают.

Погонные активные R' и внешние индуктивные X'_{II} сопротивления фазных и нулевых защитных проводников из цветных металлов приведены в таблице 7.3, погонные активные R'_c и внутренние индуктивные X'_c сопротивления стальных проводников – в таблице 7.4.

Таблица 7.3 – Погонное активное R' и внешнее индуктивное X'_{II} сопротивления, Ом/км, фазных и нулевых защитных проводников при частоте тока 50 Гц

Площадь сечения, мм ²	R' проводов или жил кабеля при 20 ⁰ С		X'_{II} алюминиевых и сталеалюминиевых проводов ВЛ при среднем расстоянии между проводами, мм					X'_{II} проводов и кабелей	
	медных	алюминиевых или сталеалюминиевых	800	1000	1500	2000	2500	провод проложен открыто	провод в трубах или кабель
10	1,64	3,14	-	-	-	-	-	0,31	0,07
16	1,2	1,96	0,374	0,389	0,411	0,48	0,442	0,29	0,07
25	0,74	1,27	0,362	0,376	0,398	0,407	0,417	0,27	0,07
35	0,54	0,91	0,349	0,364	0,388	0,404	0,412	0,26	0,06
50	0,39	0,63	0,339	0,354	0,377	0,395	0,409	0,25	0,06

Продолжение таблицы 7.3

70	0,28	0,45	0,329	0,343	0,367	0,385	0,399	0,24	0,06
95	0,2	0,33	0,318	0,332	0,355	0,374	0,389	0,23	0,06
120	0,158	0,27	0,315	0,325	0,349	0,368	0,382	0,22	0,06
150	0,123	0,21	0,311	0,315	0,344	0,36	0,374	0,21	0,06
185	0,103	0,17	0,289	0,311	0,339	0,355	0,37	0,21	0,06
240	0,078	0,131	-	0,304	0,329	0,347	0,361	0,2	0,06
300	0,063	0,105	-	0,297	0,322	0,34	0,354	0,19	0,06

Таблица 7.4 – Погонное активное R'_c и внутреннее индуктивное X'_c сопротивления, Ом/км, стальных проводников при частоте тока 50 Гц

Размеры (или диаметр) сечения, мм ²	Сечение, мм ²	Ожидаемая плотность тока в проводнике А/мм ²							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		R'_c	X'_c	R'_c	X'_c	R'_c	X'_c	R'_c	X'_c
Полоса прямоугольного сечения									
20 X 4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30 X 40	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30 X 5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	-	-
40 X 4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50 X 4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50 X 5	250	2,10	1,26	1,60	0,96	1,28	0,77	-	-
60 X 5	300	1,77	1,06	1,34	0,8	1,08	0,65	-	-
Проводник круглого сечения									
5	19,63	17,0	10,2	14,4	8,65	12,4	7,45	10,7	6,4
6	28,27	13,7	8,20	11,2	6,70	9,4	5,65	8,0	4,8
8	50,27	9,60	5,75	7,5	4,50	6,4	3,84	5,3	3,2
10	78,54	7,20	4,32	5,4	3,24	4,20	2,52	-	-
12	113,1	5,60	3,36	4,0	2,40	-	-	-	-
14	150,9	4,55	2,73	3,2	1,92	-	-	-	-
16	201,1	72	2,23	2,7	1,60	-	-	-	-

Исходные данные к расчету защитного зануления на отключающую способность

1 Тип, мощность, номинальное напряжение обмоток высшего напряжения, схема соединения обмоток трансформатора.

2 Материал, сечение фазных и нулевых проводников и длина линии.

3 Вид автоматической защиты линии и ее параметры.

Последовательность расчета

- 1 Определяется требуемое ПТЭЭП значение тока короткого замыкания $I_{кз}^{тр}$.
- 2 Определяется фактическое значение тока короткого замыкания в петле «фаза–нуль» $I_{кз}^{факт}$.
- 3 На основании сравнения значений $I_{кз}^{тр}$ и $I_{кз}^{факт}$ дается заключение об отключающей способности защитного зануления.

Пример расчета

Произвести расчет защитного зануления вводного устройства электроустановки на отключающую способность.

Исходные данные:

- источник питания: масляный трансформатор мощностью $S = 400$ кВ·А, напряжение 6 / 0,4 кВ, схема соединения обмоток Y/Y₀.
- питающий кабель : четырехжильный с медными жилами 3 x 120 мм² и 1 x 70 мм²;
- длина питающей линии $l = 0,25$ км;
- линия защищена предохранителем ПН2 – 400 с номинальным током плавной вставки $I_{пл} = 300$ А (рисунок 7.4).

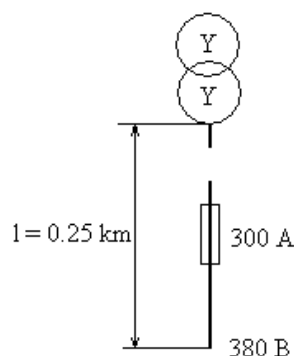


Рисунок 7.4 – К расчету защитного зануления на отключающую способность

1 Определяем требуемое ПТЭЭП значение тока короткого замыкания по формуле 7.1:

$$I_{кз}^{факт} = 3 \cdot 300 = 900 \text{ А.}$$

2 Определяем величину тока короткого замыкания в петле «фаза – нуль» по формуле 7.6:

$$I_{кз}^{факт} = \frac{U}{Z_{мп} / 3 + \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (X_{\phi} + X_n + X_n)^2}}$$

Фазное напряжение сети $U = 220$ В.

Полное сопротивление обмоток масляного трансформатора мощностью $S = 400$ кВ·А, напряжением 6/0,4 кВ при схеме Y/Y_0 по таблице 7.1 $Z_T = 0,195$ Ом.

Погонное активное сопротивление медного проводника сечением 120 мм² по таблице 7.3 $R' = 0,158$ Ом/км.

Активное сопротивление фазного проводника по формуле 7.8:

$$R_{\phi} = 0,158 \cdot 0,25 = 0,0395 \text{ Ом.}$$

Погонное активное сопротивление медного проводника сечением 70 мм по таблице 7.3:

$$R' = 0,28 \text{ Ом/км.}$$

Активное сопротивление нулевого защитного проводника по формуле 7.8:

$$R_n = 0,28 \cdot 0,25 = 0,07 \text{ Ом.}$$

Внутреннее индуктивное погонное сопротивление медных проводников:

$$X' = 0,0156 \text{ Ом/км.}$$

Внутреннее индуктивное сопротивление фазного и нулевого защитного проводников по формуле 7.12:

$$X_{\phi} = X_n = 0,0156 \cdot 0,25 = 0,0039 \text{ Ом.}$$

Погонное внешнее индуктивное сопротивление кабельной линии по таблице 7.3:

$$X'_n = 0,06 \text{ Ом/км.}$$

Внешнее индуктивное сопротивление фазного и защитного нулевого проводников по формуле 7.11:

$$X_n = 0,06 \cdot 0,25 = 0,015 \text{ Ом;}$$

$$I_{кз}^{факт} = \frac{220}{0,195 / 3 + \sqrt{(0,0395 + 0,07)^2 + (0,0039 + 0,0039 + 0,015)^2}} = 1260$$

Вывод: фактическое значение тока короткого замыкания в петле «фаза – нуль» $I_{кз}^{факт} = 1260$ А, требуемое значение тока короткого замыкания $I_{кз}^{тр} = 900$ А; следовательно, отключающая способность защитного зануления обеспечена.

Задача 1. Проверить обеспеченна ли отключающая способность зануления в сети. Линия 380/220 В с медными проводами 3×25 мм² питается от трансформатора мощностью S кВ·А, 6/0,4 кВ. Защита двигателей плавкими предохранителями $I_{ном1} = 125$ А, $I_{ном2} = 80$ А. Материал нулевого защитного проводника – сталь. Коэффициент кратности тока $k = 3$.

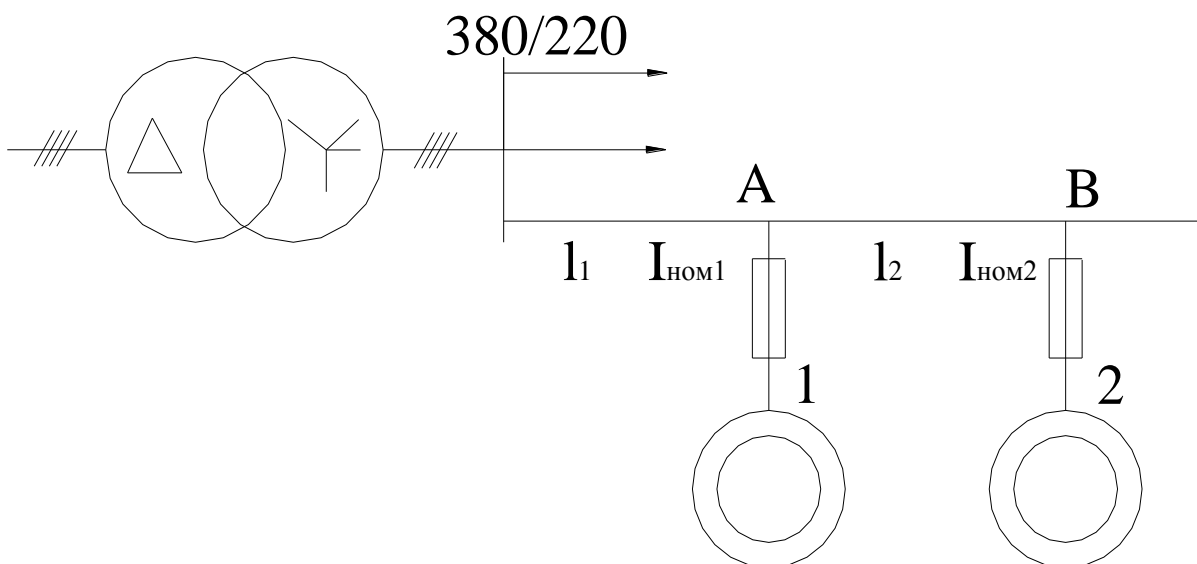


Рисунок 7.5 – Схема сети к заданию

Решение сводится к проверке условий срабатывания защиты.

Наименьший допустимый ток

1 двигатель $I_{k1} = k \cdot I_{ном1}$, А 2 двигатель $I_{k2} = k \cdot I_{ном2}$, А

Сопротивления фазного и защитного нулевого проводников на участке линии

L_1

$$R_\phi = 0,018 \cdot \frac{L_1}{S}, \text{ Ом}$$

Так как фазный провод медный принимаем $X_\phi = 0$.

Для нулевого защитного проводника, ожидаемая плотность тока:

$$J = \frac{I_{k1}}{S}, \text{ А/мм}^2$$

По таблице, находим для полосы с заданным сечением и полученной плотностью тока r_ω Ом/км.

Тогда искомое сопротивление $R_{н.з.} = r_\omega \cdot L_1, \text{ Ом}$

Аналогично для $I_{k1}, \text{ А}$ и $J, \text{ А/мм}^2$ находим $x_\omega, \text{ Ом/мм}$.

$$X_{н.з.} = x_\omega \cdot L_1, \text{ Ом}$$

Принимаем $X_n = 0,6 \text{ Ом/км}$, значит $X_n = 0,6 \cdot L_1 \text{ Ом}$.

Определяем сопротивления фазного и нулевого проводников на всей длине линии $\cdot (L_1 + L_2)$:

$$R_\phi = 0,018 (L_1 + L_2) / S \text{ Ом}$$

Ожидаемая плотность тока

$$J = \frac{I_{k2}}{S}, \text{ А/мм}^2$$

Находим для нулевого проводника, r_ω, x_ω и $R_{н.з.}, X_{н.з.}$

$$X_n = 0,6 \cdot (L_1 + L_2), \text{ Ом}$$

Находим действительные значения токов однофазного КЗ. и сравниваем с наименьшими допустимыми по условию срабатывания.

$$I_{кз}^{\text{факт}} = \frac{U}{Z_{mp} / 3 + \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + (X_\phi + X_n + X_n)^2}}$$

Таблица 7.5 – Варианты заданий

N вар.	S, кВ·А	L ₁ , м	L ₂ , м	Сечение н.п, мм ²	Схема соединения тр-ра.
1	25	200	150	40×4	Y/Y
2	40	250	200	20×4	Y/Y
3	63	300	250	30×4	Y/Y
4	100	150	180	40×4	Y/Y
5	160	250	200	30×4	Y/Y
6	250	200	150	20×4	Y/Y
7	400	300	180	50×4	Y/Y
8	630	150	150	30×4	Y/Y
9	100	180	200	30×4	Δ/Y

Продолжение таблицы 7.5

10	250	250	200	40×4	Δ/Y
11	160	300	250	30×4	Δ/Y
12	630	200	100	30×4	Δ/Y
13	400	250	200	50×4	Δ/Y
14	63	150	100	40×4	Δ/Y
15	40	150	180	50×4	Δ/Y

Контрольные вопросы

- 1 В электроустановках каких систем выполняется защитное зануление?
- 2 Назначение и принцип действия защитного зануления.
- 3 С какой целью выполняется повторное заземление нулевого провода?
- 4 Какие требования предъявляются к току короткого замыкания?
- 5 Назовите составляющие петли «фаза-нуль».
- 6 Какова цель расчета защитного зануления на отключающую способность?
- 7 Какие исходные данные необходимы для расчета защитного зануления на отключающую способность?
- 8 Какова последовательность расчета защитного зануления на отключающую способность?

Практическое занятие 8

Выбор аппаратов защиты в электроустановках

Цель практического занятия – познакомить студентов с назначением, устройством, принципом действия, характеристиками, выбором и методикой расчета параметров наиболее распространенных аппаратов защиты приемников электрической энергии (электроприемников).

Теоретическая часть

Назначение и требования к аппаратам защиты

Аппараты защиты служат для отключения электроприемников при возникновении в них ненормальных режимов, угрожающих работоспособности самих электроприемников и безопасности обслуживающего персонала.

В частности, являясь одним из элементов системы защитного зануления (система TN), аппараты защиты должны обеспечивать надежное и быстрое отключение электроприемников при повреждении основной изоляции на открытые проводящие части, предотвращая тем самым опасность косвенного прикосновения. Следовательно, от правильного выбора аппаратов защиты и их параметров существенно зависят и эффективность системы защитного зануления и электробезопасность обслуживающего персонала.

Для эффективного выполнения своих защитных функций аппараты защиты должны отвечать следующим требованиям:

– высокая чувствительность, которая проявляется в способности аппаратов защиты реагировать на достаточно малые отклонения режима работы электроприемника от нормального, что оказывает непосредственное влияние на степень безопасности обслуживающего персонала.

– недопустимость ложных отключений. Аппараты защиты должны надежно отключать электроприемники при возникновении аварийного режима, но не допускать отключения электроприемников при кратковременных токовых

перегрузках (пусковые токи, броски тока при технологических перегрузках и т.п.).

– малое время отключения. Под временем отключения понимают период времени с момента возникновения аварийного режима до момента разрыва цепи тока аппаратом защиты. Чем меньше время отключения, тем выше степень безопасности, так как с уменьшением времени прохождения тока через тело человека опасность воздействия тока снижается.

– селективность (избирательность) действия. Селективность действия аппаратов защиты проявляется в их способности отключать от сети только поврежденные электроприемники и не допускать отключения исправных. Иными словами, под селективным действием аппаратов защиты следует понимать такую их работу, когда на появление ненормального режима работы (короткие замыкания, перегрузки и т.п.) реагирует только ближайший к поврежденному электроприемнику аппарат защиты и не реагируют более удаленные аппараты. Это требование очень важное, так как не селективность действия аппаратов защиты приводит к ложному отключению исправных электроприемников, что может иметь нежелательные последствия.

Приведенные выше требования обязательно должны учитываться при выборе аппаратов защиты и их технических характеристик.

Аппараты защиты и их характеристики

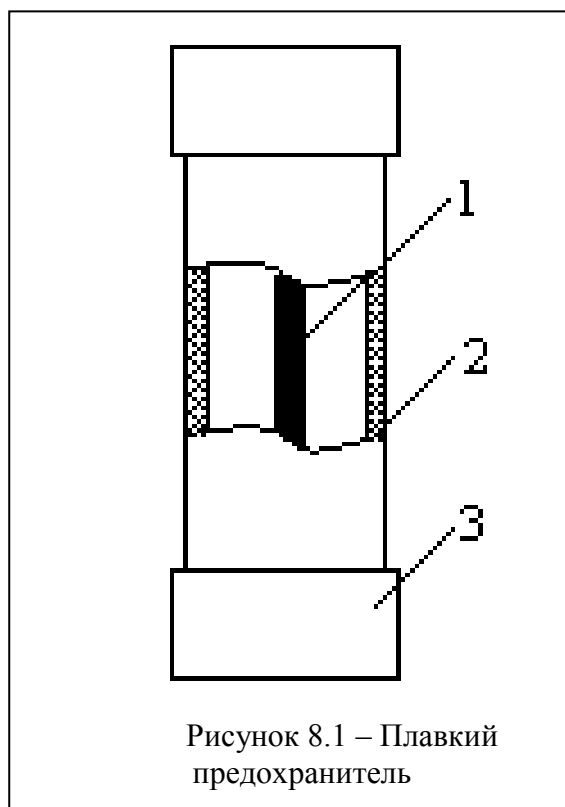
В настоящее время в электроустановках применяется целый ряд аппаратов защиты: плавкие предохранители, воздушные автоматические выключатели (автоматы), реле защиты, устройства защитного отключения (УЗО).

В электроустановках потребителей наиболее широкое применение находят плавкие предохранители и автоматы.

1 Плавкие предохранители. Устройство плавкого предохранителя показано на рисунке 8.1. Конструктивно он состоит из корпуса 1, выполненного из изоляционного материала (фарфор или фибра), плавкой вставки 2, и

металлических контактных колпачков 3, к которым присоединяется плавкая вставка.

Основным элементом предохранителя, непосредственно осуществляющим защитные функции, является плавкая вставка 2, которая выполняется в виде металлической нити или пластины.



Принцип действия плавкого предохранителя заключается в том, что повышение тока сверх нормированной величины приводит к повышению температуры плавкой вставки и к ее расплавлению (перегоранию), в результате чего цепь электрического тока прерывается. Особенностью плавких вставок является то, что они обладают тепловой инерцией, из-за которой их расплавление происходит не мгновенно, а с задержкой по времени, в течение которой их температура повышается до

температуры плавления. Причем, чем больший ток протекает через плавкую вставку, тем быстрее повышается ее температура и тем меньше требуется времени, чтобы она расплавилась. Таким образом, тепловая инерционность плавких вставок приводит к тому, что плавкие предохранители имеют обратно зависимую от тока временную характеристику.

Плавкие предохранители имеют свои достоинства и недостатки, которые следует учитывать при их выборе.

К достоинствам плавких предохранителей можно отнести простоту их конструкции, относительную дешевизну, безотказность в работе.

К недостаткам плавких предохранителей можно отнести следующие:

– поскольку предохранитель является однофазным аппаратом, то при токовых перегрузках может перегореть плавкая вставка только в одной из фаз

трехфазной сети, в результате чего защищаемая трехфазная электроустановка станет работать в ненормальном режиме на двух фазах;

– необходимость замены сгоревшей плавкой вставки осложняет обслуживание электроустановок;

– конструкция некоторых типов предохранителей позволяет легко применять нестандартные плавкие вставки (так называемые “жучки”). При установке таких кустарных некалиброванных плавких вставок предохранители перестают быть надежными аппаратами защиты, в результате чего весьма возможны местные перегревы, аварии, пожары и взрывы.

При выборе плавки предохранителей учитываются их следующие технические характеристики:

– номинальное напряжение предохранителя (U_{np}) – напряжение, указанное на предохранителе и соответствующее наибольшему номинальному напряжению сетей, в которых разрешается установка данного предохранителя;

– номинальный ток предохранителя (I_{np}) – ток, который указан на предохранителе, равный наибольшему из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данного предохранителя;

– номинальный ток плавкой вставки предохранителя (I_{nl}) – ток, указанный на плавкой вставке, который для нее допустим при длительной работе. Номинальный ток предохранителя всегда должен быть больше или равен номинальному току плавкой вставки, т.е. $I_{np} \geq I_{nl}$.

Технические данные некоторых типов трубчатых предохранителей приведены в таблице 8.1 [3].

Таблица 8.1 – Технические данные некоторых типов предохранителей.

Тип предохранителя	Номинальный ток предохранителя I_{np} , А	Номинальные токи плавких вставок I_{nl} , А
НПИ 15	15	6,10,15
НПН 60М	60	20,25,35,45,60
ПН2-100	100	30,40,50,60,80,100
ПН2 – 250	250	80,100,120,150,200,250
ПН2 – 400	400	200,250,300,350,400
ПН2 – 600	600	300,400,500,600

Продолжение таблицы 8.1

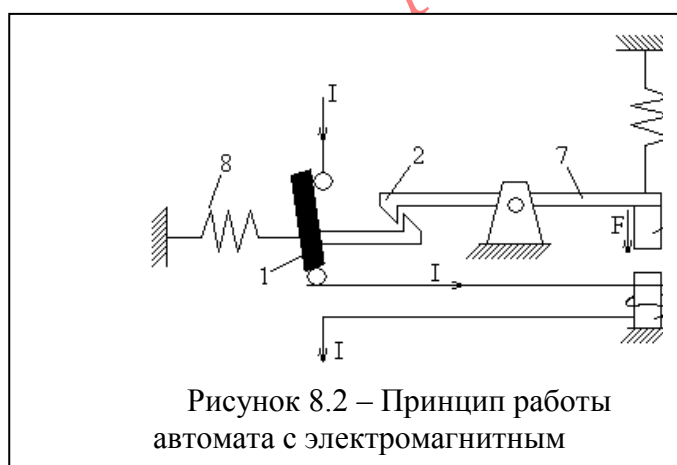
ПН2 – 1000	1000	500,600,750,800,1000
------------	------	----------------------

2 Автоматические выключатели (автоматы). Автоматические выключатели предназначены для включения, выключения и защиты электроприемников при токовых перегрузках и коротких замыканиях.

Автоматические выключатели относятся к коммутационным аппаратам ручного управления. Включение и выключение автоматов может производиться вручную, а при ненормальных режимах работы электроустановки (токовые перегрузки, короткие замыкания) отключение происходит автоматически.

Основным узлом, обеспечивающим автоматическое срабатывание автомата при ненормальном режиме, является расцепитель. По принципу действия применяемые в автоматах расцепители бывают электромагнитные, тепловые и комбинированные.

Принцип работы автомата с электромагнитным расцепителем можно упрощенно пояснить схемой, изображенной на рисунке 8.2. Ручным нажатием включающей кнопки или поворотом соответствующей рукоятки подвижный контакт 1 автомата замыкается и удерживается во включенном состоянии защелкой 2, по электрической цепи протекает ток I . Проходя по обмотке 3



электромагнитного расцепителя, ток I создает втягивающее усилие F , стремящееся притянуть якорь 4 к сердечнику 5 электромагнита. Однако, этому притяжению противодействует пружина 6, которая одновременно обеспечивает и надежное сцепление защелки 2.

Как только ток I достигает установленного значения, равного току срабатывания (установки) расцепителя $I_{уст.эм}$, втягивающее усилие F электромагнита преодолевает сопротивление пружины 6, якорь 4 притягивается

к сердечнику 5, рычаг 7 поворачивается по часовой стрелке и освобождает защелку 2. Под действием пружины 8 контакт 1 размыкается и цепь тока автоматически прерывается, т.е. происходит выключение автомата.

Особенностью автоматов с электромагнитными расцепителями является их безынерционность, благодаря чему они способны осуществлять мгновенное отключение электроустановок без выдержки времени (токовую отсечку). При использовании автомата в системе защитного зануления (система TN). Эта особенность является существенным достоинством, так как способствует выполнению требований ПУЭ [7] к быстродействию защиты при коротких замыканиях.

В автоматах с тепловым расцепителем основным элементом, осуществляющим выключение автомата при токовых перегрузках, является биметаллическая пластина. Она представляет собой элемент, состоящий из двух жестко соединенных между собой пластин, выполненных из металлов с разными коэффициентами теплового линейного расширения. При токовых перегрузках оба элемента биметаллической пластины нагреваются и удлиняются. Но поскольку коэффициенты теплового линейного расширения у них разные, то один из элементов удлиняется больше другого. В результате этого биметаллическая пластина изгибается и, воздействуя на механизм свободного расцепления, освобождает защелку, что приводит к выключению автомата.

Особенностью автоматов с тепловыми расцепителями является их тепловая инерционность, из-за которой их выключение происходит не мгновенно, а с выдержкой времени. Причем, чем больше токовая перегрузка, тем быстрее возрастает температура биметаллической пластины, тем быстрее она изгибается и производит отключение автомата. Таким образом, тепловые расцепители, так же как и плавкие предохранители, имеют обратно зависимую от тока временную характеристику, что позволяет избежать ложных отключений электроустановок при кратковременных токовых перегрузках (например, при пусковых токах электродвигателей).

В автоматах с комбинированным расцепителем имеется и электромагнитный элемент и биметаллическая пластина. Такие автоматы позволяют осуществлять токовую отсечку (мгновенное срабатывание) при коротких замыканиях и отключение электроприемников с обратной зависимостью от тока выдержкой времени при токовых перегрузках, не допуская при этом ложного отключения при кратковременных перегрузках, не опасных для электроприемников (например, при пуске электродвигателей).

Для выбора автоматов используются их следующие технические характеристики:

– номинальное напряжение автомата (U_A) – напряжение, соответствующее наибольшему номинальному напряжению электрических сетей, в которых разрешается применять данный автомат;

– номинальный ток автомата (I_A) – наибольший ток, на который рассчитаны токоведущие части и контакты автомата, равный наибольшему из номинальных токов расцепителя;

– номинальный ток расцепителя автомата (магнитного $I_{эм}$, теплового I_T или комбинированного $I_{комб}$) – наибольший ток, на который рассчитан расцепитель автомата для длительной работы, не вызывающий срабатывания расцепителя;

– ток уставки (срабатывания) расцепителя ($I_{уст.эм}$, $I_{уст.т}$) – наименьший ток, при котором срабатывает расцепитель автомата.

Типы применяемых в настоящее время автоматов весьма разнообразны и их технические характеристики приведены в соответствующих справочниках и каталогах. Технические данные некоторых автоматов приведены в таблице 8.2 [11].

Таблица 8.2 – Технические данные автоматов серии А3100

Тип автомата	Номинальный ток автомата, I_A , А	Комбинированный расцепитель	
		Номинальный ток, $I_{комб}$, А	Ток установки мгновенного срабатывания, $I_{уст.эм}$, А
А3110	15	15	150
	20	20	200
	25	25	250
	30	30	300
	40	40	400
	50	50	500
	60	60	600
	80	80	800
А3130	100	100	1000
	120	120	840
	140	140	1000
	170	170	1200
	200	200	1400

Расчет требуемых параметров и выбор аппаратов защиты

1 Выбор плавких вставок предохранителей

Выбор плавких вставок предохранителей осуществляется из противоречивых условий. С одной стороны плавкая вставка должна в возможно короткое время отключить электроприемник при коротком замыкании, и чем меньше ее номинал, тем быстрее и надежнее произойдет ее отключение. С другой стороны плавкая вставка должна обеспечить номинальный режим работы электроприемника и не допускать отключения при кратковременных перегрузках (например, при запуске электрических двигателей с короткозамкнутым ротором). В этих случаях, чем выше номинал плавкой вставки, тем надежнее будет работа приемника электрической энергии. Однако, учитывая, что пусковой режим длится кратковременно, а плавкая вставка обладает тепловой инерционностью, с целью повышения чувствительности защиты допускается ее перегрузка, при которой она за время пуска не успевает перегореть.

Учитывая вышесказанное для защиты электрических двигателей с коротко замкнутым ротором и другой беспокойной нагрузки, плавкая вставка выбирается из условия

$$I_{пл} \geq \frac{I_{пуск}}{\alpha}, \quad (8.1)$$

где $I_{пл}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А;

$I_{пуск}$ – пусковой ток потребителя, А;

α – коэффициент запаса плавкой вставки, учитывающий ее инерционность.

Для защиты трансформаторов, электрических двигателей с фазным ротором, осветительных сетей и другой спокойной нагрузки, плавкая вставка выбирается по номинальному току электроприемника

$$I_{пл} \geq I_n, \quad (8.2)$$

где I_n – номинальный ток приемника электрической энергии, А.

2 Выбор автоматических выключателей (автоматов)

Выбор автомата для включения, выключения и защиты электроустановки производится таким образом, чтобы его номинальный ток I_A был равен или несколько больше номинального тока, длительно протекающего через его контакты и токоведущие части

$$I_A \geq I_n, \quad (8.3)$$

где I_A – номинальный ток автомата, А;

I_n – номинальный ток приемника электрической энергии, А.

Выбрав из условия 2.3 серийный автомат, необходимо проверить, чтобы, во избежание ложных отключений, номинальные токи его расцепителей были не меньше длительно протекающего через них номинального тока электроприемника

$$I_{н.эм} \geq I_n, I_{н.т} \geq I_n \text{ и } I_{н.комб} \geq I_n \quad (8.4)$$

Кроме того, во избежание ложных отключений при кратковременных токовых перегрузках (например, при пуске электродвигателя), необходимо

убедиться, что ток уставки электромагнитного расцепителя автомата (токовой отсечки) $I_{уст.эм}$ больше пускового тока $I_{пуск}$ электродвигателя

$$I_{уст.эм} \geq I_{пуск} \quad (8.5)$$

Исходные данные к выбору аппаратов защиты электроприемников

1 Вид приемника электрической энергии: электрический двигатель (с короткозамкнутым или фазным ротором), трансформатор (трехфазный, двухфазный, однофазный), электрическая цепь (трехфазная, двухфазная, однофазная) и т.д.

2 Номинальные параметры приемников электрической энергии: напряжение, мощность, коэффициент мощности. Для электрических двигателей с короткозамкнутым ротором кроме указанных параметров – коэффициент полезного действия электрического двигателя, обратно пускового тока.

3 Вид аппарата защит для защиты приемника электрической энергии: плавкий предохранитель, тип автоматического выключателя.

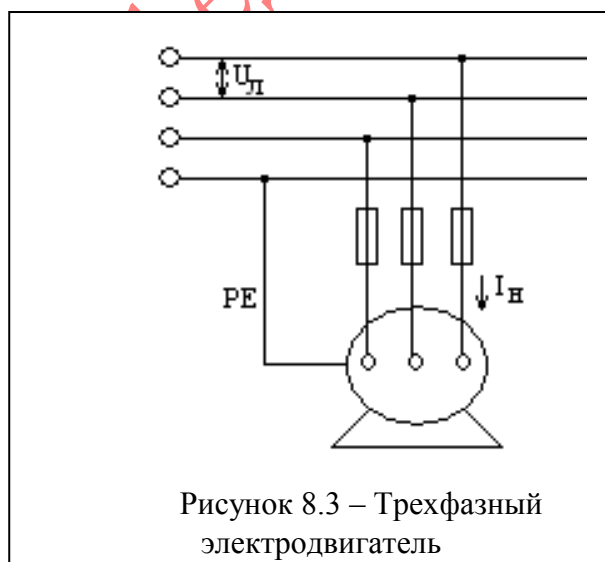
Последовательность расчета номинальных токов плавких вставок и выбора плавких предохранителей

1 Определяется номинальный ток приемника и электрической энергии, то есть ток, который он потребляет из сети в длительном установившемся режиме,

работая с номинальной нагрузкой.

Номинальный ток трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым или фазным ротором (рисунок 8.3) определяется по формуле

$$I_n = \frac{1000 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (8.6)$$



где P – номинальная мощность на валу электродвигателя, кВт;

U_l – номинальное линейное напряжение (напряжение между фазами) сети, В;

$\cos\varphi$ – номинальный коэффициент мощности, показывающий какая часть полной мощности, потребляемой электродвигателем из сети, идет на выполнение полезной работы;

η – номинальный коэффициент полезного действия электродвигателя.

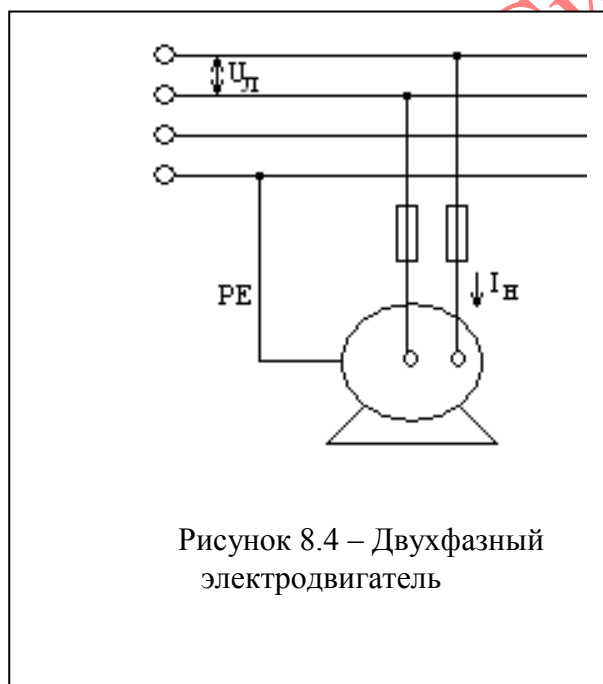
Номинальные коэффициенты мощности и коэффициенты полезного действия электродвигателей приводятся в их технических характеристиках и обычно лежат в пределах: $\cos\varphi = 0,7 - 0,9$, $\eta = 0,7 - 0,95$.

Номинальный ток трехфазного трансформатора определяется по формуле

$$I_n = \frac{1000 \cdot S}{\sqrt{3} \cdot U_l}, \quad (8.7)$$

где S – полная номинальная мощность трансформатора (активная и реактивная), потребляемая из сети, кВ·А;

U_l – номинальное линейное напряжение сети, В.



Номинальный ток двухфазного электроприемника (рисунок 8.4), включенного между двумя фазами, определяется по формулам

$$I_n = \frac{1000 \cdot S}{U_l}, \quad (8.8)$$

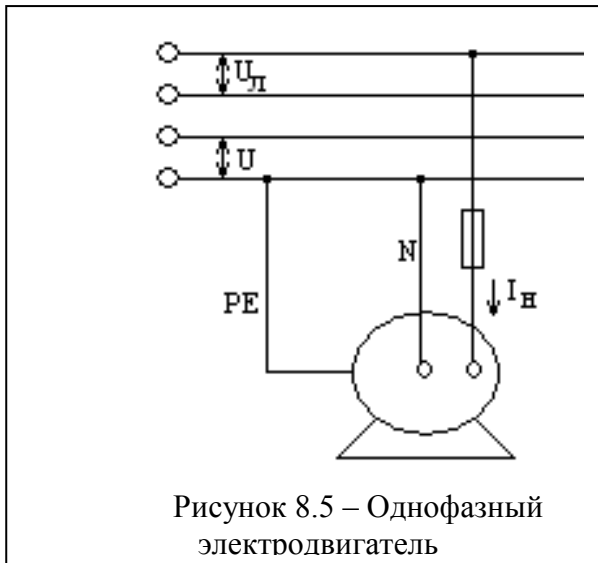
или

$$I_n = \frac{1000 \cdot P}{U_l \cdot \cos\varphi}, \quad (8.9)$$

где S – полная номинальная мощность, потребляемая электроприемником из сети, кВ·А;

P – активная номинальная

мощность, потребляемая электроприемником из сети, кВт;



U_L – номинальное линейное напряжение сети, В;

$\cos\varphi$ – номинальный коэффициент мощности потребителя.

Номинальный ток однофазного электроприемника, включенного между фазным и нулевым рабочим проводником (рисунок 8.5), определяется по формулам

$$I_n = \frac{1000 \cdot S}{U}, \quad (8.10)$$

или
$$I_n = \frac{1000 \cdot P}{U \cdot \cos\varphi}, \quad (8.11)$$

где S – полная номинальная мощность, потребляемая электроприемником из сети, кВ·А;

P – активная номинальная мощность, потребляемая электроприемником из сети, кВт;

U – номинальное фазное напряжение сети, В;

$\cos\varphi$ – номинальный коэффициент мощности электроприемника.

2 Для асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором определяется пусковой ток по формуле

$$I_{\text{пуск}} = K_n \cdot I_n, \quad (8.12)$$

где $I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток электродвигателя, А;

I_n – номинальный ток электродвигателя, А;

K_n – коэффициент кратности пускового тока, показывающий во сколько раз пусковой ток электродвигателя превышает номинальный ток.

Значения коэффициента K_n приводятся в технических характеристиках электродвигателей и обычно лежат в следующих пределах:

$K_n = 4 - 7$ – для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором;

$K_n = 1,5 - 2,5$ – для асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

3 Для электродвигателей с короткозамкнутым ротором определяется требуемое значение номинального тока плавкой вставки по формуле

$$I_{нл}^{mp} = \frac{I_{пуск}}{\alpha}, \quad (8.13)$$

где α – коэффициент запаса плавкой вставки, учитывающий кратковременную токовую перегрузку.

Согласно опытным данным значения коэффициента α принимаются равными:

$\alpha = 2,5$ – для электродвигателей, пускаемых в холостую (легкие условия пуска);

$\alpha = 1,6 - 2,0$ – для электродвигателей, пускаемых под нагрузкой (тяжелые условия пуска).

4 По требуемому значению номинального тока плавкой вставки $I_{нл}^{тр}$ для электрических двигателей с короткозамкнутым ротором и номинальным током других потребителей выбираются предохранители с ближайшими большими стандартными значениями номинальных токов плавких вставок $I_{нл}$ (таблица 8.1).

5 Определяется требуемое значение номинального тока плавкой вставки $I_{нл}^{тр}$ для защиты группы электроприемников.

Требуемое значение номинального тока плавкой вставки для защиты группы электроприемников выбирается наибольшее значение из трех условий.

5.1 Плавкая вставка для защиты группы электроприемников должна обеспечить номинальный режим работы всех электроприемников

$$I_{нл}^{mp} \geq \sum_{i=1}^n I_{ni}, \quad (8.14)$$

где $\sum_{i=1}^n I_{ni}$ – сумма номинальных токов всех электроприемников, А.

5.2 Плавкая вставка для защиты группы электроприемников должна обеспечить запуск электроприемника с максимальным пусковым током при условии, что все остальные работают в номинальном режиме

$$I_{nl}^{mp} \geq \frac{I_{пуск} + \sum_{i=1}^{n-1} I_{ni}}{\alpha}, \quad (8.15)$$

где $I_{пуск}$ – наибольший пусковой ток электроприемника в группе, А;

$\sum_{i=1}^{n-1} I_{ni}$ – сумма номинальных токов всех электроприемников без учета запускаемого, А;

α – коэффициент запаса плавкой вставки для запускаемого электроприемника.

5.3 Условие селективности: плавкая вставка для защиты группы электроприемников по номиналу должна быть как минимум на ступень выше любого значения номинального тока плавкой вставки в группе

$$I_{nl}^{mp} \geq I_{nli} \quad (8.16)$$

где I_{nli} – наибольшее значение номинального тока плавкой вставки в группе, А.

Последовательность расчета и выбора автоматических выключателей

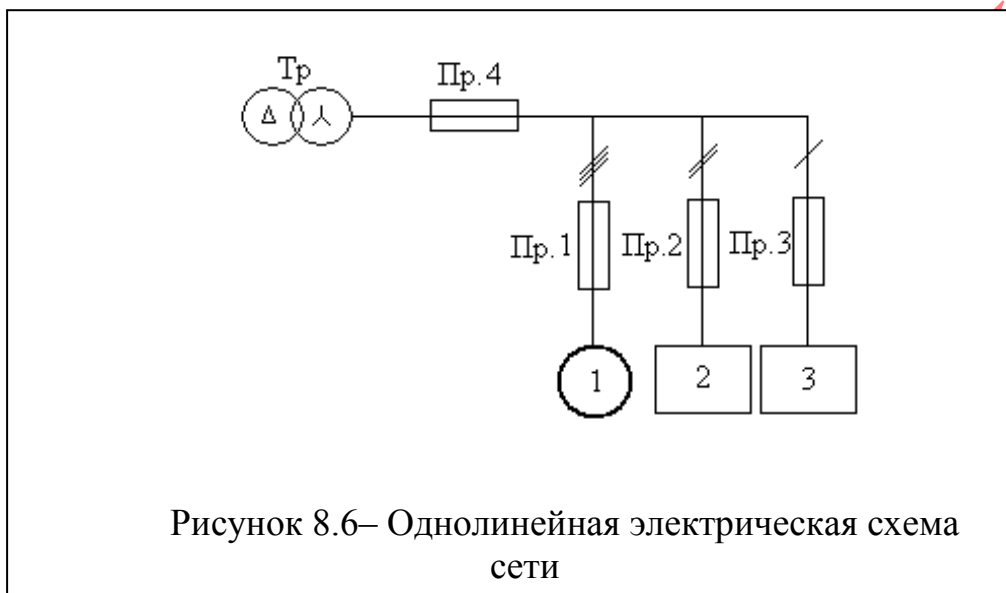
1 Определяется номинальный ток электроприемника по формулам (8.6...8.11).

2 Для электрического двигателя с короткозамкнутым ротором определяется пусковой ток по формуле (8.12).

3 По номинальному току электроприемника выбирается автоматический выключатель (таблица 8.2) с соблюдением условий 8.3, 8.4 и 8.5.

Пример расчета номинальных токов плавких вставок и выбора предохранителей

Произвести расчет и выбрать плавкие предохранители для защиты электроприемников, изображенных на однолинейной электрической схеме сети рисунок 8.6.



Исходные данные:

– напряжение сети 380/220 В (линейное напряжение $U_{л} = 380$ В, фазное напряжение $U = 220$ В);

– электроприемник 1: трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и техническими характеристиками: $P = 20$ кВт; $K_{nl} = 6,0$; $\cos\varphi_1 = 0,9$; $\eta_1 = 0,885$; условия пуска – легкие;

– электроприемник 2: двухфазная нагревательная печь мощности $P_2 = 7$ кВт; $\cos\varphi_2 = 1$;

– электроприемник 3: однофазная осветительная установка общей мощностью $P_3 = 1$ кВт; $\cos\varphi_3 = 1$.

1 Определяем номинальный ток электродвигателя по формуле (8.9):

$$I_{n1} = \frac{1000 \cdot 20}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,885} = 38,2 \text{ А.}$$

2 определяем номинальный ток нагревательной печи по формуле (8.10):

$$I_{н2} = \frac{1000 \cdot 7}{380 \cdot 1} = 18,4 A.$$

3 Определяем номинальный ток осветительной установки по формуле (8.11):

$$I_{н3} = \frac{1000 \cdot 1}{220 \cdot 1} = 4,5 A.$$

4 Определяем пусковой ток электродвигателя по формуле (8.12):

$$I_{пуск} = 6 \cdot 38,2 = 229,2 A.$$

5 Определяем требуемое значение номинального тока плавкой вставки для защиты электродвигателя по формуле (4.13):

$$I_{нл}^{mp} \geq \frac{229,2}{2,5} = 91,7 A.$$

6 По требуемому значению номинального тока плавкой вставки для защиты электродвигателя с короткозамкнутым ротором и номинальным током остальных электроприемников по таблице 2.1 выбираем предохранители с ближайшими большими значениями номинальных токов плавких вставок:

Пр.1 – тип ПН2 – 100 с номинальным током плавкой вставки $I_{нл1} = 100 A$;

Пр.2 – тип НПН 60М с номинальным током плавкой вставки $I_{нл2} = 20 A$;

Пр.3 – тип НПИ 15 с номинальным током плавкой вставки $I_{нл3} = 6 A$.

7 Определяем требуемое значение номинального тока плавкой вставки для защиты группы электроприемников по формуле (8.14):

$$I_{нл}^{mp} \geq I_{н1} + I_{н2} + I_{н3} = 38,2 + 18,4 + 4,5 = 61,1 A;$$

по формуле (8.15):

$$I_{нл}^{mp} \geq \frac{I_{пуск1} + I_{н2} + I_{н3}}{\alpha} = \frac{229,2 + 18,4 + 4,5}{2,5} = 100,8 A;$$

по формуле (8.16):

$$I_{нл}^{mp} \geq I_{нл1};$$

$$I_{нл}^{mp} > 100 A.$$

8 По максимальному значению требуемого номинального тока плавкой вставки для защиты группы электроприемников выбираем предохранитель

Пр.4 – тип ПН2 – 250 с номинальным током плавкой вставки $I_{нз4} = 10A$.

Результаты расчета представлены в таблице 8.3

Таблица 8.3 – Результаты расчета и выбора плавких вставок предохранителей

Наименование электроприемника	Номинальный ток электроприемника, I_n , А	Пусковой ток электроприемника, $I_{пуск}$, А	Требуемое значение номинального тока плавкой вставки, $I_{пл}^{тр}$, А	Тип предохранителя	Номинальный ток плавкой вставки, $I_{нз}$, А
Электродвигатель	38,2	229,5	91,7	ПН2-100	100
Нагревательная печь	18,4	-	18,4	НПН 60М	20
Осветительная установка	4,5	-	4,5	НПИ 15	6
Групповой предохранитель				ПН2-250	120

Пример расчета и выбора автоматических выключателей

Произвести расчет и выбрать автоматический выключатель для защиты асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором. Исходные данные: – напряжение сети 380/220 В; –технические характеристики электрического двигателя: $P = 14$ кВт, $K_n = 5$, $\cos\varphi = 0,85$, $\eta = 0,87$, условия пуска тяжелые.

1 Определим номинальный ток электрического двигателя по формуле (8.6)

$$I_n = \frac{1000 \cdot 14}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,85 \cdot 0,87} = 28,8A.$$

2 Определим пусковой ток электродвигателя по формуле (8.12)

$$I_{пуск} = 5 \cdot 28,8 = 144A.$$

3 По таблице 8.2 выбираем автоматический выключатель А 3110 с номинальным током $I_A = 30$ А.

4 Проверяем выполнение условия (8.5)

$$I_{уст.эм} = 300A > I_{пуск} = 144A.$$

Условие (8.5) выполняется.

В заключении этого раздела следует отметить, что автоматы, не смотря на их более высокую стоимость и сложность конструкции, имеют ряд преимуществ перед плавкими предохранителями. Они более удобны в эксплуатации, надежны и безопасны для обслуживающего персонала. Автоматы всегда готовы к быстрому повторному включению, обладают многократностью действия, обеспечивают одновременное отключение всех фаз поврежденной цепи, не допуская неполнофазных отключений, приводящих к ненормальному режиму работы электроустановок на двух фазах. Наличие в автоматах различных типов расцепителей дает более широкие возможности производить быструю селективную защиту электроустановок при коротких замыканиях и токовых перегрузках, не допуская при этом ложных отключений.

Контрольные вопросы

1. Для чего служат аппараты защиты?
2. Какие требования предъявляются к аппаратам защиты?
3. Что понимают под чувствительностью аппарата защиты?
4. На что влияет быстродействие аппарата защиты?
5. В чем проявляется селективность (избирательность) аппаратов защиты?
6. Какие аппараты защиты применяются в электроустановках?
7. Что такое плавкий предохранитель, как он устроен и в чем заключается его принцип действия?
8. Достоинства и недостатки плавких предохранителей?
9. Технические характеристики плавких предохранителей?
10. Назначение автоматов, их устройство и принцип действия?
11. Достоинства и недостатки автоматов?
12. Технические характеристики автоматов?
13. Последовательность расчета и выбора плавких вставок предохранителей?

14. Как рассчитываются номинальные токи электроустановок потребителей?

15. Принцип выбора автоматов?

кафедра АЭСиЭ ИЭЭиН СКФУ

Практическое занятие № 9

Расчёт заземляющего устройства п/ст 10/0.4 кВ

Цель работы: получить представление о заземляющих устройствах; ознакомиться с методами расчета заземляющих устройств в электроустановках.

Теоретическая часть

Методика расчёта

Расчитать заземляющее устройство (ЗУ) в электроустановках (ЭУ) с изолированной нейтралью (ИН) – это значит:

- определить расчётный ток замыкания на землю (I_3) и сопротивление ЗУ (R_3);
- определить расчётное сопротивление грунта (ρ_p);
- выбрать электроды и рассчитать их сопротивление;
- уточнить число вертикальных электродов и разместить их на плане.

Примечание. При использовании естественных заземлений

$$R_3 = \frac{R_e \cdot R_u}{R_e + R_u},$$

где, R_u , R_e – сопротивление искусственных и естественных заземлений, Ом.

Сопротивление заземления железобетонных фундаментов здания, связанных между собой металлическими конструкциями, определяется по формуле

$$R_3 = \frac{\rho}{\sqrt{S}},$$

где $\rho = 100$ Ом · м (суглинок);

S – площадь, ограниченная периметром здания, м².

Определение I_3 и R_3

В любое время года согласно ПУЭ

$$R_3 \leq \frac{250}{I_3},$$

где R_3 – сопротивление заземляющего устройства, Ом (не более 10 Ом);

I_3 – расчётный ток замыкания на землю, А (не более 500 А).

Расчётный (ёмкостной) ток замыкания на землю определяется приближённо

$$I_3 = \frac{U_n \cdot (35 \cdot L_{кл} + L_{вл})}{350},$$

где U_n – номинальное линейное напряжение сети, кВ;

$L_{кл}$, $L_{вл}$ – длина кабельных и воздушных электрически связанных линий, км.

Примечание. В электроустановках с ИН до 1 кВ

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} \text{ (не более 4 Ом).}$$

При мощности источника до 100 кВ·А – не более 10 Ом.

По этой же формуле рассчитывают R_3 , если ЗУ выполняется общим для сетей до и выше 1 кВ.

При совмещении ЗУ различных напряжений принимается R_3 наименьшее из требуемых значений (таблица 9.1).

Определение ρ_p грунта $\rho_p = K_{сез} \cdot \rho$,

где ρ_p – расчётное удельное сопротивление грунта, Ом·м; $K_{сез}$ – коэффициент сезонности, учитывающий промерзание просыхание грунта, $K_{сез} = F$

(климатическая зона, вид заземлителей), принимается по таблице 9.1.

Выбор и расчёт сопротивление электродов

Выбор электродов – по таблице 9.2.

Приближённо сопротивления одиночного вертикального заземления определяется по формуле

$$r_e = 0,3 \cdot \rho_p,$$

Сопротивление горизонтального электрода (полосы) определяется по формуле

$$r_p = \frac{0,4 \cdot \rho}{L_n} \cdot lq \cdot \frac{2 \cdot L_n^2}{b \cdot t},$$

где L_n – длина полосы, м; b – ширина полосы, м; для круглого горизонтального заземлителя $b = 1,1d$; t – глубина заложения, м.

Определения сопротивления с учётом коэффициента использования.

$$R_g = \frac{r_g}{\eta_g}; R_z = \frac{r_z}{\eta_z};$$

где R_g и R_z – сопротивление вертикального и горизонтального электродов с учётом коэффициентов использования, Ом; η_g и η_z – коэффициенты использования вертикального и горизонтального электродов, определяются по таблице 9.3:

$$\eta = F \left(\text{тип ЗУ, вид заземлителя, } \frac{a}{L}, N_g \right),$$

где a – расстояние между вертикальными заземлителями, м; L – длина вертикального заземлителя, м; N_g – число вертикальных заземлителей.

Необходимо сопротивление вертикальных заземлителей с учётом соединительной полосы

$$R_g = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3},$$

Уточнение числа вертикальных электродов

Необходимое число вертикальных заземлителей определяется следующим образом:

$$N_g = \frac{R_g}{R_u + \eta_g}, \text{ (при использовании естественных и искусственных}$$

заземлителей);

$$N_g = \frac{R_g}{R_z + \eta_g}, \text{ (при использовании только искусственных заземлителей);}$$

$$N_g = \frac{r_g}{R_u \cdot \eta_g \cdot \eta_{g,ym}},$$

где $\eta_{g,ym}$ – уточнённое значение коэффициента использования вертикальных заземлителей.

Таблица 9.1 – Наибольшее допустимое значение $R_{з.нб}$ для 3 – фазных сетей

Напряжение сети, кВ	Режим нейтрали	$R_{з.нб}$, Ом	Вид ЗУ
110 и выше	ЗН	0.5	Заземление
3...35	ИН	10	
0,66	ГЗН	2	Зануление
0,38		4	
0,22		8	
0.66; 0,38; 0,22	ИН	4	Заземление

Примечание. При удельном электрическом сопротивлении грунта более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные выше значения в $0,01 \cdot \rho$ раз, но не более 10 – кратного.

Таблица 9.2 – Коэффициенты сезонности $K_{сез}$

Климатическая зона	Вид заземлителя		Дополнительные сведения
	Вертикальный	горизонтальный	
1	2	3	4
I	1,9	5,8	Глубина заложения вертикальных заземлителей от поверхности земли 0,5...0,7 м
II	1,7	4,0	Глубина заложения горизонтальных заземлителей 0,3...0,8 м
III	1,5	2,3	
IV	1,3	1,8	

Примечание. Зона I имеет наиболее холодный, IV – тёплый климат; ρ – удельное сопротивление грунта, измерено при нормальной влажности, Ом · м принимается по таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Удельное сопротивление грунта ρ

Грунт	Торф	Глина, земля садовая	Чернозём	Сугли- нок	Каменистая почва	Супесь	Песок с галькой
$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	20	40	50	100	200	300	800

Таблица 9.4 – Рекомендуемые электроды

Вид электрода	Размеры, мм	$L, \text{ м}$	$t, \text{ м}$
Стальной уголок	50 × 50 × 5	2,5...3	0,5...0,7
	60 × 60 × 6		
	75 × 75 × 8		
Круглая сталь	12...16	5...6	
Труба стальная	60	2,5	
Полоса стальная	40 × 4	Расчётная	
Прутки стальной	10...12		

Таблица 9.5 – Значение коэффициентов использования электродов

N_e	$\frac{a}{L}$											
	1				2				3			
	η_e		η_z		η_e		η_z		η_e		η_z	
	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
4	0,69	0,74	0,45	0,77	0,78	0,83	0,55	0,89	0,85	0,88	0,7	0,92
6	0,62	0,63	0,4	0,71	0,73	0,77	0,48	0,83	0,8	0,83	0,64	0,88
10	0,55	0,59	0,34	0,62	0,69	0,75	0,4	0,75	0,76	0,81	0,56	0,82
20	0,47	0,49	0,27	0,42	0,64	0,68	0,32	0,56	0,71	0,77	0,45	0,68
30	0,43	0,43	0,24	0,31	0,6	0,65	0,3	0,46	0,68	0,75	0,41	0,58

где K – контурное ЗУ, P – рядное ЗУ

Задача 1

Дано: $A \times B = 15 \times 12$ м, $U_{л} = 20$ кВ, $L_{л(кл)} = 10$ км, $U_{н} = 0,4$ кВ, $\rho = 300$

Ом·м – супесь, $t = 0,7$ м, климатический район – IV, вертикальный электрод – уголок (75×75), $L_{г} = 3$ м, вид ЗУ – контурное, горизонтальный электрод – полоса (40×4)

Требуется: Определить количество вертикальных и длину горизонтальных заземлителей; Показать размещение ЗУ на плане; Определить фактическое значение сопротивления ЗУ.

Решение:

1. Определяется расчётное сопротивление одного вертикального электрода

$$r_{г} = 0,3 \cdot \rho \cdot K_{сез.г} = 0,3 \cdot 1,3 \cdot 300 = 117 \text{ Ом.}$$

По таблице 9.2 $K_{сез.г} = F$ (верт., IV) = 1,3.

2. Определяется предельное сопротивление совмещённого ЗУ

$$R_{з\text{у}1} \leq \frac{125}{I_{з}} 6,25 \text{ Ом (для ЛЭП ВН);}$$

$$I_{з} = \frac{U_{л} \cdot 35 \cdot L_{кл}}{350} = \frac{20 \cdot 35 \cdot 10}{350} = 20 \text{ А;}$$

Требуемое сопротивление по НН $R_{з\text{у}2} \leq 4$ Ом на НН.

Принимается $R_{з\text{у}2} = 4$ Ом (наименьшее из двух).

Но так как $\rho > 100$ Ом·м, то для расчёта принимается

$$R_{з\text{у}} \leq 4 \cdot \frac{\rho}{100} = 12 \text{ Ом.}$$

3. Определяется количество вертикальных электродов: без учёта экранирования (расчётное)

$$N'_{г.р} = \frac{r_{г}}{R_{з\text{у}}} = 9,75. \text{ Принимается } N'_{г.р} = 10;$$

с учётом экранирования

$$N_{e.p} = \frac{N'_{e.p}}{\eta_e} = 14,5. \text{ Принимается } N_e = 15.$$

По таблице 9.5 $\eta_e = F$ (тип ЗУ, вид заземления, $\frac{a}{L}$, N_e) (контурное, вертикальное, 2, 10) = 0,69.

4. Размещается ЗУ на плане (рисунок 9.1) и уточняются расстояния, наносятся на план.

Так как контурное ЗУ закладывается на расстоянии не менее 1 м, то длина по периметру закладки равна

$$L_n = (A+2) \cdot 2 + (B+2) \cdot 2 = 62 \text{ м.}$$

Тогда расстояние между электродами уточняется с учётом формы объекта. По углам устанавливаются по одному вертикальному электроду, а оставшиеся – между ними.

Для равномерного распределения электродов окончательно принимается $N_e = 16$, тогда

$$a_B = \frac{B'}{n_B - 1} = 3,5 \text{ м}; \quad a_A = \frac{A'}{n_A - 1} = 4,25 \text{ м},$$

где a_B – расстояние между электродами по ширине объекта, м;

a_A – расстояние между электродами по длине объекта, м;

n_B – количество электродов по ширине объекта;

n_A – количество электродов по длине объекта.

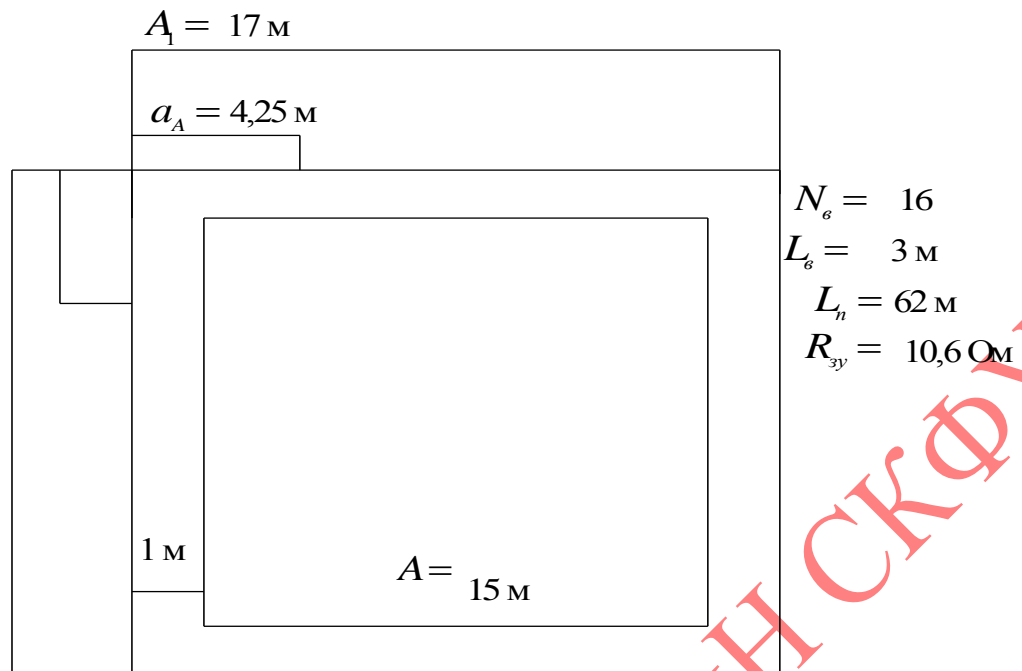


Рисунок 9.1 – План ЗУ подстанции

Для уточнения принимается среднее значение отношения

$$\left(\frac{a}{L_g}\right)_{cp} = \frac{1}{2} \left(\frac{a_B + a_A}{3}\right) = 1,3.$$

Тогда по таблице 9.5 уточняются коэффициенты использования

$$\eta_g = F(\text{конт.}; 1,3; 16) = 0,56; \text{ и } \eta_z = F(\text{конт.}; 1,3; 16) = 0,32.$$

5. Определяются уточнённые значения сопротивлений вертикальных и горизонтальных электродов

$$R_g = \frac{0,4}{L_n \cdot \eta_z} \cdot \rho \cdot K_{ces} \cdot lq \frac{2 \cdot L_n^2}{b \cdot t} = \frac{0,4}{62 \cdot 0,32} \cdot 300 \cdot 1,8 \cdot lq \frac{2 \cdot 62}{0,75 \cdot 0,7} = 54,2 \text{ Ом.}$$

По таблице 9.2 $K_{ces.2} = F(IV) = 1,8$.

$$R_g = \frac{r_g}{N_g \cdot \eta_g} = \frac{54,2}{16 \cdot 0,56} = 13,1 \text{ Ом}$$

6. Определяется фактическое сопротивление ЗУ

$$R_{zy} = \frac{R_g \cdot R_z}{R_g + R_z} = \frac{13,1 \cdot 54,2}{13,1 + 54,2} = 10,6 \text{ Ом;}$$

$$R_{zy}(10,6) < R_{zy}(12)$$

следовательно, ЗУ эффективно.

Вопросы к практическому занятию

1. Назначение защитного заземления.
2. Дать определение защитного заземления.
3. Принцип действия защитного заземления.
4. Типы заземляющих устройств.
5. Как выполняется заземляющее устройство.
6. Расчет защитного заземления.
7. Нормирования сопротивлений заземления.

Практическое занятие № 10

Расчет заземляющего устройства подстанции 35/10 кВ

Цель работы и теоретические сведения смотри практическое занятие № 9

Пример 1 Рассчитать заземляющее устройство подстанции 35/10 кВ, находящейся во второй климатической зоне. Сети 35 и 10 кВ работают с незаземленными нейтралями. На стороне 35 кВ $I_3 = 8$ А, на стороне 10 кВ $I_3 = 25$ А. Собственные нужды подстанции получают питание от трансформатора 10/0,4 кВ с заземленной нейтралью на стороне 0,4 кВ. Естественных заземлителей нет. Удельное сопротивление земли при нормальной влажности $\rho = 86$ Ом • м. Оборудование подстанции занимает площадь 18х8 м.

Решение

Сопротивление заземляющего устройства для установок 10 — 110 кВ при использовании его одновременно для установки с. н. напряжением до 1 кВ

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{8} = 15,6 \text{ Ом}; R_3 \leq \frac{125}{25} = 5 \text{ Ом}$$

Сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора на стороне 0,4 кВ согласно [12] должно быть не более 4 Ом.

Таким образом, последнее требование является определяющим для расчета: $R_3 \leq 4$ Ом.

Заземляющее устройство выполняем в виде контура из полосы 40х4 мм, проложенной на глубине 0,7 м вокруг оборудования подстанции на расстоянии 2 м от внутренней стороны ограды.

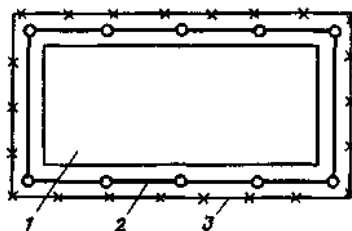


Рисунок 10.1 – План заземляющего устройства
 1 — площадь, занятая оборудованием (18 x 8 м²); 2 — заземляющий контур (20 x 10 м); 3 — ограждение подстанции

Таблица 10.1 – Коэффициенты использования вертикальных заземлителей, размещенных по контуру без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между заземлителями	Число вертикальных заземлителей n_v	η_v	Отношение расстояния между заземлителями	Число вертикальных заземлителей n_v	η_v
1	4	0,66-0,72	2	20	0,61-0,66
	6	0,58-0,65		40	0,55-0,61
	10	0,52-0,58		60	0,52-0,58
	20	0,44-0,5		4	0,84-0,86
	40	0,38-0,44		6	0,78-0,82
	60	0,36-0,42		10	0,74-0,78
2	4	0,76-0,8	3	20	0,68-0,73
	6	0,71-0,75		40	0,64-0,69
	10	0,66-0,71		60	0,62-0,67

Общая длина полосы 60 м (рисунок 10.1). Сопротивление заземляющей полосы

$$r_2 = \frac{0,366 \cdot \rho_{расч}}{l} \cdot lq \frac{2 \cdot l^2}{d \cdot t} = \frac{0,366 \cdot 3 \cdot 86}{8} \cdot lq \frac{2 \cdot 60^2}{40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7} = 8,7 \text{ Ом}$$

где: $\rho_p = K_c \cdot \rho = 3 \cdot 86 = 264 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ K_c определен [7].

Предварительно принимая в контуре 10 вертикальных заземлителей, для $a/l = 1$ находим коэффициент использования полосы $\eta_n = 0,34$, тогда сопротивление полосы в заземлителей

$$R_2 = r_2 / \eta_n = 8,7 / 0,34 = 25,6 \text{ Ом}$$

Необходимое сопротивление вертикальных заземлителей

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_{иск}}{R_2 - R_{иск}} = \frac{25,6 \cdot 4}{25,6 - 4} = 4,7 \text{ Ом}$$

где $R_{иск} = R_3$, так как естественные заземлители отсутствуют. Количество вертикальных заземлителей

$$\eta_6 = \frac{r_6 \cdot R_3}{R_6 \cdot \eta} = \frac{24,4}{24,4 \cdot 0,57} = 9,13$$

где сопротивление одного вертикального заземлителя (стержня длиной 5 м, диаметром 12 мм² при) $\rho_p = K_c \cdot \rho = 1,25 \cdot 86 = 108 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

$$r_6 = \frac{0,366 \cdot 108}{5} \cdot \left(lq \frac{2 \cdot 5}{12 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \cdot lq \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 24,4 \text{ Ом};$$

Принимаем в контуре 10 вертикальных заземлителей.

Вопросы к практическому занятию

1. В каких электроустановках необходимо выполнять защитное заземление?
2. Чем отличаются естественные заземлители от искусственных?
3. Что применяется в качестве естественных заземлителей?
4. Как уменьшить напряжение прикосновения на территории ОРУ?
5. Перечислите защитные меры в электроустановках.
6. Объясните физическую сущность выравнивания потенциалов, защиту от перехода напряжения с высокой стороны на низкую.

Практическое занятие №11

Статистический метод расчета заземления

Цель работы: получить представление о заземляющих устройствах; ознакомиться с методами расчета заземляющих устройств в электроустановках напряжением 110/10 кВ статистическим методом.

Теоретическая часть

Согласно ПУЭ заземляющие устройства электроустановок выше 1 кВ сети с эффективно заземленной нейтралью выполняются с учетом сопротивления $\leq 0,5$ Ом или допустимого напряжения прикосновения.

Расчет по допустимому сопротивлению $\leq 0,5$ Ом приводит к неоправданному перерасходу проводникового материала и трудозатрат при сооружении заземляющих устройств для подстанций контуре из 10 небольшой площадью, не имеющих естественных заземлителей. Ток, протекающий через человека в распределительных устройствах 110 кВ и выше, позволяет перейти к нормированию напряжения прикосновения, а не величины R_3 . Обоснованием этого служат следующие соображения. В момент прикосновения человека к заземленному оборудованию, находящемуся под потенциалом, часть сопротивления заземлителя шунтируется сопротивлением тела человека R_q и сопротивлением растеканию тока от ступеней в землю R_c . На тело человека фактически будет действовать напряжение

$$U_q = U_{np} - U_{cm},$$

где: $U_{cm} = I_q \cdot U_c$ – падение напряжения в сопротивлении растеканию с двух ступеней человека в землю.

Если принять ступню за диск радиусом 8 см, то

$$R_c = \frac{\rho_{вс}}{2 \cdot 4 \cdot r} = \frac{\rho_{вс}}{8 \cdot 0,08} = 1,5 \rho_{вс}$$

где: $\rho_{вс}$ – удельное сопротивление верхнего слоя земли, Ом·м; r – радиус ступни, м. Ток, протекающий через человека.

$$I_{ч} = \frac{U_{np} - U_{см}}{R_{ч}}$$

Опасность поражения зависит от тока и его длительности протекания через тело человека. Согласно нормам допустимый ток определяется так:

Длительность воздействия, с ...	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0
Допустимый ток, мА	500	250	100	75	65

Зная допустимый ток, можно найти допустимое напряжение прикосновения:

$$U_{np} \leq I_{ч} \cdot R_{ч} + U_{с}$$

Подставляя, значения $U_{с}$ и $R_{с}$ получаем,

$$U_{np} \leq I_{ч} \cdot R_{ч} + 1,5 \cdot I_{ч} \cdot \rho_{вс}$$

Так, например, если $R_{ч} = 1000$ Ом, удельное сопротивление верхнего слоя почвы $\rho_{в,с} = 1000$ Ом·м, время воздействия тока 0,5 с, то, найдя $I_{ч.дон} = 100$ мА = 0,1 А, определим $U_{np} \leq 0,1 \cdot 1000 + 1,5 \cdot 0,1 \cdot 1000 = 250$ В

Из величины допустимых напряжений прикосновения видно, что чем больше $\rho_{в,с}$, тем большее напряжение прикосновения можно допустить. Приняв некоторую среднюю величину $\rho_{в,с}$, можно рекомендовать для расчетов приведенные ниже допустимые напряжения прикосновения :

Длительность воздействия, с	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1–3
Наибольшее допустимое напряжение прикосновения, В.....	500	400	200	130	100	65

За расчетную длительность воздействия $\tau_{в}$ принято

$$\tau_{в} = t_{pz} + t_{отк.в}$$

где t_{pz} — время действия релейной защиты.

Для рабочих мест, где персонал прикасается к заземленным частям при оперативных переключениях, принимается время действия резервной защиты, для остальных мест — время действия основной защиты; $t_{откв}$ — полное время отключения выключателя.

Заземляющее устройство, выполненное по нормам напряжения прикосновения, должно обеспечить в любое время года ограничение U_{np} до нормированного значения в пределах всей территории подстанции, а напряжение на заземляющем устройстве U_3 должно быть не выше 10 кВ. Если $U_3 > 5 \div 10$ кВ, необходимо принять меры по защите изоляции отходящих кабелей и предотвращению выноса высокого потенциала за пределы электроустановки.

Заземляющее устройство для установок 110 кВ и выше выполняется из вертикальных заземлителей, соединительных полос, полос, проложенных вдоль рядов оборудования, и выравнивающих полос, проложенных в поперечном направлении и создающих заземляющую сетку с переменным шагом. Расстояние между полосами должно быть не более 30 м.

Рекомендуются различные методы расчета сложных заземлителей. Учет многочисленных факторов, влияющих на растекание тока с заземлителей, усложняет расчет. В проектных организациях он производится по специально составленной программе на ЭВМ. Ниже рассмотрен упрощенный метод расчета.

Сложный заземлитель заменяется расчетной квадратной моделью (рисунок 11.1 б) при условии равенства их площадей S , общей длины горизонтальных проводников, глубины их заложения t , числа и длины вертикальных заземлителей и глубины их заложения.

В реальных условиях удельное сопротивление грунта неодинаково по глубине. Как правило, верхние слои имеют большее удельное сопротивление, а нижние, увлажненные слои — меньшее сопротивление. В расчетах многослойный грунт представляется

двухслойным: верхний толщиной h_1 с удельным сопротивлением ρ_1 , нижний с удельным сопротивлением ρ_2 . Величины ρ_1 , ρ_2 , h_1 принимаются на основе замеров с учетом сезонного коэффициента k_c .

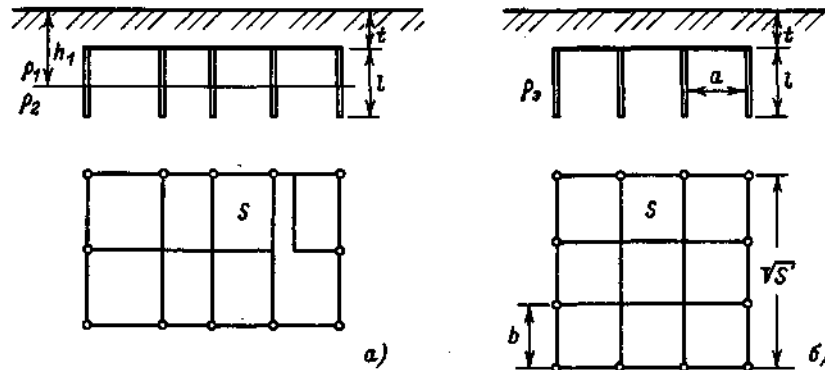


Рисунок 11.1 – К расчету сложных заземлителей:

a — заземляющее устройство подстанции; b - расчетная модель

Расчет производится в следующем порядке:

1. Зная наибольшее допустимое напряжение прикосновения, определяем напряжение на заземлителе:

$$U_3 = \frac{U_{np.дон}}{K_n}$$

где K_n – коэффициент напряжения прикосновения; для сложных заземлителей он определяется по формуле

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_g \cdot L_c}{a \cdot \sqrt{S}} \right)^{0,45}}$$

где l_g – длина вертикального заземлителя, м; L_c – длина горизонтальных заземлителей, м; a – расстояние между вертикальными заземлителями, м; S – площадь заземляющего устройства, m^2 ; M – параметр, зависящий от ρ_1/ρ_2 следующим образом:

ρ_1/ρ_2	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10
M	0,36	0,5	0,62	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,8	0,82

ρ – коэффициент, определяемый по сопротивлению тела человека R_u и сопротивлению растекания тока от ступней R_c :

$$\beta = \frac{R_u}{R_u + R_c}$$

В расчетах принимают $R_u = 1000 \text{ Ом}$; $R_c = 1,5 \cdot p$.

2. Так как $U_3 = I_3 \cdot R_3$, то сопротивление заземляющего устройства должно быть, Ом,

$$R_{3, \text{дон}} \leq \frac{U_3}{I_3}$$

где I_{np}^1 – ток, стекающий с заземлителя проектируемого заземляющего устройства при однофазном КЗ.

Если однофазное КЗ произошло в пределах электроустановки, то

$$I_3 = I_{n,o}^1 \cdot \left(1 - \frac{x_0}{x_{T1}} \right)$$

где $I_{n,o}^1$ – ток однофазного КЗ в месте повреждения;

x_0 – результирующее индуктивное сопротивление нулевой последовательности до места КЗ;

x_{T1} — сопротивление нулевой последовательности трансформаторов рассматриваемой электроустановки.

Если однофазное КЗ произошло за пределами электроустановки, то

$$I_3 = I_{n,o}^1 \cdot \frac{x_0}{x_{T1}}$$

3. Определяют общее сопротивление естественных заземлителей, Ом

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_{каб}} + \frac{1}{R_{\phi}} + \frac{1}{R_{c,m,o}}}$$

где $R_{каб}$ – сопротивление растеканию тока кабелей; $R_{ф}$ – сопротивление растеканию тока фундаментов; $R_{с,м,о}$ – сопротивление растеканию тока системы трос – опоры.

Если $R_e < R_{з,дон}$ то сооружается только сетка из горизонтальных полос, если $R_e > R_{з,дон}$ то необходимо сооружение искусственного заземлителя.

4. Определяют общее сопротивление сложного заземлителя, преобразованного в расчетную модель, Ом:

$$R_з = A \cdot \frac{\rho_з}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_з}{L_г + L_г}$$

где $A = \left(0,444 - 0,84 \cdot \frac{l_г + t}{\sqrt{S}} \right)$ при $0 \leq \frac{l_г + t}{\sqrt{S}} \leq 0,1$

$A = \left(0,385 - 0,25 \cdot \frac{l_г + t}{\sqrt{S}} \right)$ при $0,1 \leq \frac{l_г + t}{\sqrt{S}} \leq 0,5$

$\rho_з$ — эквивалентное удельное сопротивление земли, Ом·м; $L_г$ — общая длина вертикальных заземлителей.

Полученное значение $R_з$ должно быть меньше $R_{з,дон}$ или $R_{иск}$.

Если сопротивление заземлителя превышает требуемые значения, то необходимо увеличение площади S , длины $L_г$, числа вертикальных заземлителей $n_г$ и их длины. Все это приводит к дополнительным расходам и на подстанциях трудно осуществимо. Эффективной мерой уменьшения опасности прикосновения является подсыпка гравия или щебня слоем 0,1 – 0,2 м у рабочих мест. Удельное сопротивление верхнего слоя при этом резко возрастает (5000 – 10000 Ом·м), что снижает ток, проходящий через человека, так как возрастает сопротивление растеканию тока со ступней R_c .

В расчете соответственно уменьшается коэффициент β и увеличивается допустимое сопротивление заземляющего устройства.

Заземляющее устройство может выполняться с соблюдением требований к его сопротивлению. В этом случае в любое время года с учетом естественных заземлителей должно быть $R_3 < 0,5 \text{ Ом}$.

В таких заземляющих устройствах для выравнивания потенциала прокладываются продольные и поперечные полосы на глубине 0,5-0,7 м и на расстоянии от фундаментов или оснований оборудования 0,8 – 1 м. Расстояние между поперечными полосами рекомендуется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки, но не более 20 м.

Пример 1 Рассчитать заземляющее устройство для КТП 110/6 кВ площадью $12 \cdot 20 \text{ м}^2$; $\rho_1 = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (с учетом промерзания); $h_I = 2 \text{ м}$; $\rho_2 = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $t = 0,7 \text{ м}$; $l_g = 5 \text{ м}$; $t_{pz} = 0,12 \text{ с}$; $t_{омк,в} = 0,08 \text{ с}$; ток, стекающий с заземлителей подстанции при однофазном КЗ на рассматриваемой подстанции, $I_3 = 1,9 \text{ кА}$. Естественных заземлителей нет.

Решение.

Для $\tau_g = 0,12 + 0,08 = 0,2 \text{ с}$ находим $U_{np,доп} = 40^\circ \text{ В}$.

Коэффициент прикосновения

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_g \cdot L_2}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,806 \cdot 0,57}{\left(\frac{5 \cdot 125}{5 \cdot \sqrt{15 \cdot 20}}\right)^{0,45}} = 0,18$$

здесь $M = 0,806$ при $\rho_1 / \rho_2 = 500 / 60 = 8,3$;

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot \rho_{вс}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 500} = 0,57$$

Таблица 11.1 – Относительное эквивалентное удельное сопротивление для сеток с вертикальным заземлителем ρ_3/ρ_2

ρ_1/ρ_2	a/l_B	Относительная толщина слоя $(h-t)/l_a$						
		0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	0,95
1	1-4	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1,02	1,03	1,05	1,1	1,13	1,3	1,4
	2	1,03	1,03	1,09	1,13	1,15	1,32	1,5
	4	1,05	1,13	1,15	1,17	1,2	1,38	1,6
5	1	1,05	1,1	1,15	1,22	1,35	1,86	2,4
	2	1,22	1,26	1,35	1,43	1,54	2,12	2,7
	4	1,33	1,41	1,5	1,65	1,83	2,6	3,5
10	1	1,1	1,2	1,28	1,38	1,62	2,5	3,7
	2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,75	5,5
	4	1,52	1,7	1,88	2,08	2,33	3,52	6
0,125	0,5-4	0,95	0,9	0,8	0,7	0,62	0,54	0,52
0,25	0,5-4	0,97	0,93	0,85	0,78	0,71	0,65	0,64
0,5	0,5-4	0,99	0,96	0,92	0,88	0,83	0,79	0,77

$L_r = 125$ м по плану.

Потенциал на заземлителе

$$U_3 = \frac{U_{np.\dot{d}on}}{K_n} = \frac{400}{0,18} = 2222 \text{ В}$$

что в пределах допустимого (меньше 10 кВ).

Сопротивление заземляющего устройства

$$R_{3,\dot{d}on} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{2222}{1900} = 1,23 \text{ Ом}$$

Действительный план заземляющего устройства, преобразуем в расчетную квадратную модель со стороной

$$\sqrt{S} = \sqrt{15 \cdot 20} = 15,5$$

Число ячеек по стороне квадрата

$$m = \frac{L_2}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1 = \frac{125}{2 \cdot 15,5} = 3,03$$

принимаем $m = 3$

Длина полос в расчетной модели

$$L_2' = 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m+1) = 2 \cdot 15,5 \cdot 4 = 124 \text{ м}$$

Длина сторон ячейки

$$b = \frac{15,5}{3} = 5,17 \text{ м}$$

Число вертикальных заземлителей по периметру контура при $a/l_g = 1$

$$n_g = \frac{\sqrt{S} \cdot 4}{l_g} = \frac{15,5 \cdot 4}{5} = 12,4$$

принимая $n_g = 12$.

Общая длина вертикальных заземлителей

$$L_g = l_g \cdot n_g = 5 \cdot 12 = 60 \text{ М}$$

Относительная глубина тогда $\frac{l_g + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,368 > 0,1$

$$A = \left(0,385 - 0,25 \cdot \frac{l_g + t}{\sqrt{S}} \right) = 0,385 - 0,25 \cdot \frac{5 + 0,7}{15,5} = 0,293$$

Для $\rho_1 / \rho_2 = 8,3$; $a/l_B = 1$;

$$\frac{h_1 - t}{l_g} = \frac{2 - 0,7}{5} = 0,26$$

Определяем $\rho_3 / \rho_2 = 1,4$, тогда $\rho_3 = 1,4 \cdot \rho_2 = 1,4 \cdot 60 = 84 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Общее сопротивление сложного заземлителя

$$R_3 = A \cdot \frac{\rho_3}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_3}{L_2 + L_g} = 0,293 \cdot \frac{84}{15,5} + \frac{84}{124 + 60} = 2,044 \text{ Ом}$$

что больше допустимого $R_{3,доп} = 1,23 \text{ Ом}$.

Найдем напряжение прикосновения:

$$U_{np} = K_n \cdot I_3 \cdot R_3 = 0,18 \cdot 1900 \cdot 2,044 = 699 \text{ В},$$

что больше допустимого значения 400 В.

Необходимо принять меры для снижения U_{np} путем расширения заземляющего устройства за пределы подстанции или путем использования естественных заземлителей.

Допустим, что на подстанции могут быть использованы естественные заземлители системы троллей — опоры линии 110 кВ общим сопротивлением 2 Ом, тогда общее сопротивление заземляющего устройства подстанции

$$R'_3 = \frac{R_3 \cdot R_e}{R_3 + R_e} = \frac{2,044 \cdot 2}{2,044 + 2} = 1,01 \text{ Ом}$$

что меньше $R_{3,\text{доп}} = 1,23 \text{ Ом}$.

Напряжение прикосновения

$$U_{np} = K_n \cdot I_3 \cdot R'_3 = 0,18 \cdot 1900 \cdot 1,01 = 345 \text{ В},$$

что меньше допустимого значения 400 В.

Возможен другой путь уменьшения U_{np} . Применим подсыпку слоем гравия толщиной 0,2 м в рабочих мест. Удельное сопротивление верхнего слоя (гравия) в этом случае будет $\rho_{B,C} = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тогда

$$\beta' = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 3000} = 0,18$$

$$K_n = \frac{M \cdot \beta}{\left(\frac{l_6 \cdot L_e}{a \cdot \sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,806 \cdot 0,18}{\left(\frac{5 \cdot 125}{5 \cdot \sqrt{15 \cdot 20}}\right)^{0,45}} = 0,057$$

Подсыпка гравием не влияет на растекание тока с заземляющего устройства, так как глубина заложения заземлителей 0,7 м больше толщины слоя гравия, поэтому соотношение ρ_1/ρ_2 и значение M остаются неизменными.

$$U_3 = \frac{400}{0,057} = 7017 \text{ В}$$

что меньше допустимого (10 кВ).

$$R'_{3,\text{доп}} = \frac{7017}{1900} = 3,69 \text{ Ом};$$

таким образом, $R_3 = 2,044 \text{ Ом} < R'_{3,\text{доп}} = 3,69 \text{ Ом}$.

Напряжение прикосновения

$$U_{np} = K_n^1 \cdot I_3 \cdot R_3 = 0,057 \cdot 1900 \cdot 2,044 = 221 \text{ В}$$

что меньше допустимого 400 В.

Из расчета видно, как эффективна подсыпка гравием на территории подстанции.

Определим наибольший допустимый ток, стекающий с заземлителей подстанции при однофазном КЗ:

$$I_{з\max} = \frac{U_{\text{пр.доп}}}{K_n \cdot R_3} = \frac{400}{0,057 \cdot 2,044} = 3433 \text{ А}$$

При больших токах необходимо снижение R_3 за счет учащения сетки полос или дополнительных вертикальных заземлителей.

Вопросы к практическому занятию

1. В каких электроустановках необходимо выполнять защитное заземление?
2. Чем отличаются естественные заземлители от искусственных?
3. Что применяется в качестве естественных заземлителей?
4. Как уменьшить напряжение прикосновения на территории ОРУ?
7. Перечислите защитные меры в электроустановках.
8. Объясните физическую сущность выравнивания потенциалов, защиту от перехода напряжения с высокой стороны на низкую.

Таблица 11.7 – Варианты заданий

№ вар	t м	ρ_1 Ом	ρ_2 Ом	l м	r_{on} Ом	$I_{к1}$ А	$I_{к2}$ А	$I_{к3}$ А
1	0,8	230	80	250	10	5	40	30
2	0,7	220	75	245	11	4,5	35	25
3	0,6	210	70	240	12	4	30	20
4	0,8	230	70	235	13	5	35	25
5	0,7	210	75	230	14	4,5	40	30
6	0,6	230	80	225	15	4	35	25
7	0,8	220	75	220	10	4,5	30	20
8	0,7	210	80	215	11	5	35	25
9	0,6	230	70	210	12	5,5	40	30
10	0,6	220	75	230	15	4	35	25

Литература

1. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов. / Под ред. проф. Э.А. Арустамова – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2013 – 448 с.
2. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. Матрюков Б. М., изд-во Академия, 2012, 304 с.
3. Сапронов Ю.Г., Сыса А.Б. Шахбазян В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 320 с.
4. Бондин В.И., Семехин Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Инфра-М, АкадемЦентр, 2011, 352 с.
5. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / Мар.гос.ун-т; И.Г. Воробьева. – Йошкар-Ола, 2011. – 276 с.
6. Графкина М.В., Нюнин Б. Н., Михайлов В.А. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во: Форум, Инфра-М, 2013, 416 с.
7. Казаков Н.П. Якубовская Н.А. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия., 2011, 240 с.
8. Каракеян В.И., Никулина И.М. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Юрайт, 2012, 464 с.
9. Косолапова Н.В., Прокопенко Н.А., Побежимова Е.Л. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 288 с.
10. Сапронов Ю.Г., Сыса А.Б. Шахбазян В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 320 с.
18. Сапронов Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 336 с.
19. Сапронов Ю.Г. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во Академия, 2012, 336 с.
20. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Седьмое издание. - М.: Изд. "НЦ ЭНАС", 2002.

21. Безопасность жизнедеятельности. учебник для студентов высших учебных заведений. / [Л.А. Михайлов, В.М Губанов, В.П. Соломин и др.]; под ред. Л.А. Михайлова. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 272 с.
22. Губанов, В.П. Соломин и др.]; под ред. Л.А. Михайлова. –М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 272 с.
23. Лобачев А.И.Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов. – М.: Юрайт - Издат, 2008. – 360 с.
24. Абрамов В.В. Безопасность жизнедеятельности. Изд-во СПбГУП, 2010, 456 с.
25. Басаков М.И. Охрана труда (безопасность жизнедеятельности в условиях производства): Учебно-практическое пособие. – Москва: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2003. – 400 с.
26. Девисилов В.А. Охрана труда. Изд-во: Форум, 2010, 512 с.
27. Карнаух Н.Н. Охрана труда. Изд-во: Юрайт, 2011, 384 с.
28. <http://www.alleng.ru/d/saf/saf13.htm>.–Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие под ред. Э. А. Арустамова, 2006 .
29. Скляр Н.Е., Рузныев Е.С. Электробезопасность. Учебное пособие для студентов по курсу “электробезопасность”. М.: Академия. 2008г.–168с.
30. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Справочно-методическое пособие по изучению и применению «Межотраслевых правил по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок» ПОТ РМ-016-2001 (с изменениями и дополнительными материалами). Девятое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТ «ЭлектроСервис», 2009 -224 с.
31. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Опасность поражения человека электрическим током и порядок оказания первой помощи при несчастных случаях на производстве: Практическое руководство. – Десятое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 -84 с.

32. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 1. Общие требования. Основная защита. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с.
33. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 2. Защита при косвенном прикосновении. Дополнительная защита. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с.
34. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Виды защит, обеспечивающие безопасность эксплуатации электроустановок (в трех частях). Часть 3. Защита при нарушении режимов работы ЭУ. Справочное пособие. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2010 - 108с.
35. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Инструктивные материалы по оказанию первой помощи при поражении человека электрическим током и других несчастных случаях на производстве. Практическое руководство. – Шестое издание, испр. и дополн. – СПб.: НОУ ДПО «УМИТЦ «ЭлектроСервис», 2009. - 36с.
36. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок: Справочник. – СПб.: Политехника, 2005. – 400с.
27. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. - М.: "Знак", 2005.
28. Безопасность жизнедеятельности. Производственная безопасность и охрана труда / Под ред. Кукина П.П.-М.: Высш. шк., 2006. – 380 с.

Классификация электрических сетей

Системы электрических сетей классифицируются по **ГОСТ 505712-94 (МЭК-364-3-93)**. Для классификации используются две буквы, указывающие характер заземления:

первая буква – указывает характер заземления нейтрали источника;

вторая буква – указывает характер заземления открытых проводящих нетоковедущих частей электроустановок (корпуса).

В обозначении используются начальные буквы французских слов:

T (terre) – заземлено;

N (neutre) – занулено (присоединено к нейтрали источника питания);

I (isole) – изолировано.

Выделяются три системы сетей: *TT*, *IT*, *TN*.

1) *TT* – нейтраль источника и корпуса электроприемников заземлены;

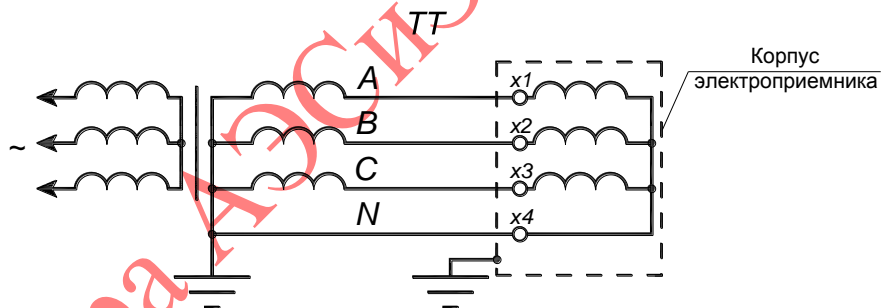


Рисунок А 1

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 110 кВ и выше.

Примечание. В примерах в качестве источников показаны вторичные обмотки трансформаторов. На практике источниками питания могут служить также обмотки генераторов.

2) *IT* – нейтраль источника изолирована, а корпуса электроприемников заземлены;

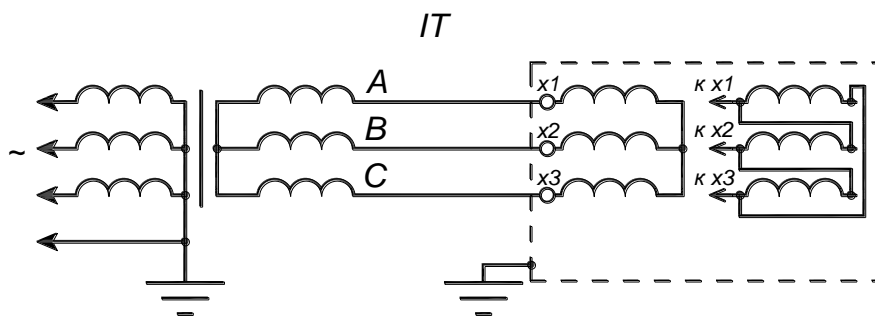


Рисунок А 2

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 6, 10, 35 кВ.

3) *TN* – нейтраль источника заземлена, а корпуса электроприемников занулены.

Схема *TN* имеет 3 модификации в зависимости от устройства нулевого рабочего и нулевого защитного проводников.

Схема *TN-C* (common) – функция нулевого рабочего (*N*) и нулевого защитного (*PE*) проводников объединены в одном проводнике, который называется *PEN*.

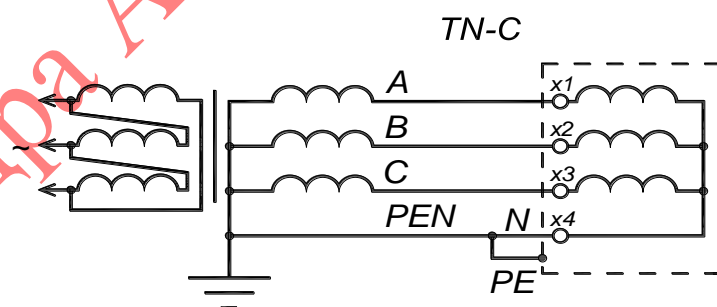


Рисунок А 3

Схема *TN-S* (select) – функция нулевого рабочего и нулевого защитного проводников обеспечивается отдельными проводниками, соответственно *N* и *PE*.

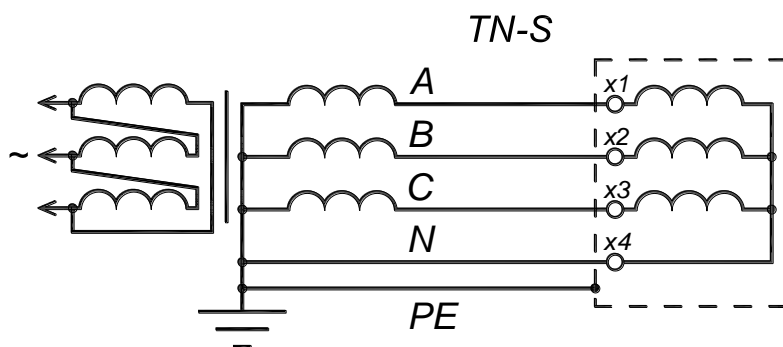


Рисунок А 4

Схема *TN-C-S* – нулевые проводники на головных участках объединены в проводник *PEN*, а далее разделены на проводники *N* и *PE*.

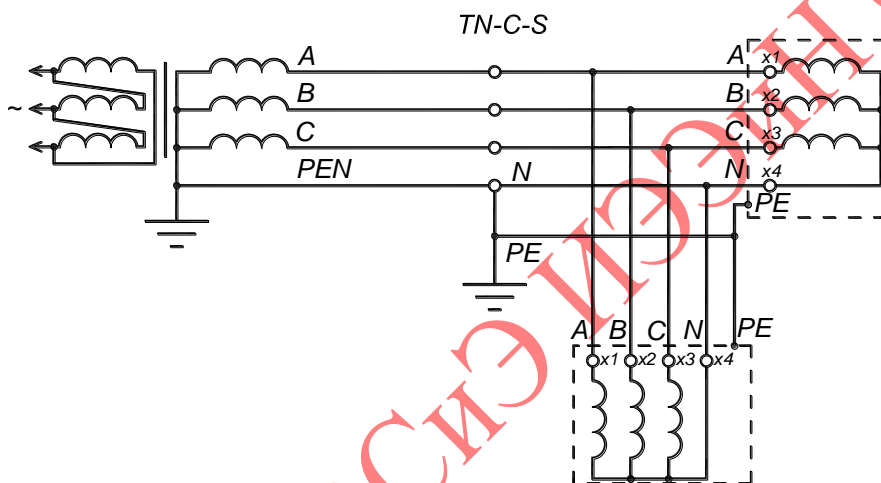


Рисунок А5

На территории России по такой системе выполняются электрические сети напряжением 0,4 кВ.

Применение УЗО в электроустановках различных систем заземления

1 Защита в электроустановках системы *TT*

В системе *TT* все открытые проводящие части электроустановки присоединены к заземлению, электрически независимому от заземлителя нейтрали источника питания.

ГОСТ Р 50669-94 предписывает применение системы *TT* как основной в случае подключения указанных электроустановок к вводно-распределительным устройствам соседнего (капитального) здания.

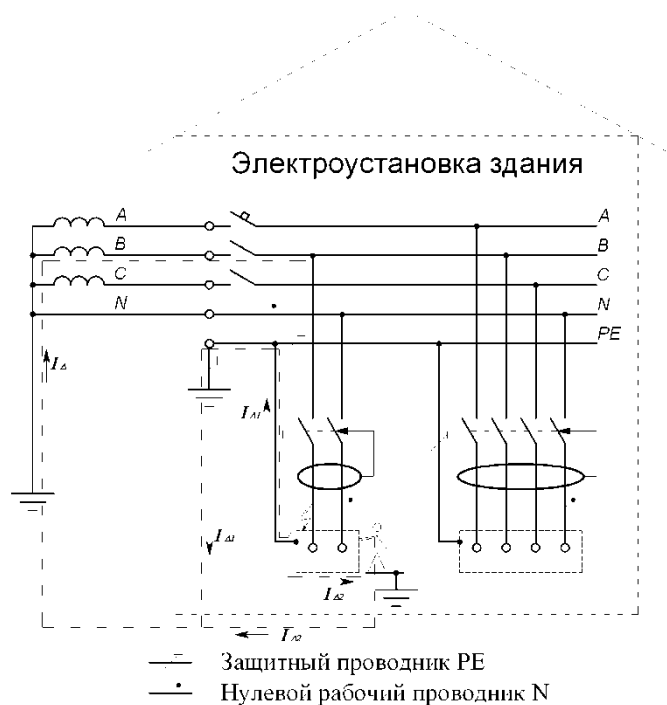


Рисунок Б 1

В стандарте ГОСТ Р 50571.3-94 п. 413.1.4 указано, что в системе *TT* устройства защиты от сверхтока (автоматические выключатели, предохранители) могут использоваться для защиты от косвенного прикосновения только в электро-установках, имеющих заземляющие устройства с очень малым сопротивлением. При этом гарантированное

отключение питания электроустановки должно производиться при появлении на открытых проводящих частях электроустановки напряжения не более 50 В.

В реальных условиях осуществить автоматическое отключение питания электроустановки системы *TT* с помощью автоматических выключателей по ряду причин (необходимости обеспечения большой кратности тока короткого замыкания, низкого сопротивления заземляющего устройства и др.) весьма проблематично. Эффективное решение проблемы автоматического отключения питания дает только применение УЗО.

В п. 1.7.59 ПУЭ (7-е изд.) содержится требование обязательного применения УЗО для обеспечения условий электробезопасности в системе *TT*. При этом уставка (номинальный отключающий дифференциальный ток) должна быть меньше значения тока замыкания на заземленные открытые проводящие части при напряжении на них 50 В относительно зоны нулевого потенциала.

Это означает, что в электроустановках индивидуальных жилых домов, коттеджей, дачных (садовых) домов и других частных сооружений, где не всегда имеется возможность выполнить заземлитель с требуемыми нормами параметрами, необходимо применять систему *TT* с обязательной установкой УЗО. В этом случае требования к значению сопротивления заземлителя значительно снижаются.

Таблица Б 1 – Допустимые значения сопротивления заземления

Сопротивление заземления R_z, Ом	5000	1666	500	166	100
Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta n}$, мА	10	30	100	300	500

2 Защита в электроустановках системы TN

Электроустановки системы TN-C

В электроустановках системы TN все открытые проводящие части электроустановок должны быть присоединены к заземленной нейтральной точке источника питания посредством защитных проводников. Основное условие электробезопасности системы TN состоит в том, чтобы значение тока при коротком замыкании между фазным проводником и открытой проводящей частью превышало величину тока срабатывания защитного устройства за нормированное время.

В случае использования в качестве защитного устройства УЗО значение тока короткого замыкания следует заменить на значение номинального отключающего дифференциального тока устройства $I_{\Delta n}$. При этом задача обеспечения низкого значения сопротивления "фаза-ноль", которую надо решать при использовании защиты от сверхтока, заменяется на проверку работоспособности УЗО и защитного проводника. Контроль сопротивления цепи "фаза-ноль" следует производить только на входных зажимах УЗО.

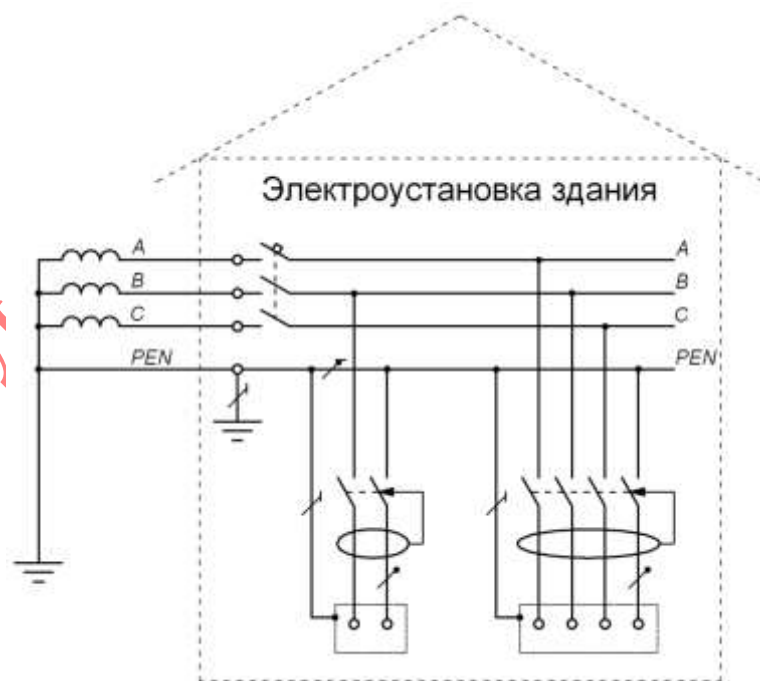


Рисунок Б 2

Самой используемой разновидностью системы TN является система $TN-C$. В качестве защитного проводника при этом используется проводник PEN , который одновременно выполняет функции рабочего и нулевого защитного проводника.

В ПУЭ 7-го издания имеется указание: "Не допускается применять УЗО, реагирующее на дифференциальный ток, в четырехпроводных трехфазных цепях (система $TN-C$). В случае необходимости применения УЗО для защиты отдельных электроприемников, получающих питание от системы $TN-C$, защитный PE проводник электроприемника должен быть подключен к PEN проводнику цепи, питающей электроприемник, до защитно-коммутационного аппарата".

Это означает, что как исключение для защиты отдельных электроприемников ПУЭ допускают применение УЗО в системе $TN-C$, при соблюдении определенных условий - подсоединения открытых проводящих частей электроприемников к PEN - проводнику со стороны источника питания по отношению к УЗО.

Электроустановки системы $TN-S$

Более современной и в большинстве случаев более безопасной является система $TN-S$, где используется самостоятельный нулевой защитный проводник PE и нулевой рабочий проводник N , которые прокладываются отдельно, начиная от вывода источника питания. Эта система уже долгое время используется в телекоммуникационных сетях (при этом исключаются помехи в слаботочных сетях, образующиеся при протекании части рабочего тока в земле в сети системы $TN-C$). Применение УЗО обязательно, кроме оговоренных особых случаев (например, цепи питания пожарной сигнализации).

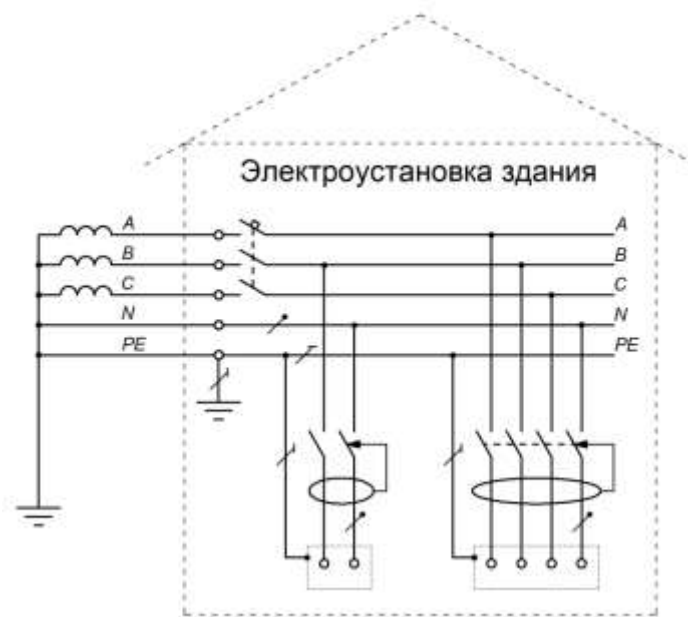


Рисунок Б 3

Электроустановки системы *TN-C-S*

При разделении, например в групповом щитке, в электроустановке системы *TN* проводника *PEN* на отдельные проводники *PE* и *N* образуется система *TN-C-S*. При этом, как в сети системы *TN-S*, проводники *PE* и *N* должны прокладываться раздельно, а их соединение после точки раздела недопустимо. Данная система в настоящее время - основная, которую можно выполнить в отдельной части электроустановки при проведении реконструкции.



Рисунок Б 4

3 Защита в электроустановках системы *IT*

В электроустановках системы *IT* источник питания должен быть изолирован от земли или связан с ней посредством подключения к нейтрали достаточно большого сопротивления. В сети имеется определенное активное сопротивление и емкость по отношению к земле, которые представляют собой путь для тока утечки или тока замыкания на землю.

В системе *IT* значение тока замыкания на землю определяется состоянием изоляции сети относительно земли. При хорошем состоянии изоляции (высоком сопротивлении относительно земли) ток замыкания на землю очень мал. В случае прямого прикосновения человека к токоведущим частям электроустановки ток через тело человека также определяется сопротивлением изоляции и при сопротивлении изоляции выше определенного значения не представляет опасности для жизни. Таким образом, уровень сопротивления изоляции является в системе *IT* фактором, определяющим как надежность, так и электробезопасность ее эксплуатации, поэтому очень важно поддерживать сопротивление изоляции на высоком уровне, а ведение автоматического постоянного контроля изоляции должно быть обязательным электрозащитным мероприятием.

Кафедра



Рисунок Б 5

Применение УЗО в системе *IT* регламентируется ПУЭ 7-го издания следующим образом (п. 1.7.58): "...В таких электроустановках для защиты при косвенном прикосновении при первом замыкании на землю должно быть выполнено защитное заземление в сочетании с контролем изоляции сети или применены УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА".

В электроустановках системы *IT* устройства контроля изоляции подают сигнал при первом замыкании на землю. Если до устранения первого замыкания происходит второе замыкание на землю, то происходит срабатывание УЗО.

Основное требование при использовании УЗО - устанавливать его необходимо как можно ближе к электроприемнику. Одновременное функционирование устройств контроля изоляции и УЗО не оказывает влияния на работу каждого из этих устройств.

ПРАКТИКУМ

по дисциплине «Электробезопасность» для студентов

Направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профили подготовки: «Электроснабжение»,

«Электроэнергетические системы и сети»,

«Релейная защита и автоматизация

электроэнергетических систем»

Составители: Мустафаев Х. М., Маслов В.В.

Редактор:

Формат 60x84 1/16.	Подписано в печать	Уч.-изд. л. – 5,0.
Бумага газетная.	Усл. п. л. – 4,69.	Тираж 50 экз.
	Печать офсетная.	Заказ
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»		
355029, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1		

Издательство Северо-Кавказского федерального университета
Отпечатано в типографии СКФУ