

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. Е. Кажекин

Безопасность в электротехнике

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический
материал по изучению дисциплины с практическими заданиями
для студентов магистратуры по направлению подготовки
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 631.371

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
Н.В. Бочарова

Кажекин, И. Е.

Безопасность в электротехнике: учеб.-методич. пособие – локальный электронный методический материал по изучению дисциплины с практическими заданиями для студ. магистратуры по направлению подгот. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / **И. Е. Кажекин**. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 74 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины представлен тематический план дисциплины, методические рекомендации по изучению каждой темы, а также вопросы для самостоятельной работы. Список литературы – 3 наименования

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 31.05.2023 г., протокол № 09

УДК 631.371

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Кажекин И.Е., 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Содержание дисциплины	6
2 Методические указания по изучению дисциплины	62
3 Типовые индивидуальные задания для самостоятельной работы	63
4 Перечень вопросов для самопроверки	71
5 Контроль освоения дисциплины	72
Заключение	72
Библиографический список	73

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Безопасность в электротехнике» входит в состав основной профессиональной образовательной программы магистратуры по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Целью изучения дисциплины является формирование систематизированных знаний, умений и навыков в области современных электротехнических систем, являющихся основой для решения профессиональных задач в этой области.

В результате изучения дисциплины «Безопасность в электротехнике» студент должен:

Знать: основные опасности при работе с электрооборудованием различных уровней напряжения.

Уметь: выполнять требования охраны труда по эксплуатации и ремонту объектов профессиональной деятельности.

Владеть: навыками обеспечения защиты силовых электроустановок.

Дисциплина изучается в течение второго курса.

Контроль текущей успеваемости осуществляется по результатам выполнения тестовых заданий, а также заданий по темам практических занятий. У студентов очной формы обучения учитывается помимо этого выполнение и защита лабораторных работ.

По итогам выполнения тестовых заданий оценка выставляется по пятибалльной шкале в следующем порядке при правильных ответах на:

- 85–100 % заданий – оценка «5» (отлично);
- 70–84 % заданий – оценка «4» (хорошо);
- 51–69 % заданий – оценка «3» (удовлетворительно);
- менее 50 % – оценка «2» (неудовлетворительно).

По итогам практических занятий выставляется оценка «зачтено» при успешном выполнении задания и «не зачтено» - при неуспешном.

Промежуточная аттестация у студентов заочной формы осуществляется по результатам выполнения контрольной работы в виде зачетов в третьем и четвертом семестрах; у студентов очной формы промежуточная аттестация в виде зачетов в третьем и четвертом семестрах осуществляется по результатам текущего контроля успеваемости.

В учебно-методическом пособии содержатся:

- перечень тем, изучаемых в дисциплине;
- указания по изучению дисциплины;
- методические указания по выполнению самостоятельной работы;
- библиографический список;
- сведения о контроле освоения дисциплины.

В зависимости от формы обучения освоение каждой из тем может длиться от двух часов (заочная форма обучения) до четырех часов (очная форма обучения) аудиторных занятий.

1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Одиночные заземлители

Форма занятия: лекция и практическое занятие

Вопросы для обсуждения:

1. Шаровый заземлитель на большой глубине.
2. Шаровый заземлитель возле поверхности земли.
3. Стержневой заземлитель.
4. Определение сопротивления з электростатической аналогии.

Методические материалы к лекционным занятиям

Если в качестве заземлителя используется один электрод, то такой заземлитель называется одиночным. Процессы стекания тока, а, следовательно, и математические выражения для расчета параметров одиночного заземления наиболее просты. Кроме того, одиночные заземлители являются составляющими более сложных групповых заземлителей.

Ток, проходящий через заземлитель в землю, преодолевает сопротивление, называемое сопротивлением растеканию тока. Оно имеет три слагаемых:

- сопротивление самого заземлителя;
- переходное сопротивление между заземлителем и грунтом;
- сопротивление грунта.

Стекание тока в землю происходит только через проводник, находящийся с нею в непосредственном контакте: случайном или преднамеренном.

При этом одиночный проводник или группа соединенных между собой проводников, находящихся в преднамеренном контакте с землёй, называется соответственно одиночным заземлителем или заземлителем.

Причинами стекания тока в землю являются: замыкание токоведущей части на заземленный корпус электрического оборудования; падение провода

на землю; использование земли в качестве провода и т.п. Во всех этих случаях происходит резкое снижение потенциала относительно земли.

Стеkanie тока в землю сопровождается возникновением некоторых потенциалов на заземлителе, и земле вокруг заземлителя, а, следовательно, и на поверхности земли.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 1.1. Ток $I_3 = 100$ А стекает в землю через металлический предмет неправильной формы, который может быть условно уподоблен шару радиусом $r = 0,5$ м. Предмет погружен в землю на глубину 3 м; ток к нему подается по изолированному проводу. Удельное сопротивление земли $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Требуется определить потенциал на металлическом трубопроводе, проложенном в земле на глубине $Z_2 = 4$ м и на расстоянии по горизонтали от центра шара $x = 3$ м.

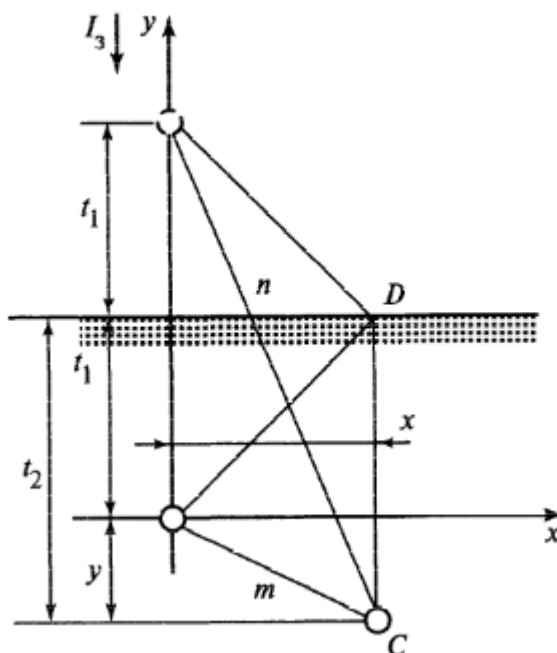


Рисунок 1.1 – Пояснения к решению задачи 1.1.

Пример решения

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:

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{4\pi x},$$

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_d и φ_{ϕ} , В, создаваемых в этой точке полями токов, стекающих как с действительного, так и с фиктивного заземлителей, В (см. рисунок выше):

С учетом приведенного выше уравнения можно записать:

$$\varphi_c = \frac{I_3 \rho}{4\pi m} + \frac{I_3 \rho}{4\pi n} = \frac{I_3 \rho}{4\pi} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right),$$

где m и n — расстояния от центров действительного и фиктивного заземлителей до трубопровода (точки С), м.

Задача 1.2. С металлического шара радиусом $r = 0,5$ м, погруженного в землю на глубину $l = 3$ м, стекает ток $I = 80$ А, который подается к шару по изолированному проводу .

Требуется определить потенциал на поверхности земли в точке D на расстоянии $x = 3$ м от вертикали, проходящей через центр шара, и потенциал заземлителя (шара). Удельное сопротивление земли 90 Ом м.

Пример решения:

Потенциал на поверхности земли в точке D:

$$\varphi_a = \frac{I * \rho}{2 * \pi * \sqrt{x^2 + l^2}}$$

Потенциал заземлителя (шара):

$$\varphi_3 = \frac{I * \rho}{4 * \pi * r} * \left(1 + \frac{r}{2 * l} \right)$$

Тема 2. Простые групповые заземлители

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Вопросы для обсуждения:

1. Распределение потенциала на поверхности земли.
2. Сопротивление группового заземлителя растеканию тока.

Методические материалы к лекционным занятиям

По условиям безопасности сопротивления заземления должны быть относительно малыми. Принципиально обеспечить такое сопротивление можно путем увеличения геометрических размеров одиночного заземлителя (электрода) или использования нескольких параллельно соединенных электродов. Такой заземлитель называется групповым. Расчеты показывают, что выполнение групповых заземлителей во много раз экономичнее по затратам металла и монтажным работам. Кроме того, при использовании нескольких заземлителей можно выровнять потенциальную кривую на территории, где они размещаются, что имеет также большое значение в обеспечении безопасности обслуживающего персонала. Поэтому на практике применяют в преобладающем большинстве групповые заземлители.

При больших расстояниях между электродами группового заземлителя (более 40 м) поля растекания токов вокруг них не взаимодействуют, и ток каждого электрода проходит по «своему» отдельному участку земли, по которому не проходят токи других заземлителей.

При малых расстояниях между электродами группового заземлителя (менее 40 м) поля растекания тока накладываются друг на друга. В результате увеличивается сопротивление земли на общих участках, и сопротивления, как отдельных электродов, так и группового заземлителя возрастают. Степень увеличения сопротивления растеканию одиночных заземлителей в составе

группового характеризуется коэффициентом использования проводимости группового заземлителя (коэффициентом экранирования).

Обычно групповой заземлитель выполняется в виде вертикальных стержневых электродов, соединенных между собой горизонтальным полосовым электродом. При таком устройстве группового заземлителя возникает взаимодействие полей растекания тока вертикальных заземлителей не только между собой, но и с полями горизонтальных электродов.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 2.1. Ток 60 А стекает в землю через групповой заземлитель, состоящий из трех соединенных между собой одинаковых стержневых электродов диаметром $d = 0,05$ м. Стержни забиты в землю на глубину 2 м и размещены в вершинах равностороннего треугольника, земля однородная, ее удельное сопротивление 100 Ом м.

Требуется определить потенциал группового заземлителя и коэффициент использования его проводимости для двух случаев: при расстоянии между центрами электродов 2 м и 10 м.

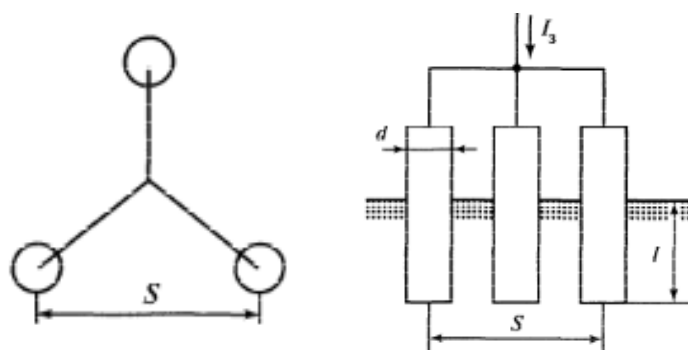


Рисунок 2.1 – Схема к задаче 2.1

Задача 2.2. Два одинаковых стержневых заземлителя (электрода) круглого сечения забиты в землю вертикально на всю их длину. Расстояние между их центрами $S = 5$ м. Электроды соединены между собой проводником, с

каждого из них в землю стекает ток 5 А. Длины электродов $Z = 5$ м; диаметры электродов $d = 0,05$ м; земля однородная, ее удельное сопротивление 100 Ом м; длина шага человека $a = 0,8$ м.

Требуется определить потенциалы электродов, их сопротивления стеканию тока, а также максимальные значения напряжений прикосновения и шага для человека, находящегося между электродами на прямой, соединяющей их центры.

Пример решения:

Радиус заземлителя:

$$r = \frac{d}{2}$$

Сопротивление растеканию тока одиночного заземлителя:

$$R_0 = \frac{\rho}{2 * \pi * r}$$

Сопротивление группового заземлителя:

$$R_3 = \frac{R_0}{2}$$

Собственный потенциал одиночного электрода:

$$\varphi_0 = I_0 * R_0$$

Потенциал группового заземлителя:

$$\varphi_{гр} = \varphi_0 + \frac{\varphi_0 * r}{S - r}$$

Напряжение прикосновения:

$$U_{пр} = I_3 * \rho * \frac{\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x}\right)}{2 * \pi}$$

Напряжение шага:

$$U_{\text{ш}} = I_3 * \rho * \frac{\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right)}{2 * \pi}$$

Лабораторная работа «Определение зависимостей, характеризующих явления при стекании тока в землю через защитный заземлитель»

Цель работы:

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

Тема 3. Анализ опасности поражения током в электрических сетях

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Ключевые вопросы темы:

1. Основные термины и определения.
2. Анализ опасности поражения током в однофазных электрических сетях.
3. Анализ опасности поражения током в трехфазных электрических сетях.

Методические материалы к лекционным занятиям

Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) определено понятие “Электроустановка”.

Электроустановкой принято называть совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями), предназначенных для производства, преобразования, трансформации, распределения электрической энергии и преобразования ее в другие виде энергии.

Все электроустановки по условиям электробезопасности подразделяются на:

- электроустановки напряжением до 1 кВ с заземленной нейтралью;
- электроустановки напряжением 1кВ с изолированной нейтралью;

- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю);
- электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю).

Термином “питающие электрические сети” обозначается составная часть системы, включающая источник электроэнергии и питающие линии.

Питающие сети различаются по типам:

- систем токоведущих проводников;
- систем заземления.

Существуют следующие типы систем токоведущих проводников переменного тока:

- однофазные двухпроводные;
- однофазные трехпроводные;
- двухфазные трехпроводные;
- двухфазные пятипроводные;
- трехфазные четырехпроводные;
- трехфазные пятипроводные.

Системы заземления могут быть следующих типов: TN-S, TN-C, TN-C-S, IT, TT.

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 приведенном определении использовался ряд терминов.

Нейтраль – общая точка обмоток генераторов или трансформаторов, питающих сеть; напряжения на выходных зажимах источника электроэнергии, измеренные относительно нейтрали, равны.

Глухозаземленная нейтраль источника электроэнергии – нейтраль генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока напряжением до 1 кВ, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

Изолированная нейтраль – нейтраль генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока напряжением до 1 кВ, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

Проводящие части – части, которые могут проводить электрический ток.

Токоведущие части – проводники или проводящие части, предназначенные для работы под напряжением в нормальном режиме, включая нулевой рабочий проводник.

Открытые проводящие части – доступные прикосновению проводящие части электроустановки, нормально не находящиеся под напряжением, но которые могут оказаться под напряжением при повреждении основной изоляции.

Нулевой проводник – это проводник, соединенный с глухозаземленной нейтралью, предназначенный либо для питания потребителей электроэнергии, либо для присоединения к открытым проводящим частям.

Нулевой рабочий проводник (N – проводник) – нулевой проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, предназначенный для питания электроприемников.

Нулевой защитный проводник (PE – проводник) – нулевой проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, предназначенный для присоединения к открытым проводящим частям с целью обеспечения электробезопасности.

Классификация и схемы электрических систем с напряжением до 1000 В.

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

Система TN-S – система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении.

Система TN-C-S – система TN, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника электроэнергии.

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. В этом случае защитный заземляющий проводник обозначается так же, как и нулевой защитный проводник, т.е. PE – проводник.

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.

Поскольку целью настоящей главы является анализ электробезопасности собственно различных типов электрических сетей, предназначенных для питания потребителей электроэнергии, то для удобства изложения материала в дальнейшем будем пользоваться терминами типа “сеть TN-S” и т.д., которые означают совокупность источника электроэнергии с определенным режимом заземления нейтрали и питающей линии с определенной системой токоведущих проводников, например, сеть TN-C означает совокупность источника электроэнергии с глухозаземленной нейтралью и трехфазной четырехпроводной питающей линии.

Все случаи поражения человека током в результате электрического удара, т.е. прохождения тока через человека, являются следствием его прикосновения не менее чем к двум точкам электрической цепи, между которыми существует некоторое напряжение. Опасность такого прикосновения, оцениваемая, как известно, током, проходящим через тело человека или напряжением прикосновения, под которым он оказывается, зависит от ряда факторов: схемы включения человека в электрическую цепь; напряжения сети; схемы самой

сети; режима ее нейтрали; степени изоляции токоведущих частей от земли, а также емкости токоведущих частей относительно земли и т.п.

Таким образом, опасность поражения неоднозначна: в одних случаях включение человека в электрическую цепь сопровождается прохождением через него малых токов и окажется неопасным, в других токи могут достигать больших значений, способных вызвать смертельное поражение человека.

Далее определим значения напряжения прикосновения и тока, протекающего через человека, в зависимости от перечисленных выше факторов. Эти параметры необходимо знать для оценки электрической сети по условиям техники безопасности; выбора и расчета соответствующих мер защиты, в частности, заземления, зануления, защитного отключения, устройств контроля изоляции сети и др. При этом во всех случаях, кроме особо оговоренных, будем считать, что сопротивление основания, на котором стоит человек (грунт, пол и пр.), а также сопротивление его обуви незначительны и поэтому приняты равными нулю.

При прямом прикосновении схемы включения человека в цепь тока могут быть различными. Наиболее характерны две схемы включения: между двумя фазами электрической сети и между одной фазой и землей.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 3.1. Человек, стоя на земле (на токопроводящем основании), прикоснулся к одному из проводов однофазной двухпроводной сети, изолированной от земли, в период замыкания провода на землю.

Напряжение сети (между проводами) $U = 660$ В; сопротивление изоляции проводов относительно земли (до замыкания провода на землю) 30 кОм; сопротивление замыкания провода на землю 60 Ом; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом.

Требуется определить ток, прошедший через тело человека, в двух случаях:

- 1) человек касается провода при отсутствии замыкания на землю;
- 2) человек касается провода с неповрежденной изоляцией при замыкании на землю.

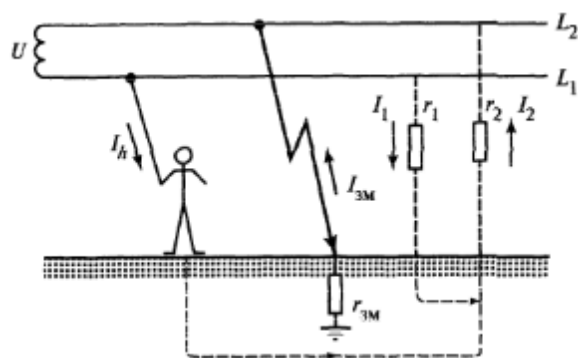


Рисунок 3.1 – Схема к задаче 3.1

Задача 3.2.

Человек прикоснулся к заземленному проводу однофазной двухпроводной сети в точке *b*, а затем в точке *c*.

Напряжение сети (между проводами) $U = 220$ В; сопротивление тела человека 1000 Ом; суммарная длина обоих проводов $L = 100$ м; провода медные сечением $S = 10$ мм²; удельное сопротивление меди 0.017 Ом·мм /м; длина участка *a*—*b* заземленного провода 30 м; потеря напряжения, установленная при выборе проводов сети во время проектирования (сооружения), 5% ; активная мощность, потребляемая двигателем, $P = 18$ кВт; сопротивление заземления провода 4 Ом; коэффициент мощности электродвигателя, питающегося от рассматриваемой сети, $\cos \phi = 0,8$.

Требуется определить значение тока, прошедшего через человека, при:

- 1) нормальной работе сети;
- 2) замыкании между проводами.

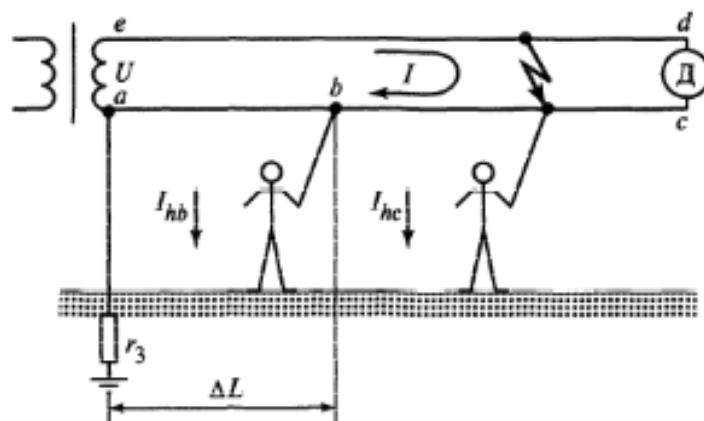


Рисунок 3.2 – Схема к задаче 3.2

Пример решения:

Напряжение на двигателе с учётом потерь:

$$U_B = U * (1 - \alpha)$$

Номинальный ток сети:

$$I_H = \frac{P}{U_B * \cos\varphi}$$

Сопротивление участка a-b:

$$R_{ab} = \rho * \frac{L_{ab}}{S}$$

Сопротивление участка a-c:

$$R_{ac} = \rho * \frac{L}{2 * S}$$

Падение напряжения на участке a-b:

$$U_{ab} = I_H * R_{ab}$$

Падение напряжения на участке a-c:

$$U_{ac} = I_H * R_{ac}$$

Ток, проходящий через тело человека, прикоснувшегося к сети в точке b:

$$I_{hb} = \frac{U_{ab}}{R_{ч}}$$

Ток, проходящий через тело человека, прикоснувшегося к сети в точке c:

$$I_{hc} = \frac{U_{ac}}{R_{ч}} = \frac{9,15}{1000}$$

При коротком замыкании сопротивление каждого провода:

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

Ток короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{U}{R} = \frac{220}{0,17}$$

Напряжение прикосновения в точке b:

$$U_{hb} = I_{кз} * R_{ab}$$

Напряжение прикосновения в точке c:

$$U_{hc} = I_{кз} * R_{ac}$$

Ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к сети в точке b:

$$I_{hb} = \frac{U_{hb}}{R_{ч}}$$

Ток, проходящий через человека, прикоснувшегося к сети в точке с:

$$I_{hc} = \frac{U_{hc}}{R_{ч}}$$

Лабораторная работа «Определение влияния режима электрической сети и её нейтрали на условия электробезопасности»

Цель работы:

Оценить опасность поражения электрическим током в зависимости от:

- а) напряжения и схемы питания электроустановок;
- б) режима нейтрали;
- в) сопротивления элементов электрической сети;
- г) условий включения человека в цепь.

Тема 4. Электрическое поле промышленной частоты

Форма занятия: Лекция и практическое занятие

Ключевые вопросы темы:

1. Источники электромагнитных излучений
2. Влияние электромагнитных полей на организм человек
3. Биологическое действие электромагнитных полей
4. Параметры электромагнитных полей, влияющие на биологическую реакцию
5. Последствия действия электромагнитных полей для здоровья человека

Методические материалы к лекционным занятиям

Электромагнитное поле – это особая форма материи, представляющая собой взаимосвязанные электрическое и магнитное поля. На практике для

характеристики электромагнитной обстановки используют термины "электрическое поле", "магнитное поле", "электромагнитное поле".

Электрическое поле создается зарядами, а его величина характеризуется напряженностью (E , единица измерения В/м).

Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику. Оно характеризуется напряженностью магнитного поля (H , единица измерения А/м) и магнитной индукцией (B , единица измерения Тл – Тесла).

Физические причины существования электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле порождает магнитное поле, а изменяющееся магнитное поле - вихревое электрическое поле: обе компоненты, непрерывно изменяясь, возбуждают друг друга. ЭМП неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц, ЭМП "отрывается" от них и существует независимо в форме электромагнитных волн, не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

Основными источниками электромагнитных полей являются:

- системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии;
- транспорт на электроприводе: железнодорожный и его инфраструктура; городской – метро, троллейбус, трамвай;
- функциональные передатчики: радиостанции, телевизионные передатчики, системы сотовой связи, системы мобильной радиосвязи, спутниковая связь, радиорелейная связь, радиолокационные станции и т.п.;
- технологическое оборудование различного назначения, использующее сверхвысокочастотное излучение, переменные и импульсные магнитные поля;
- медицинские терапевтические и диагностические установки;
- средства визуального отображения информации на электроннолучевых трубках (мониторы, телевизоры);

- промышленное оборудование на электропитании;
- электробытовые приборы.

Экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности электромагнитных полей во всех частотных диапазонах. При относительно высоких уровнях облучающего электромагнитного поля современная теория признает тепловой механизм воздействия. При относительно низком уровне электромагнитного поля (к примеру, для радиочастот выше 300 МГц это менее 1 мВт/см²) принято говорить о нетепловом или информационном характере воздействия на организм. Механизмы действия электромагнитного поля в этом случае еще мало изучены

Варианты воздействия ЭМП на биосистемы, включая человека, разнообразны: непрерывное и прерывистое, общее и местное, комбинированное от нескольких источников и сочетанное с другими неблагоприятными факторами среды и т.д.

На биологическую реакцию влияют следующие параметры ЭМП:

- интенсивность ЭМП (величина);
- частота излучения;
- продолжительность облучения;
- модуляция сигнала;
- сочетание частот ЭМП;
- периодичность действия.

Сочетание вышеперечисленных параметров может давать существенно различающиеся последствия для реакции облучаемого биологического объекта.

Многочисленные исследования в области биологического действия электромагнитных полей (ЭМП) позволяют определить наиболее чувствительные системы организма человека:

- нервная,
- иммунная,
- эндокринная,

- половая.

Эти системы организма являются критическими. Реакции этих систем должны обязательно учитываться при оценке риска воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на население.

Биологический эффект ЭМП в условиях длительного многолетнего воздействия накапливается, в результате возможно развитие отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы центральной нервной системы, рак крови (лейкозы), опухоли мозга, гормональные заболевания.

Особо опасны ЭМП могут быть для детей, беременных женщин (эмбрион), людей с заболеваниями центральной нервной, гормональной, сердечно-сосудистой систем, аллергиков, людей с ослабленным иммунитетом.

Результаты клинических исследований показали, что длительный контакт с ЭМП в СВЧ диапазоне может привести к развитию заболеваний, клиническую картину которого определяют, прежде всего, изменения функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Было предложено выделить самостоятельное заболевание - радиоволновая болезнь. Это заболевание, по мнению авторов, может иметь три синдрома по мере усиления тяжести заболевания:

- астенический синдром;
- астено-вегетативный синдром;
- гипоталамический синдром.

Наиболее ранними клиническими проявлениями последствий воздействия электромагнитного излучения на человека являются функциональные нарушения со стороны нервной системы, проявляющиеся прежде всего в виде вегетативных дисфункций неврастенического и астенического синдрома. Лица, длительное время находившиеся в зоне электромагнитного излучения, предъявляют жалобы на слабость, раздражительность, быструю утомляемость, ослабление памяти, нарушение сна. Нередко к этим симптомам присоединяются расстройства вегетативных функций. Нарушения со стороны сердечно-сосудистой системы проявляются,

как правило, нейроциркуляторной дистонией: лабильность пульса и артериального давления, склонность к гипотонии, боли в области сердца и др. Отмечаются также фазовые изменения состава периферической крови (лабильность показателей) с последующим развитием умеренной лейкопении, нейropении, эритроцитопении. Изменения костного мозга носят характер реактивного компенсаторного напряжения регенерации. Обычно эти изменения возникают у лиц, по роду своей работы постоянно находившихся под действием электромагнитного излучения с достаточно большой интенсивностью. Работающие с магнитными и электромагнитными полями, а также население, живущее в зоне действия ЭМП жалуются на раздражительность, нетерпеливость. Через 1-3 года у некоторых появляется чувство внутренней напряженности, суетливость. Нарушаются внимание и память. Возникают жалобы на малую эффективность сна и на утомляемость.

Учитывая важную роль коры больших полушарий и гипоталамуса в осуществлении психических функций человека, можно ожидать, что длительное повторное воздействие предельно допустимых электромагнитных излучений (особенно в дециметровом диапазоне волн) может привести к психическим расстройствам.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 4.1. Человек, находящийся вблизи действующей электроустановки, оказывается в области создаваемого ею электрического поля, которое при определенной интенсивности вредно для здоровья людей. Вместе с тем, электрическое поле обуславливает возникновение электрического тока, стекающего в землю через тело человека и также являющегося отрицательным фактором.

Вредное воздействие на здоровье людей ограничивается предельно допустимыми уровнями напряженности электрического поля. В то же время, для оценки степени влияния электрического поля следует проводить расчет тока, проходящего через человека.

Рост человека (подростка) $a = 1,2$ м; масса тела подростка 43 кг; плотность тела человека (среднее значение) $1,05$ г/см³.

Требуется рассмотреть частный случай — определить значение тока, стекающего в землю через тело человека (подростка), находящегося вблизи воздушной линии электропередачи (ВЛ) сверхвысокого напряжения, где напряженность электрического поля на уровне роста этого человека достигает $E=15$ кВ/м; решение надо выполнить, используя точное и приближенное значения коэффициента деполяризации эллипсоида N_a (получить два значения тока, проходящего через человека: точное и приближенное).

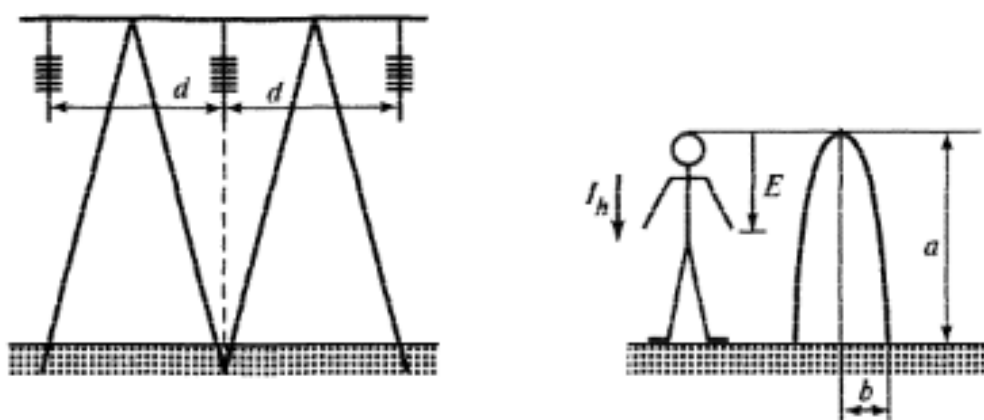


Рисунок 4.1 – Схема к задаче 4.1

Задача 4.2. Известно, что вблизи электроустановок промышленной частоты (50 Гц) сверхвысокого и ультравысокого напряжения — 330 кВ и выше (воздушных линий электропередачи, подстанций, распределительных устройств и др.) возникает интенсивное электрическое поле, вредное для здоровья людей. Поэтому существующие нормы ограничивают длительность пребывания людей в электрическом поле в зависимости от его напряженности и от категории людей (персонал, обслуживающий электроустановки; сельскохозяйственный персонал; население). При необходимости нахождения людей в электрическом поле напряженностью E выше допустимого значения или большей продолжительности, чем предусмотрено нормами, требуется применение защитных средств — экранирующих костюмов, экранов и др.

Допустим, в открытом распределительном устройстве 500 кВ предстоит плановая работа на ряде участков с повышенной напряженностью E электрического поля. Работа

будет проводиться без применения защитных средств — экранов, экранирующих костюмов и пр.

Продолжительность работы зависит от ее объема и составляет:

60 мин на участке 1, где $E = 10$ кВ/м;

90 мин на участке 2, где $E = 8$ кВ/м.

Требуется вычислить наибольшее допустимое время выполнения работ для третьего участка, где $E = 6$ кВ/м, имея в виду, что приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту времени пребывания человека в электрическом поле, не должно превышать 8 ч в течение рабочего дня.

Пример решения:

Время t предельно допустимого пребывания человека в зоне действия электрического поля вычисляется по формуле:

$$T_{\text{доп}} = \frac{20}{E} - 1$$

Тогда продолжительность работы человека на участке с напряженностью $E = 6$ кВ/м будет равно:

$$T_{\text{доп}} = \frac{20}{6} - 1 = 2,3 \text{ ч} = 140 \text{ мин}$$

Тема 5. Работы под напряжением свыше 1000 В

Форма занятия: Лекция и практическое занятие

Ключевые вопросы темы:

1. Порядок производства работ в электроустановках напряжением выше 1000 В.
2. Выполнение работ под напряжением в электроустановках разных классов напряжения: методы, средства защиты.

Методические материалы к лекционным занятиям

Работы в электроустановках напряжением выше 1 000 В в отношении мер безопасности разбиваются на три категории:

а) при полном снятии напряжения с установки;

б) при частичном снятии напряжения с установки:

За безопасность производства работ в целом, за квалификацию ответственного руководителя работ, производителя работ или наблюдающего, допускающего, а также лиц, включенных в состав бригады, отвечает лицо, выдающее наряд, отдающее устное телефонное распоряжение.

Лицо, выдающее наряд, отдающее устное телефонное распоряжение должно иметь квалификацию группы V.

Производителями работ в установках напряжением выше 1 000 в могут назначаться лица, имеющие квалификацию не ниже группы IV. По окончании работы производитель работ проверяет ее выполнение, наблюдает, чтобы его бригадой были убраны материалы, инструмент, приспособления и электроустановка подготовлена к включению, а затем производитель работ участвует в закрытии наряда.

Наблюдающий назначается для надзора при производстве работ за строительными рабочими и прочими лицами, не обученными производству работ в электроустановках напряжением выше 1 000 в, и отвечает за безопасность работающих только в электрической части. При работах с частичным снятием напряжения, а также при работах вблизи или на токоведущих частях, находящихся под напряжением, наблюдающим назначается лицо с квалификацией не ниже группы IV, в остальных случаях не ниже группы III.

Допускающий производит подготовку отключения всех частей электроустановки и выполнение прочих технических мероприятий согласно выданному на данную работу наряду. Он должен знать схему электроустановки и иметь ясное представление о том, какими операциями и в какой последовательности должно быть достигнуто необходимое отключение при подготовке рабочего места и восстановление питания по окончании работ.

Возникают аварийные ситуации, когда участок электроустановки, электрической сети требуется вывести в ремонт для устранения неисправности,

но по определенным причинам это сделать невозможно. Например, обнаружено нарушение контактного соединения на линии напряжением 750 кВ.

Данная линия является очень ответственной и может питать значительную часть энергосистемы в пределах нескольких областей страны. Если в данный момент нет возможности запитать энергосистему от резервной линии, то единственным вариантом устранения неисправности является выполнение работ под напряжением, то есть без предварительного отключения линии электропередач.

Также работа под напряжением в электроустановках рассматривается как один из современных методов обслуживания электроустановок. Вывод участков электроустановок, в частности воздушных линий электропередач – это достаточно трудоемкий процесс, особенно если это очень важная магистральная линия, отключение которой невозможно согласовать в течение года.

В данном случае проведение ремонтных или профилактических работ без снятия напряжения значительно экономит время, требуемое на согласование производимых работ и выполнения мероприятий по выводу в ремонт линии электропередач.

Известны следующие методы проведения работ под рабочим напряжением электроустановки и соответствующие каждому методу средства защиты ремонтного персонала от поражения электрическим током.

Первый метод – работа непосредственно под потенциалом провода, находящегося под напряжением, человек при этом надежно изолирован от земли. Технология работ под напряжением предусматривает работу человека стоя на изолированной подставке, изолированной рабочей площадке автокрана. Человек при этом находится в специальном экранирующем комплекте одежды. До начала подъема к токоведущим частям экранирующий костюм рабочего соединяется с изолированной рабочей площадкой.

Второй метод – работа с изоляцией человека от токоведущих частей, без изоляции человека от земли. Работы по данному методу выполняются с

применением изолирующих электрoзащитных средств, которые выбираются в соответствии с характером выполняемой работы и классом напряжения электроустановки.

Третий метод предусматривает изоляцию человека, производящего работы, как от земли, так и от токоведущих частей электроустановки, находящихся под рабочим напряжением. Наиболее распространенный пример — проведение работ в электрических цепях до 1000 В: распределительные щитки, шкафы релейной защиты и автоматики оборудования электроустановок.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 5.1. При подготовке к пофазному ремонту воздушной трехфазной линии электропередачи 35 кВ был отключен один из проводов (фаза) ВЛ, который подлежал ремонту. На этом проводе наводился электростатический потенциал от влияния двух оставшихся под напряжением проводов.

Опоры линии — П-образные с горизонтальным расположением проводов, без грозозащитных тросов; расстояние между соседними проводами на опоре $d = 3$ м; высота крепления проводов к гирлянде изоляторов $H_{\text{п}} = 12,09$ м; габарит линии (наименьшее расстояние по вертикали от провода до земли) = 7 м; взаимная емкость между проводами $C_{\text{ab}} = 1,9 \cdot 10^{-9}$ Ф/км; марка провода АС-150; расчетный радиус провода 0,85 см; сопротивление тела человека $R_{\text{h}} = 1000$ Ом. Требуется определить значения потенциала, напряжение прикосновения и ток, проходящий через тело человека при прикосновении его к отключенному проводу. Задачу следует решить в двух вариантах: 1) при длине отключенного провода $L_1 = 50$ км и 2) $L_2 = 0,24$ км (один пролет линии).

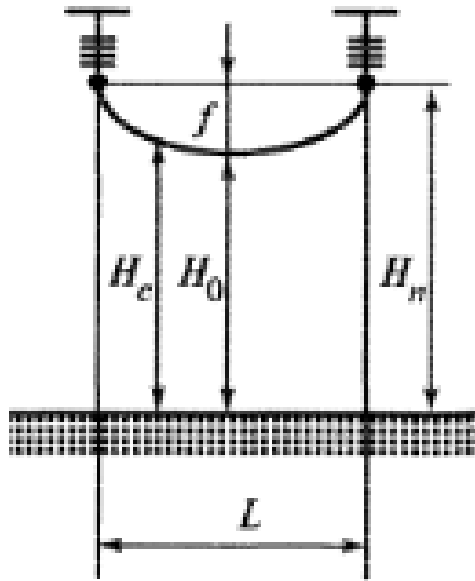


Рисунок 5.1 – Схема к задаче 5.1

Пример решения:

При длине отключенного провода $L_1 = 50$ км

$$d_{ab} = \sqrt[3]{2d^3} = \sqrt[3]{2 \cdot 3^3} = 3,78 \text{ м}$$

$$H = \frac{H_{\text{п}} + 2H_0}{3} = \frac{12,09 + 2 \cdot 7}{3} = 8,7 \text{ м}$$

$$D_{ab} = 2H = 2 \cdot 8,7 = 17,4 \text{ м}$$

$$\alpha_{b0} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2H}{r} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \ln \frac{2 \cdot 8,7}{0,0085} = 1,371 \cdot 10^{11}$$

$$\alpha_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{D_{ab}}{d_{ab}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \ln \frac{17,4}{3,78} = 2,746 \cdot 10^{10}$$

$$\Delta = \alpha_{b0}^2 - \alpha_{ab}^2 = 1,805 \cdot 10^{22}$$

$$C_{b0} = \frac{\alpha_{b0} - \alpha_{ab}}{\Delta} = \frac{1,371 \cdot 10^{11} - 2,746 \cdot 10^{10}}{1,805 \cdot 10^{22}} = 6,077 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$C_{ab} = \frac{\alpha_{ab}}{\Delta} = \frac{2,746 \cdot 10^{10}}{1,805 \cdot 10^{22}} = 1,522 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20,21 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Потенциал

$$\varphi = \frac{U_{\phi} \cdot C_{ab}}{C_{ab} + C_{b0}} = 4,047 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Напряжение прикосновение

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \omega \cdot C_f \cdot L \cdot R_h = 20,21 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 1,9 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 1000 = 602,783 \text{ В}$$

Ток через тело человека при прикосновении к отключенному проводу

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h} = 0,602 \text{ А}$$

При длине отключенного провода $L_2 = 0,24 \text{ км}$

Аналогично формулам, приведенным выше, напряжение прикосновение

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \omega \cdot C_f \cdot L \cdot R_h = 20,21 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 1,9 \cdot 10^{-9} \cdot 0,24 \cdot 1000 = 2,893 \text{ В}$$

Ток через тело человека при прикосновении к отключенному проводу

$$I_h = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h} = 0,00289 \text{ А}$$

Задача 5.2. Отключенный от источников питания и незаземленный один из проводов трехфазной воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением 110 кВ находится под электростатическим потенциалом 8,1 кВ, наведенным оставшимися в работе проводами. Взаимная емкость проводов $1,2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$; сопротивление тела человека $R_h = 1000 \text{ Ом}$.

Требуется оценить опасность прикосновения человека к этому проводу по значениям напряжения прикосновения и тока, проходящего через него. Задачу решить для двух случаев: при длине отключенного провода $L_1 = 100 \text{ км}$ и $L_2 = 1 \text{ км}$. Вычисление выполнить с учетом емкости провода относительно земли C_{b0} .

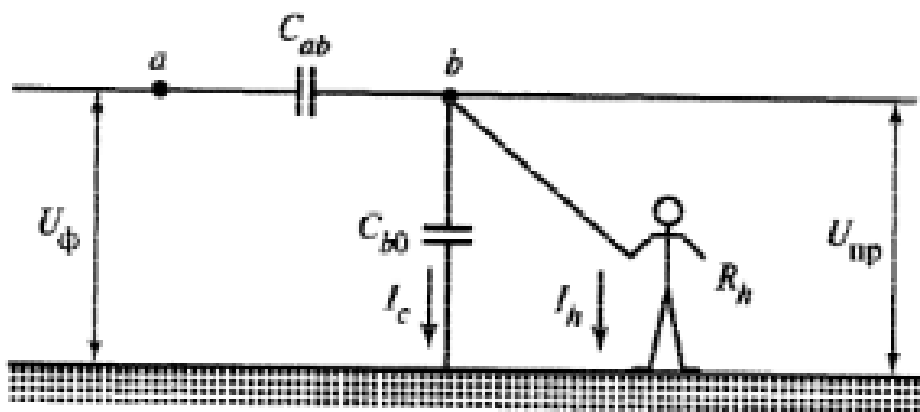


Рисунок 5.2 – Схема к задаче 5.2

Пример решения:

Емкость провода относительно земли определяется из формулы наведенного на отключенном проводе электростатического потенциала:

$$C_{b0} = \frac{U_{\phi} \cdot C_{ab}}{\varphi_{\phi}} - C_{ab} = 1,51 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{\text{кВ}}$$

Ток, проходящий через человека, определим по формуле:

$$I_h = U_{\phi} \cdot \frac{2\pi f \cdot C_{ab} \cdot L}{\sqrt{(2\pi f \cdot [C_{ab} + C_{b0}] \cdot L \cdot R_h)^2 + 1}}$$

Напряжение прикосновения определяем по формуле:

$$U_{\text{пр}} = U_{\phi} \cdot \frac{2\pi f \cdot C_{ab} \cdot L \cdot R_h}{\sqrt{(2\pi f \cdot [C_{ab} + C_{b0}] \cdot L \cdot R_h)^2 + 1}}$$

Для $L_1 = 100$ км ток, проходящий через человека и напряжение прикосновения соответственно равны:

$$I_{h1} = 3,69 \text{ А}$$

$$U_{\text{пр}1} = 3,69 \text{ кВ}$$

Для $L_2 = 1$ км ток, проходящий через человека и напряжение прикосновения соответственно равны:

$$I_{h2} = 41,4475 \text{ мА}$$

$$U_{\text{пр}2} = 41,4475 \text{ В}$$

Тема 6. Несчастные случаи с людьми от действия электрического тока без летального исхода

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Ключевые вопросы темы:

1. Определение напряжения прикосновения при одиночном и групповом заземлителях
2. Напряжение прикосновения при одиночном заземлителе

3. Напряжение прикосновения при групповом заземлителе

4. Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек.

Методические материалы к лекционным занятиям

Электрический ток на человека оказывает тепловое, электрохимическое и биологическое воздействие.

Тепловое воздействие: электрическая энергия, встречая сопротивление с тканями организма, переходит в тепловую энергию и вызывает электрические ожоги. Главным образом ожоги возникают в месте входа и выхода тока, то есть в местах наибольшего сопротивления. В результате чего образуются так называемые метки или знаки тока. Тепловая энергия, преобразованная из электрической, на своем пути разрушает и изменяет ткани.

Электрохимическое воздействие: «склеивание», сгущение клеток крови (тромбоцитов и лейкоцитов), перемещение ионов, изменение зарядов белков, образование пара и газа, придание тканям ячеистый вид и др.

Биологическое действие: нарушение работы нервной системы, нарушение проводимости сердца, сокращение скелетной мускулатуры сердца и др.

Переменный ток более опасен, чем постоянный. При этом низкочастотные токи (около 50-60 Гц) опаснее высокочастотных. Частота тока, используемого в быту, 60 Гц. При увеличении частоты ток идет по поверхности кожи, вызывая ожоги, но не приводит к летальному исходу. Наиболее значима сила и напряжение электротока.

Путь, который проделывает ток через тело, называется петлей тока. Наиболее опасна полная петля (2 руки – 2 ноги), при этом варианте ток проходит через сердце, вызывая сбои в его работе вплоть до полной его остановки. Так же считаются опасными следующие петли: рука-голова, рука-рука.

Чем продолжительнее контакт с источником тока, тем выражение поражения и выше вероятность смертельного исхода. При действии тока высокого напряжения из-за резкого сокращения мышц пострадавший может

быть сразу отброшен от источника тока. При более низком напряжении тока, мышечный спазм может вызвать продолжительный захват проводника руками. С увеличением времени воздействия тока падает сопротивление кожи, поэтому следует как можно раньше прекратить контакт пострадавшего с источником тока.

Чаще всего поражения человека электрическим током происходит в результате замыкания электрической цепи через тело человека или, иначе говоря, при прикосновении человека не менее чем к двум точкам цепи, между которыми существует некоторое напряжение. В том случае, если причиной несчастного случая является появление напряжения на металлических конструктивных частях электрооборудования, которые нормально не находятся под напряжением, – на корпусах, кожухах, ограждениях и т. п. говорят об опасности косвенного прикосновения. Напряжение на таких частях относительно земли (напряжение прикосновения) 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.

В этих случаях ток стекает в землю через электрод, который контактирует с грунтом. Металлический проводник (электрод), погруженный в грунт, называется заземлителем.

Ток, стекая с заземлителя в землю, распределяется по значительному ее объему. Пространство вокруг заземлителя, где потенциалы не равны нулю, называется полем растекания тока. Если человек находится в поле растекания тока, то ток частично проходит через его ноги.

Напряжение между двумя точками в поле растекания тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага (1 м), на которых одновременно стоит человек, называется напряжением шага.

Закон распределения потенциалов в электрическом поле заземлителя описывается сложной зависимостью, определяемой размерами, формой заземлителя и электрическими свойствами грунта.

Наиболее просто закон распределения потенциалов определяется для случая, когда ток замыкания стекает в землю через одиночный полусферический заземлитель, погруженный в однородный изотропный грунт с удельным электрическим сопротивлением. Линии растекающегося тока направлены по радиусам от заземлителя, как от центра, а сечения земли как проводника представляют собой полусферы с радиусами.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 6.1. На воздушной линии электропередачи (ВЛ) с металлическими опорами круглого сечения произошло замыкание фазного привода на тело опоры. При этом воздействию тока подверглись два человека: первый, идущий к опоре, на которую произошло замыкание, и находившийся на расстоянии x_1 от нее, и второй — касавшийся металлической стойки забора, закрепленной в земле и отстоящей от центра опоры ВЛ на расстоянии x_2 .

Ток, стекающий с опоры в землю 50 А; заглубление опоры в землю 2 м; диаметр опоры $d = 0,2$ м; удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом·м; сопротивление тела человека = 1000 Ом; длина шага $a = 0,8$ м; расстояния: $x_1 = 2$ м; $x_2 = 4$ м, $b = 1,0$ м, $x_3 = 45$ м.

Требуется определить напряжение шага для первого человека и напряжение прикосновения для второго человека; в обоих случаях учесть сопротивления оснований, на которых находились эти люди. Необходимо также определить потенциал стойки и показание вольтметра на расстоянии x_3 .

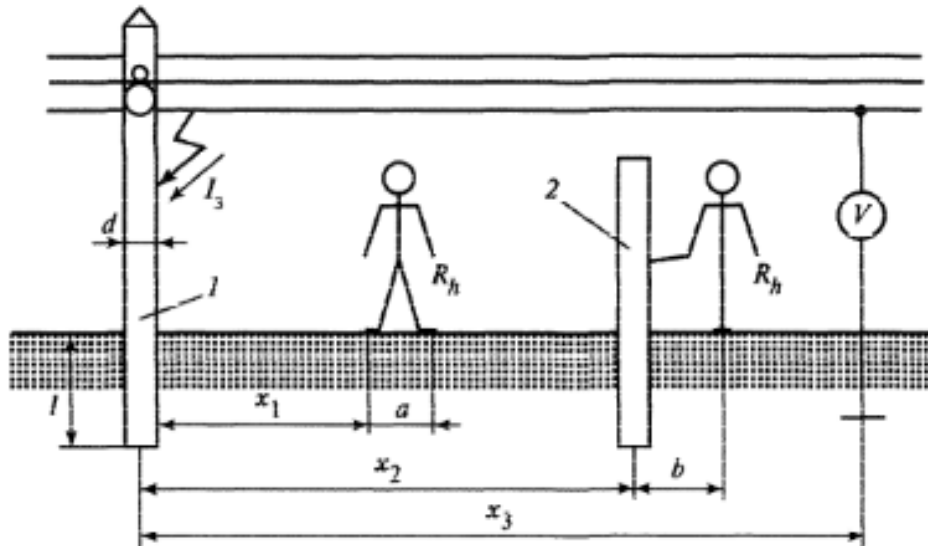


Рисунок 6.1 – Схема к задаче 6.1.

Пример решения:

Находим потенциал на поверхности земли на расстоянии $x=2\text{м}$ и $x=2,8\text{м}$ от металлической опоры:

$$\varphi_{x=2} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2^2 + 2^2} + 2}{2} = 350,7 \text{ В}$$

$$\varphi_{x=2,8} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{2,8^2 + 2^2} + 2}{2,8} = 264,4 \text{ В}$$

Найдем величину коэффициента сопротивления основания, на котором стоит первый человек:

$$\beta_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_{\text{осн}}} = \frac{1000}{1000 + 2 \cdot 3 \cdot 100} = 0,625$$

Подставляя найденные величины, получим:

$$U_{\text{ш}} = (\varphi_{x=2} - \varphi_{x=2,8}) \cdot \beta_2 = (350,7 - 264,4) \cdot 0,625 = 53,9 \text{ В}$$

Определим потенциал металлической стойки на расстоянии $x=4\text{м}$:

$$\varphi_{x=4} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{4^2 + 2^2} + 2}{4} = 191,5 \text{ В}$$

Определим потенциал основания, на котором стоит второй человек, на расстоянии $x=4+1 \text{ м} = 5\text{м}$ от опоры:

$$\varphi_{x=5} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{5^2 + 2^2} + 2}{5} = 155,2 \text{ В}$$

Найдем величину коэффициента сопротивления основания, на котором стоит второй человек:

$$\alpha_2 = \frac{R_h}{R_h + 2R_{\text{осн}}} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 100} = 0,86$$

Подставляя найденные величины, получим:

$$U_{\text{п}} = (\varphi_{x=4} - \varphi_{x=5}) \cdot \alpha_2 = (191,5 - 155,2) \cdot 0,86 = 31,2 \text{ В}$$

Определим показания вольтметра после замыкания:

Потенциал замкнутого фазного проводника равен потенциалу замыкания на металлической опоре:

$$\varphi_{\text{зм}} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2}{0,2} = 1468 \text{ В}$$

Определим потенциал на поверхности земли на расстоянии $x=45$ м:

$$\varphi_{x=45} = \frac{I_z \rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{x^2 + l^2} + l}{x} = \frac{50 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \cdot \ln \frac{\sqrt{45^2 + 2^2} + 2}{45} = 18 \text{ В}$$

Следовательно, показания вольтметра составляют:

$$U = \varphi_{\text{зм}} - \varphi_{x=45} = 1468 - 18 = 1450 \text{ В}$$

Задача 6.2. На воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением 10 кВ оборвался один из проводов. Участок этого провода длиной $2L$ лег на землю. Человек, идущий поперек оси участка провода, лежащего на земле, наступил одной ногой точно на середину этого участка провода, а другой ногой — на землю. Человек подвергся воздействию шагового напряжения и упал на землю, однако остался жив.

Длина линий электросети, в состав которых входит и поврежденный участок, составляет: воздушных — $L_{\text{п}} = 105$ км, кабельных — $L_{\text{к}} = 12$ км, длина участка провода, лежащего на земле 18 м; длина шага $a = 0,8$ м; удельное сопротивление земли $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; диаметр провода $d = 0,02$ м; сопротивление тела человека 1000 Ом .

Требуется вычислить потенциал оборванного провода и шаговое напряжение пострадавшего.

Указания: принять, что участок провода, лежащего на земле, погружен в землю на половину его диаметра; сопротивление обуви пострадавшего и сопротивление растекания тока с его ног вследствие сырой погоды принять равными нулю.

Пример решения:

При анализе ситуации, изложенной в примере, упавший на землю провод принимаем как протяженный заземлитель круглого сечения, заглубленный на половину своего диаметра.

Человек, наступив одной ногой на провод, а второй на расстоянии $a = 0,8$ м от него, подвергся воздействию напряжения шага:

$$U_{\text{ш}} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Уравнение потенциальной кривой протяженного заземлителя круглого сечения поперек оси заземлителя (по оси y) имеет вид:

$$\varphi_y = \frac{I\rho}{\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + 4y^2} + L}{2y}$$

Для трехфазной сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В (до 35 кВ), имеющей в своем составе участки кабельных линий и участки воздушных линий, ток замыкания на землю можно приближенно рассчитать по формуле:

$$I_3 = \frac{U_{\text{л}}}{350} (35L_k + L_n) = \frac{10}{350} (35 \cdot 12 + 105) = 15 \text{ А}$$

Тогда потенциал оборванного провода:

$$\varphi_1 = \frac{15 \cdot 100}{\pi \cdot 18} \ln \frac{\sqrt{18^2 + 4(0,5 \cdot 0,02)^2} + 18}{2(0,5 \cdot 0,02)} = 199 \text{ В}$$

Потенциал на расстоянии $a = 0,8$ м от провода:

$$\varphi_2 = \frac{15 \cdot 100}{\pi \cdot 18} \ln \frac{\sqrt{18^2 + 4(0,8)^2} + 18}{2 \cdot 0,8} = 83 \text{ В}$$

Напряжение шага:

$$U_{\text{ш}} = 199 - 83 = 116 \text{ В}$$

*Лабораторная работа «Контроль изоляции в электрической сети
с изолированной нейтралью»*

Цель работы:

Научиться контролировать неисправность изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью.

Тема 7. Несчастные случаи с людьми от электрического тока с летальным исходом

Форма занятия: Лекция и практическое занятие

Ключевые вопросы темы:

1. Напряжения шага
2. Напряжение шага при одиночном заземлителе
3. Напряжение шага при групповом заземлителе
4. Напряжение шага с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек

Методические материалы к лекционным занятиям

Причинами смерти от электрического тока могут быть: прекращение работы сердца, остановка дыхания и электрический шок. Возможно также одновременное действие двух или даже трех этих причин. Прекращение сердечной деятельности от электрического тока наиболее опасно, поскольку вернуть пострадавшего к жизни в этом случае является, как правило, более сложным заданием, нежели при остановке дыхания или при шоке. Влияние тока на мышцу сердца может быть прямым, когда ток проходит непосредственно в области сердца, и рефлекторным, то есть через центральную нервную систему, когда путь тока лежит вне этой области. В обоих случаях может произойти остановка сердца или его фибрилляция. При поражении током фибрилляция сердца наступает значительно чаще, чем его полная остановка.

Фибрилляция сердца - хаотические одновременные сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл), при которых сердце не в состоянии гнать кровь по сосудам. Фибрилляция сердца может наступить вследствие прохождения через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги переменного тока силой более 50 мА частотой 50 Гц в течение нескольких секунд.

При фибрилляции сердца, которая возникает вследствие кратковременного действия тока, дыхание может еще продолжаться 2-3 мин. Поскольку вместе с кровообращением прекращается и снабжение организма кислородом, у человека наступает быстрое резкое ухудшение общего состояния и дыхание прекращается. Фибрилляция продолжается короткое время и завершается полной остановкой сердца. Наступает клиническая смерть.

Прекращение дыхания происходит вследствие непосредственного влияния тока на мышцы грудной клетки, которые участвуют в процессе дыхания. Человек начинает ощущать затруднение дыхания вследствие судорожного сокращения мышц уже при токе 20-25 мА частотой 50 Гц. При большем значении силы тока это действие усиливается. В случае длительного прохождения тока у человека наступает асфиксия – болезненное состояние вследствие недостатка кислорода и излишка углекислоты в организме. При асфиксии постепенно теряется сознание, чувствительность, рефлексы, потом прекращается дыхание, а спустя некоторое время останавливается сердце или возникает его фибрилляция, то есть наступает клиническая смерть. Прекращение сердечной деятельности в этом случае обусловлено не только непосредственным влиянием тока на сердце, но и прекращением снабжения организма кислородом, в том числе и клеток сердечной мышцы из-за остановки дыхания.

Электрический шок - своеобразная тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма из-за раздражения электрическим током, которая сопровождается глубокими расстройствами кровообращения, дыхания, обмена веществ. Шоковое состояние продолжается от нескольких десятков минут до суток. После этого может наступить гибель человека вследствие полного угасания

жизненно важных функций, или выздоровление - вследствие своевременного активного врачебного вмешательства.

Наибольшие значения $U_{ш}$ будут при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит непосредственно на заземлителе, а другой — на расстоянии шага от него. Объясняется это тем, что потенциал вокруг заземлителей распределяется по вогнутым кривым и, следовательно, наибольший перепад оказывается, как правило, в начале кривой.

Наименьшие значения $U_{ш}$, будут при бесконечно большом удалении от заземлителя, т. е. за пределами поля растекания тока (практически дальше 20 м). На расстояниях меньше 20 м $U_{ш}$ будут иметь промежуточные значения, зависящие от типа заземлителя.

В практике устройства защитных заземлений особый интерес представляют максимальные значения шаговых напряжений.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 7.1. Небольшое производственное помещение имеет металлический пол — стальной лист, уложенный поверх бетонного основания. Этот лист не имеет электрической связи ни с какими металлоконструкциями и металлическими предметами за исключением корпуса электродвигателя, установленного на бетонном фундаменте; корпус соединен проводником с металлическим полом. Предполагалось, что стальной лист является заземлителем с достаточно большой проводимостью. Но, как показали измерения, это сопротивление оказалось достаточно большим из-за бетонного основания и составило несколько мегаом, т.е. при расчете может быть принято бесконечным.

Во время пребывания в помещении двух рабочих, стоявших на металлическом полу и касавшихся: рабочий А корпуса двигателя, рабочий Б — стальной трубы (см. рисунок к задаче), вертикально забитой в землю, произошло замыкание обмотки работающего двигателя на его корпус. В результате этого человек Б был смертельно поражен током.

Труба, которой касался пострадавший, проходила через круглое отверстие в стальном полу, диаметром в 2 раза большим диаметра трубы, и не касалась стального пола и других металлических элементов помещения.

Дано: сеть трехфазная трехпроводная с изолированной нейтралью напряжением $U = 660 \text{ В}$; сопротивления изоляции проводов относительно земли $r_1 = r_2 = r = 1800 \text{ Ом}$; длина забитого в землю участка трубы $2,0 \text{ м}$; диаметр трубы $d = 0,05 \text{ м}$; сопротивление тела человека $R_h = 1000 \text{ Ом}$; удельное сопротивление земли $\rho = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Требуется определить напряжения прикосновения ($U_{\text{ПР}}$), воздействию которых подверглись оба рабочих.

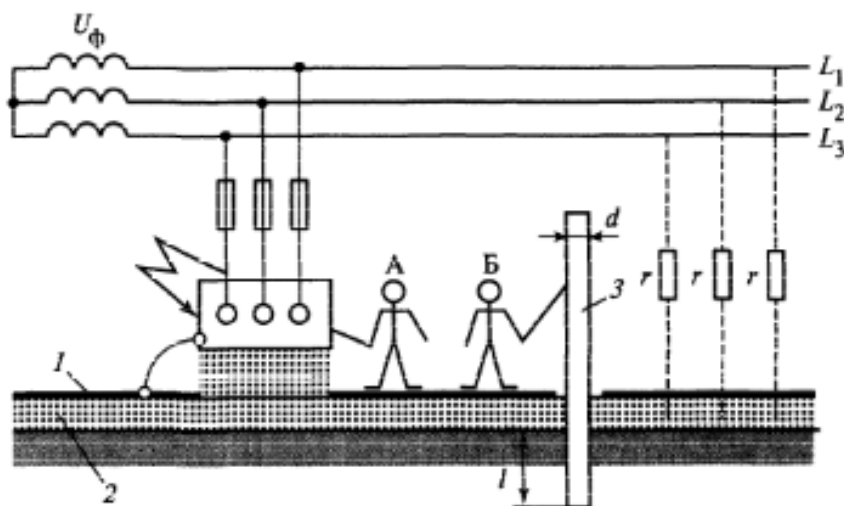


Рисунок 7.1 – Схема к задаче 7.1

Пример решения:

В задаче сказано, что рабочий «А» касался корпуса двигателя, причем электродвигатель соединен с металлическим полом. Сам пол имеет чрезвычайное большое сопротивление, поэтому ток, проходящий через тело человека «А», будет незначительным, следовательно:

$$U_{\text{ПР}_A} = 0 \text{ В}$$

Далее необходимо найти напряжение прикосновения для второго рабочего, поэтому находим значение сопротивления стальной трубы:

$$R_{\text{ТР}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

После подсчетов получаем сопротивление трубы, равное 80,77 Ом.

Определим ток, проходящий через человека «Б»:

$$I_{h_Б} = \frac{U_{\Phi}}{R_h + (R/3) + R_{TP}}$$

Ток равняется 226,1 мА.

Напряжение прикосновения для человека «Б»:

$$U_{ПР_Б} = R_h I_{h_Б}$$

Для человека «Б» напряжение прикосновения равняется 226 В.

Задача 7.2. На воздушной трехфазной линии электропередачи (ВЛ) с заземленной нейтралью произошел обрыв провода, который упал на металлический полушар, лежащий на земле.

Человек, стоявший на земле и прикасавшийся в это время к заземленному корпусу потребителя электроэнергии, был смертельно поражен током.

Радиусы полушаров $r_1 = r_2 = 0,5\text{ м}$; расстояния от центров полушаров до точки, на которой стоял пострадавший, $L_1 = 2\text{ м}$, $L_2 = 1\text{ м}$; удельное сопротивление земли $200\text{ Ом}\cdot\text{м}$; сопротивление тела человека 1000 Ом .

Измерениями было установлено, что ток, стекающий с оборванного провода в землю через полушар, 63 А .

Требуется: вычислить напряжение прикосновения, под которым оказался пострадавший, с учетом сопротивления растекания тока в землю с ног человека (сопротивления основания).

Предмет, которого касался оборвавшийся провод, следует уподобить полушару радиусом r_1 , лежащему на земле, а заземлитель нейтрали сети принять также в виде полушара радиусом r_2 .

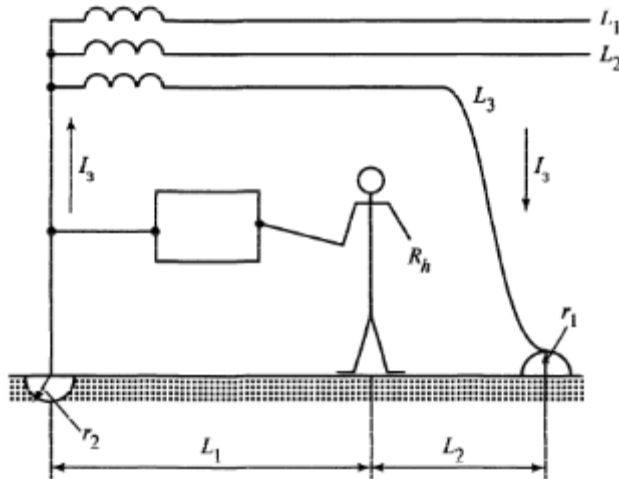


Рисунок 7.2 – Схема к задаче 7.2

Пример решения:

Для нахождения напряжения прикосновения, необходимо найти разность потенциалов точек «рука — ноги».

Потенциал точки руки равен:

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{32} + (-\varphi_1)$$

где φ_{32} - потенциал заземлителя нейтрали, φ_1 - потенциал заземлителя

Уравнение для потенциальной кривой: $\varphi_2(x) = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi x}$

Наибольшее значение потенциала будет при $x=r=0,5\text{м}$:

$$\varphi_{32} = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi r} = \frac{63 \cdot 200}{2\pi \cdot 0,5} = 4012,74 \text{ В}$$

Найдем распределение потенциала первого заземлителя.

При дисковом заземлителе — круговой пластине диаметром $2r$ — распределение потенциала на поверхности земли вдоль радиуса диска описывается уравнением:

$$\varphi_1 = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi r} \arcsin \frac{2r}{2x} = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi r} \arcsin \frac{2r}{2(L_1 + L_2)} = 671,94 \text{ В}$$

Тогда

$$\varphi_{\text{гр}} = \varphi_{32} + (-\varphi_1) = 4012,74 - 671,94 = 3339,7 \text{ В}$$

Потенциал точки основания, где находится человек:

$$\varphi_{\text{осн}} = \varphi_{1\text{осн}} - \varphi_{2\text{осн}}$$

$$\varphi_{1\text{осн}} = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi L_1} = \frac{63 \cdot 200}{2\pi \cdot 2} = 1003,18 \text{ В}$$

$$\varphi_{2\text{осн}} = \frac{I_3 \cdot \rho}{2\pi r} \arcsin \frac{2r}{2L_2} = 2100 \text{ В}$$

Следовательно: $\varphi_{\text{осн}} = \varphi_{1\text{осн}} - \varphi_{2\text{осн}} = 1003,18 - 2100 = -1096,8 \text{ В}$

Напряжение прикосновения, под которым оказался пострадавший определяется из формулы:

$$\varphi_{\text{гр}} - \varphi_{\text{осн}} = \frac{U_{\text{пр}}}{R_h} (R_h + R_{\text{осн}})$$

Следовательно:

$$U_{\text{пр}} = \frac{R_h(\varphi_{\text{гр}} - \varphi_{\text{осн}})}{(R_h + R_{\text{осн}})}$$

здесь $R_{\text{осн}}$ — сопротивление растеканию тока в землю с ног человека (сопротивление основания)

Подошвы обуви человека, создающие контакт с основанием, можно уподобить дисковому заземлителю, лежащему на поверхности земли. Приблизительно $R_{\text{осн}} = 1,5 \cdot \rho = 1,5 \cdot 200 = 300 \text{ Ом}$

Тогда напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр}} = \frac{1000 \cdot (3339,7 - (-1096,8))}{(1000 + 300)} = 3412 \text{ В}$$

Тема 8. Защитное заземление

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Ключевые вопросы темы:

1. Типы заземляющих устройств
2. Выполнение заземляющих устройств

Методические материалы к лекционным занятиям

В соответствии с ГОСТ 12.1.009 защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом

металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Совокупность заземлителя и заземляющих проводов называют заземляющим устройством. Защитное заземление применяют в трехфазных трехпроводных и однофазных двухпроводных сетях переменного тока напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью, а также в сетях напряжением выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали.

Защитное действие заземляющего устройства основано на снижении до безопасной величины тока, проходящего через человека в момент касания им поврежденной электроустановки.

При попадании напряжения на корпус электроустановки человек, коснувшись ее и имея хороший контакт с землей, замыкает собой электрическую цепь: фаза — корпус электроустановки — человек — земля — емкостные и активные сопротивления связи проводов с землей, фазы. По человеку пойдет ток. Несмотря на то, что электрические провода сети установлены на изолированных опорах, между ними и землей существует электрическая связь. Она происходит за счет несовершенства изоляции проводов, опор и т. п. и наличия емкости между проводами и землей. При большом протяжении проводов эта связь становится значительной, а ее активное R и емкостное X сопротивления снижаются и становятся соизмеримыми с сопротивлением тела человека. Вот почему, несмотря на отсутствие видимой связи, человек, находящийся под напряжением и имеющий контакт с землей, замыкает собой электрическую цепь между различными фазами сети.

При наличии заземляющего устройства образуется дополнительная цепь: фаза — корпус электроустановки — заземляющее устройство — земля — сопротивления — фазы. В результате этого ток замыкания распределяется между заземляющим устройством и человеком. Так как сопротивление заземлителя (оно должно быть не более 10 Ом) во много раз меньше

сопротивления человека (1000 Ом), то через тело человека будет проходить малый ток, не вызывающий его поражения. Основная часть тока пойдет по цепи через заземлитель.

Заземлители могут быть естественными и искусственными. В качестве естественных заземлителей используют металлические конструкции и арматуру зданий и сооружений, имеющие хорошее соединение с землей, проложенные в земле водопроводные, канализационные и другие трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих и взрывоопасных газов и трубопроводов, покрытых изоляцией для защиты от коррозии).

В качестве искусственных заземлителей применяют одиночные или соединенные в группы металлические электроды, забитые вертикально или уложенные горизонтально в землю. Электроды изготавливают из отрезков металлических труб диаметром не менее 32 мм и толщиной стенок не менее 3,5 мм, угловой стали с толщиной полок не менее 4 мм, полосы сечением не менее 100 мм², а также из отрезков швеллеров, прутковой стали диаметром не менее 10 мм. Электроды, выполненные из более тонких профилей, вследствие коррозии быстро выходят из строя. Кроме того, тонкие профили имеют малый контакт с землей, поэтому их применение нежелательно. Длину электродов и расстояние между ними принимают не менее 2,5–3,0 м.

Между собой вертикальные электроды в групповом заземлителе соединяют с помощью сварки перемычкой, выполненной из аналогичных материалов и тех же сечений, что и сами электроды. Заземляющее устройство должно иметь вывод наружу (на поверхность земли), выполненное на сварке из таких же материалов. Оно служит для подсоединения заземляющего проводника.

Для осуществления заземляющих функций сопротивление заземляющего устройства в электроустановках напряжением до 1000 В в сети с изолированной нейтралью должно быть не более 4 Ом.

Необходимое сопротивление достигают установкой соответствующего количества электродов в заземлителе, определяемых расчетом.

Сопротивление заземляющего устройства — это отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю. Различают выносное и контурное заземляющие устройства.

Выносное устройство располагают за пределами площадки с заземляемым оборудованием. Его достоинство состоит в возможности выбора грунта с наименьшим удельным сопротивлением.

Контурное заземление выполняют забивкой электродов по контуру заземляемого оборудования и между ним. Такая установка электродов создает дополнительный защитный эффект за счет повышения и выравнивания (более равномерного распределения) потенциалов земли в зоне нахождения человека.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 8.1. При проектировании заземляющего устройства трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ было решено в дополнение к искусственному заземлителю использовать два естественных заземлителя: первый — грозозащитные тросы на опорах отходящей от подстанции воздушной линии электропередачи (ВЛ) 110 кВ; второй стальная обсадная труба неиспользуемого артезианского колодца, находящегося вблизи строящейся подстанции.

Таким образом, заземляющее устройство подстанции будет иметь три параллельно работающих заземлителя (два естественных и один искусственный) и должно обладать согласно требованиям ПУЭ сопротивлением не более 0,5 Ом.

Дано: число опор ВЛ, несущих грозозащитные тросы, 21; число тросов на опоре 2; тросы стальные, активное сопротивление троса 3,2 Ом/км; длина пролета ВЛ 200 м; диаметр обсадной трубы $d = 0,1$ м; длина погруженной в землю части обсадной трубы $Z_r = 14$ м; сопротивление заземлителя каждой опоры ВЛ 15 Ом; земля однородная; расчетное удельное сопротивление земли с учетом сезонных изменений 190 Ом·м.

Требуется определить значения сопротивлений, которыми обладают каждый естественный заземлитель, и значение сопротивления, которым должен обладать искусственный заземлитель.

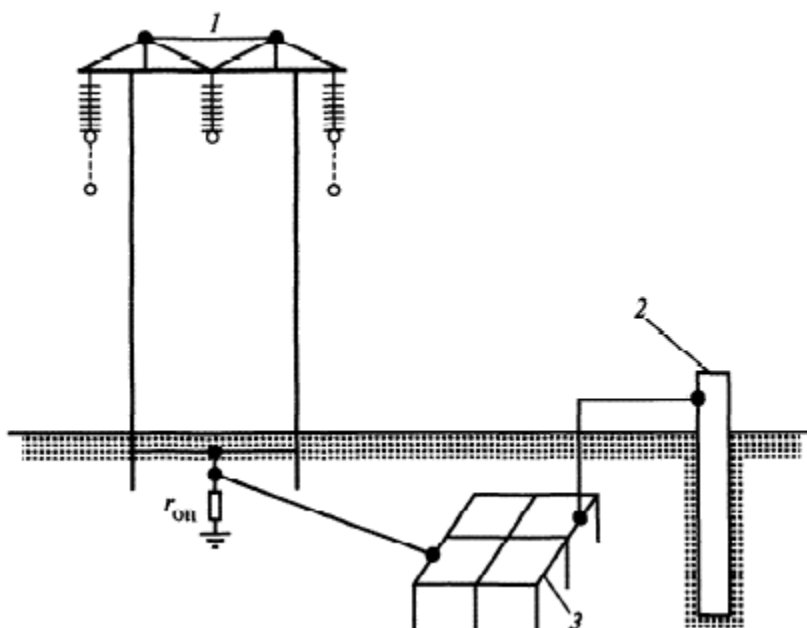


Рисунок 8.1 – Схема к задаче 8.1.

Пример решения:

Длина одного пролета равна:

$$L_{\text{п}} = \frac{L}{n_0 - 1}$$

$$L_{\text{п}} = \frac{200}{21 - 1} = 10 \text{ м}$$

Сопротивление троса на длине одного пролета:

$$r_{\text{т}} = r_a \cdot L_{\text{п}}$$

$$r_{\text{т}} = 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,032 \text{ Ом}$$

Сопротивление естественных заземлителей можно вычислять по формулам для искусственных заземлителей аналогичной формы или по специальным формулам, встречающимся в технической литературе. Например, сопротивление растеканию системы «грозозащитный трос – опоры» $R_{\text{и}}$, Ом (при числе опор с тросом более 20), определяют по приближенной формуле:

$$R_{и} = \sqrt{\frac{r_{оп} r_T}{n_T}}$$

где $r_{оп}$ – расчетное сопротивление заземления одной опоры, Ом;

r_T – активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом;

n_T – количество тросов на опоре.

$$R_{e1} = \sqrt{\frac{15 * 0,032}{2}} = 0,49 \text{ Ом}$$

Сопротивление колодца:

$$R_{e2} = \frac{\rho_c Z_r}{S_T}$$

где $S_T = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь круга, являющегося сечением трубы, м²;

$$S_T = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} = 0,008 \text{ м}^2$$

$$R_{e2} = \frac{0,15 * 10^{-6} \cdot 14}{0,008} = 0,267 \text{ мОм}$$

Допустимое сопротивление $R_{доп} = 5 \text{ Ом}$. Оно должно быть больше, чем сопротивление параллельно соединенных двух естественных и искусственного заземлителя:

$$5 > \frac{1}{R_{и}} + \frac{1}{R_{e1}} + \frac{1}{R_{e2}}$$

Откуда $R_{и}$ должно быть больше, чем 0,27 мОм.

Задача 8.2. Вычислить сопротивление группового заземлителя в двухслойной земле, состоящего из вертикальных стержневых и горизонтальных полосовых электродов.

Расчетные значения удельных сопротивлений верхнего и нижнего слоев земли 150 Ом·м и 50 Ом·м; толщина (мощность) верхнего слоя земли $h = 2 \text{ м}$; длина вертикального электрода 4 м; глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода 0,5 м.

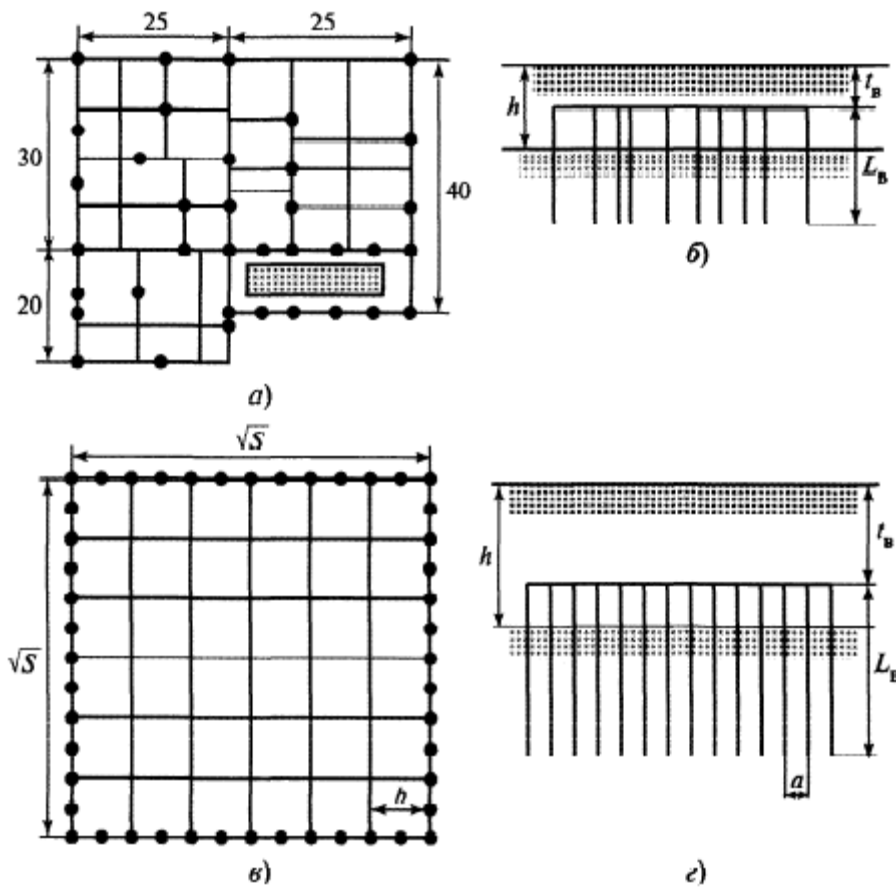


Рисунок 8.2 – Схема к задаче 8.2

а, б — в виде горизонтальной решетки неправильной формы с неравномерным размещением вертикальных электродов; в, г — расчетная схема (модель) заземлителя в двухслойной земле в виде горизонтальной квадратной решетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными на контуру сежи вертикальными электродами.

Пример решения:

Определяем по заданной предварительной схеме заземлителя суммарную длину горизонтальных электродов $L_{\Gamma} = 650$; количество вертикальных электродов $n = 36$; площадь, занимаемую заземлителем, $S = 2250 \text{ м}^2$. Составляем расчетную модель заземлителя в виде квадратной решетки площадью $S = 2250 \text{ м}^2$ и длиной одной стороны 47,43 м.

Вычисляем количество ячеек на одной стороне заземлителя:

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2\sqrt{S}} - 1 = \frac{650}{2\sqrt{2250}} - 1 = 5,85 \text{ шт}$$

Принимаем $m = 6$ Уточненная суммарная длина горизонтальных электродов:

$$L_r = 2(m + 1)\sqrt{S} = 2(6 + 1) \cdot 47,43 = 664 \text{ м}$$

Длина стороны ячейки в модели:

$$m = \frac{\sqrt{S}}{m} = \frac{\sqrt{2250}}{6} = 7,9 \text{ м}$$

Расстояние между электродами в модели:

$$a = \frac{4\sqrt{S}}{n} = \frac{4\sqrt{2250}}{36} = 5 \text{ м}$$

Суммарная длина вертикальных электродов:

$$L_{\text{вл}} = nL_{\text{в}} = 36 \cdot 4 = 144 \text{ м}$$

Относительная глубина погружения в землю вертикального заземлителя:

$$t_{\text{отн}} = \frac{(L_{\text{в}} + t_{\text{в}})}{\sqrt{S}} = \frac{(4 + 0,5)}{\sqrt{2250}} = 0,095$$

Относительная длина верхней части вертикального заземлителя, т. е. части, находящейся в верхнем слое земли:

$$L_{\text{отн}} = \frac{(h - t)}{L_{\text{в}}} = \frac{2 - 0,5}{4} = 0,375$$

Располагая значениями ρ_1 и ρ_2 , находим эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли $\rho_{\text{экв}}$, по формуле:

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_2 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^k$$

Значение k определяем из уравнения:

$$k = 0,43 \left(L_{\text{отн}} + 0,272 \cdot \ln \left(\frac{a\sqrt{2}}{L_{\text{в}}} \right) \right) = 0,43 \left(0,375 + 0,272 \cdot \ln \left(\frac{5\sqrt{2}}{4} \right) \right) = 0,228$$

Тогда:

$$\rho_{\text{экв}} = 50 \cdot 3^{0,228} = 64,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Сопротивление заземлителя находим из уравнения:

$$r = \frac{0,364 \cdot \rho_{\text{экв}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{экв}}}{(L_r + L_{\text{вл}})}$$

В итоге получаем искомое значение сопротивления заземлителя:

$$r_3 = \frac{0,364 \cdot 64,5}{\sqrt{2250}} + \frac{64,5}{650 + 144} = 0,58 \text{ Ом}$$

Лабораторная работа «Моделирование действия защитного заземления/самозаземления электрооборудования»

Цель работы:

Смоделировать и исследовать действие защитного заземления и самозаземления электрооборудования.

Тема 9. Защитное зануление

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Ключевые вопросы темы:

1. Теоретические вопросы
2. Расчет зануления

Методические материалы к лекционным занятиям

Зануление — это преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением, с глухозаземленной нейтралью источника тока (генератора или трансформатора).

В четырехпроводных сетях с нулевым проводом и глухозаземленной нейтралью источника тока напряжением до 1000 В зануление — основное средство защиты.

Подсоединение корпусов электроустановок к нейтрали источника тока осуществляют с помощью нулевого защитного проводника (РЕ — проводника). Его нельзя путать с нулевым рабочим проводом (N — проводником), который также соединен с нейтралью источника, но служит для питания однофазных электроустановок. Нулевой защитный проводник прокладывают по трассе фазных проводов, в непосредственной близости от них.

Защитное действие зануления основано на снижении до безопасной величины тока, проходящего через человека в момент касания им поврежденной электроустановки, и последующем отключении этой установки от сети.

Работает зануление следующим образом: при попадании напряжения на корпус зануленной электроустановки большая часть тока с него пойдет в сеть через нулевой защитный провод. По цепи: корпус электроустановки — человек — земля — заземляющее устройство — нулевой рабочий провод — пойдет незначительный ток, не вызывающий поражения. Одновременно с этим замыкание на корпус фазного провода при такой схеме защиты автоматически превращается в однофазное короткое замыкание между фазным и нулевым рабочим проводом 5 сети, в результате чего через 0,2—7 с срабатывает токовая защита (перегорает предохранитель 7, срабатывает автоматический выключатель и т. п.), и электроустановка, а вместе с ней и человек, полностью обесточиваются.

Таким образом, в первоначальный момент зануление работает аналогично защитному заземлению, а в последующем оно полностью прекращает действие тока на человека. Только при этом ток, проходящий через тело человека до срабатывания защиты, будет в несколько раз меньше, т.к. сопротивление зануляющего проводника обычно не превышает 0,3 Ом, а сопротивление заземлителя допускается до 4 Ом.

В зануленных электроустановках до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью с целью надежного обеспечения автоматического отключения аварийного участка проводимость фазных и нулевых защитных проводников и их соединений должна обеспечить ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в 3 раза номинальный ток плавкого элемента ближайшего предохранителя или автоматического выключателя, имеющего расцепитель с обратной зависимостью от тока характеристикой (тепловой расцепитель), в 1,4 раза — для автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями с

силой номинального тока до 100 А и в 1,25 раза — с величиной тока более 100 А.

В зануленных электроустановках до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью (с целью надежного обеспечения автоматического отключения аварийного участка) проводимость фазных и нулевых защитных проводников и их соединений должна обеспечить ток короткого замыкания.

Нулевой защитный провод должен обеспечивать надежное соединение корпусов электроустановок с нейтралью источника, поэтому все соединения выполняют сварными. В нем запрещается установка предохранителей и выключателей (за исключением случая одновременного отключения и фазных проводов).

Нулевой защитный провод сети заземляют: у источника тока с помощью заземлителя 1; на концах воздушных линий (или ответвлений от них) длиной более 200 м; а также на вводах воздушной линии к электроустановкам. Повторные заземления 9 необходимы для уменьшения опасности поражения электрическим током при обрыве нулевого провода и замыкании фазы на корпус электроустановки за местом обрыва, а также для снижения напряжения на корпусе в момент срабатывания токовой защиты.

Согласно ПУЭ сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль источника тока, с учетом естественных и повторных заземлителей нулевого провода должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях источника трехфазного тока 660, 380 и 220 В.

Общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений PEN-проводника каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

Зануление (заземление) металлических корпусов переносных электроустановок осуществляют третьей жилой для однофазных или четвертой жилой для трехфазных электроприемников, находящейся в одной оболочке с фазными проводами.

Жилы этих проводов должны быть гибкими, медными, их сечение должно быть равно сечению фазных проводников и быть не менее 1,5 мм².

Втычные соединители (вилки и розетки) должны быть выполнены так, чтобы соединение заземляющих и нулевых защитных проводников происходило до соединения фазных проводников, а рассоединение происходило в обратной последовательности. Обычно это достигают применением у вилки более длинного штыря для защитного проводника, чем для фазных проводов. Во всех случаях вилку подсоединяют к электроприемнику, розетку — к сети.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 9.1. При сооружении на предприятии защитного зануления предполагается использовать стальной проводник круглого сечения в качестве нулевого защитного проводника для группы трехфазных электродвигателей одинаковой мощности. Двигатели питаются от трехфазной четырехпроводной электросети с заземленной нейтралью напряжением 380/220 В.

Требуется определить значения сопротивлений каждого из трех участков этого проводника — активного R_a и внутреннего индуктивного X_t .

Защита электродвигателей от коротких замыканий осуществляется плавкими предохранителями.

Длины участков стального проводника 0,2 км, 0,6 км, 0,45 км; диаметр стального проводника $d = 10$ мм; номинальный ток плавкой вставки предохранителя 40 А, $k = 3$.

Задача 9.2. Трехфазная четырехпроводная линия напряжением 380/220 В питает два двигателя. Двигатели защищены от токов КЗ плавкими предохранителями с номинальными токами 125 А (двигатель 1) и 80А.

Фазные провода линии медные сечением 25 мм^2 , нулевой 2 защитный проводник (НЗП) — стальная полоса сечением $40 \times 4 \text{ мм}$. Источник тока — трансформатор 400 кВА , $6/0,4 \text{ кВ}$ со схемой соединения обмоток (A/YH). Коэффициент кратности тока $k \geq 3$.

Требуется проверить, обеспечена ли отключающая способность зануления в линии.

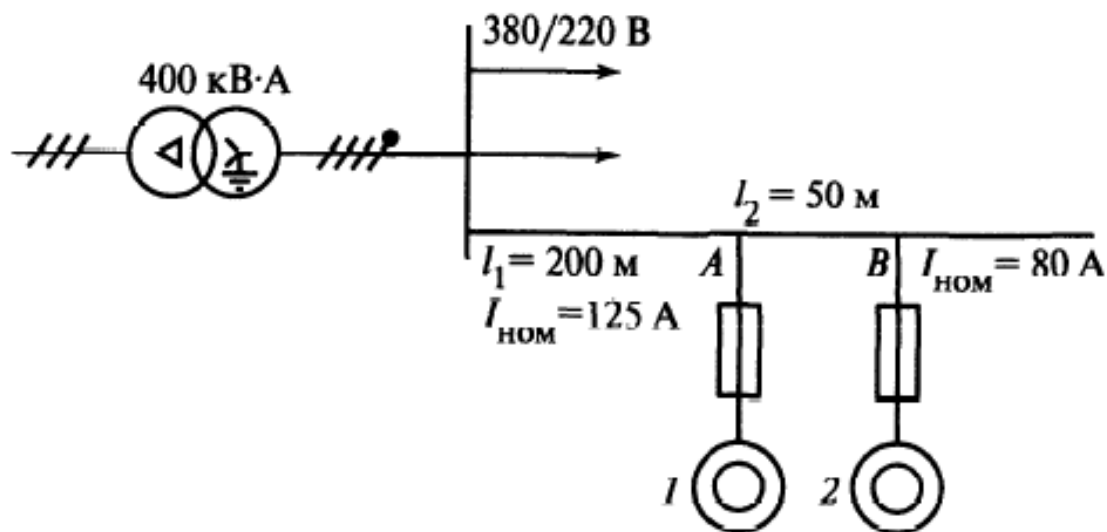


Рисунок 9.1 – Пояснение к задаче 9.2

Лабораторная работа «Натурное моделирование зануления электрооборудования»

Цель работы:

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

Тема 10. Устройство защитного отключения (УЗО) на дифференциальном токе

Форма занятия: Лекция, практическое занятие и лабораторная работа

Ключевые вопросы темы:

1. Принцип действия УЗО

2. Нормируемые параметры УЗО

3. Классификация УЗО

4. Применение УЗО при различных системах заземления

Методические материалы к лекционным занятиям

Термин "устройство защитного отключения - УЗО", принятый в отечественной специальной литературе, наиболее точно определяет назначение данного устройства и его отличие от других коммутационных электрических аппаратов - автоматических выключателей, выключателей нагрузки, магнитных пускателей и т.д.

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.

В зависимости от характеристик электроустановок, для которых предназначены УЗО, их следует классифицировать по: режиму нейтрали источника питания электроустановки; роду и частоте тока; напряжению; числу фаз (полюсов); мобильности.

В зависимости от режима нейтрали источника питания электроустановки УЗО подразделяют на устройства, предназначенные для электроустановок с изолированной либо с глухозаземленной нейтралью. По роду и частоте тока

УЗО подразделяют на устройства, предназначенные для электроустановок: переменного тока частоты 50 (60) Гц; переменного тока не промышленной частоты; постоянного тока; выпрямленного тока; двух и более родов тока из числа указанных выше.

УЗО, предназначенные для отключения электроустановок при прикосновении человека к частям, находящимся под напряжением, подразделяют на устройства, рассчитанные на электроустановки следующих классов напряжений : переменного тока частоты 50 (60) Гц - 127, 220, 380, 500, 660, 1140 В; переменного тока частоты 400 Гц - 200 В; постоянного (выпрямленного) тока - 110, 220, 275, 400 В. УЗО, предназначенные для отключений электроустановки при возникновении в ней тока утечки, подразделяют на устройства, рассчитанные на электроустановки вышеуказанных классов напряжений, а также 6000 и 10000 В частоты 50 (60) Гц.

По числу фаз (полюсов) УЗО подразделяют на: однофазные (однополюсные); двухфазные (двухполюсные); трехфазные (трехполюсные, четырехполюсные).

По видам средств защиты, взаимодействующих с УЗО, различают устройства, используемые с: защитным заземлением; занулением; автоматическим закорачиванием на землю поврежденной фазы (шунтированием цепи утечки тока замыкания на землю); компенсацией (автоматической или статической) тока утечки (замыкания на землю).

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

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 (действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО-220,380В); уставка (дифференциальный отключающий ток или минимальное значение входного

сигнала, вызывающего срабатывание УЗО и последующее автоматическое отключение поврежденного участка сети или токоприемника); время срабатывания устройства.

Принцип работы УЗО состоит в том, что оно постоянно контролирует входной сигнал и сравнивает его с наперед заданной величиной (уставкой). Например, значения уставок должны выбираться для сетей с глухозаземленной нейтралью - из ряда 0,002; 0,006; 0,01; 0,02; 0,03; 0,1; 0,3; 0,5; 1,0 А. 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.

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

Наиболее важное применение УЗО – обеспечение электробезопасности людей. УЗО обеспечивает:

- защиту от прикосновения к токоведущим частям;
- быстродействующее отключение электроприборов при замыкании на корпус.

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).

При прикосновении человека к открытым токопроводящим частям или к корпусу электроприемника, который в результате пробоя изоляции оказался под напряжением, по фазному проводнику через УЗО кроме тока нагрузки потечет дополнительный ток (ток утечки), являющийся для трансформатора тока дифференциальным (разностным). Неравенство токов в первичных обмотках в фазном проводнике и в нулевом рабочем проводнике - вызывает небаланс магнитных потоков и, как следствие, возникновение во вторичной обмотке трансформированного дифференциального тока. Если этот ток превышает заданное значение тока порогового элемента пускового органа, последний срабатывает и воздействует на исполнительный механизм. Исполнительный механизм, обычно состоящий из пружинного привода, спускового механизма и группы силовых контактов, размыкает электрическую цепь. В результате защищаемая УЗО электроустановка обесточивается. Для осуществления периодического контроля исправности (работоспособности) УЗО предусмотрена цепь тестирования 4. При нажатии кнопки "Т" искусственно создается цепь протекания отключающего дифференциального тока. Срабатывание УЗО в этом случае означает, что устройство в целом исправно.

Методические материалы к практическим занятиям

Задача 10.1. Для электроснабжения трехфазных электроприемников, расположенных в металлическом ангаре, используется сеть с глухозаземленной нейтралью с напряжением 380/220 В и системой заземления TT. Сопротивление заземлителя нейтрали — 4 Ом, сопротивление заземлителя защитного проводника — 1500 Ом.

Рассчитать напряжение на открытых проводящих частях (ОПЧ) электроприемников и ток, протекающий через человека, при повреждении изоляции одного из электроприемников.

Определить отключающий дифференциальный ток УЗО, при необходимости скорректировать сопротивление заземлителя защитного проводника. Нарисовать принципиальную схему.

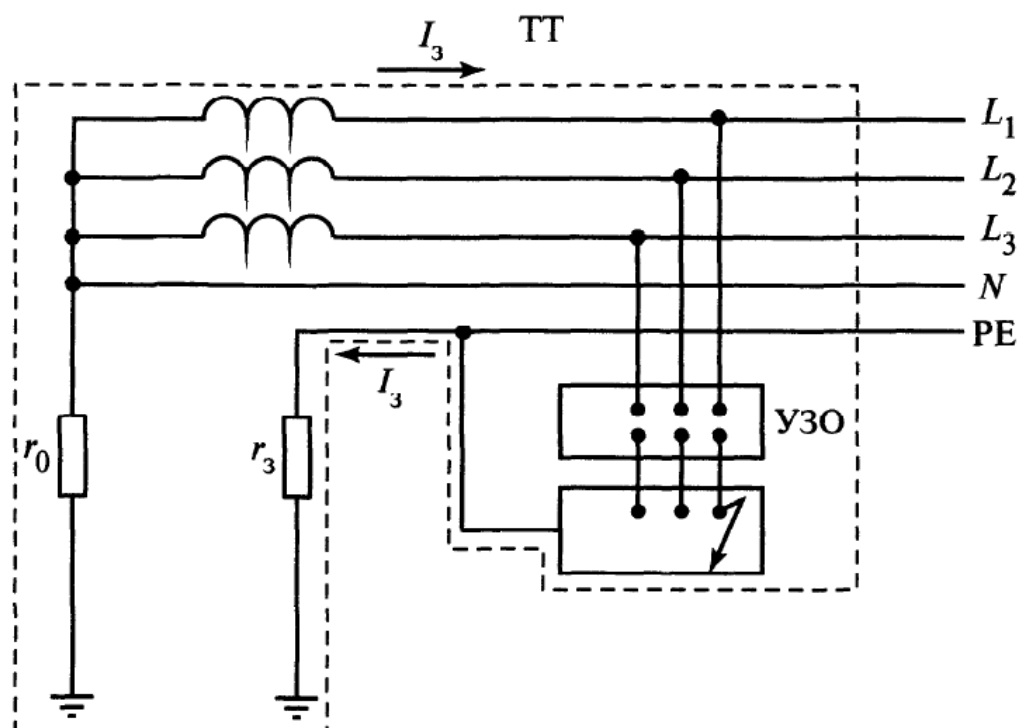


Рисунок 10.1 – Пояснения к задаче 10.1

Задача 10.2. Для защиты от поражения электрическим током предполагается установить УЗО с отключающим дифференциальным током 30 мА. Определить номинальный рабочий ток УЗО для двух вариантов:

- 1) используется УЗО без встроенной защиты от сверхтоков;
- 2) используется УЗО с защитой от сверхтоков.

Напряжение сети — 380/220 В; мощность трехфазных асинхронных двигателей P_A - 1,5 кВт (3 шт.), P = 1,2 кВт (2 шт.), P_3 = 3 кВт (2 шт.). Коэффициент одновременности работы оборудования 0,8.

Лабораторная работа «Натурное моделирование защитного отключения электрической сети»

Цель работы:

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

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

При изучении дисциплины студентам целесообразно выполнять следующие рекомендации.

1. Важнейшим условием для успешного освоения дисциплины «Безопасность в электротехнике» является прочная теоретическая база. Особенное значение приобретают такие разделы как анализ электромагнитных полей и методы анализа электрических цепей.

2. Самостоятельная работа как вид деятельности аспиранта многогранна и играет определяющую роль в развитии способности самостоятельно решать исследовательские задачи. В качестве форм самостоятельной работы при изучении дисциплины предлагаются: работа с научной и учебной литературой; конспектирование текста; решение задач и упражнений; углубленное изучение вопросов по тематике лекционных и практических занятий; подготовка к зачету. При выполнении самостоятельной работы аспиранту следует сконцентрироваться на: получении навыков научно-исследовательской работы на основании анализа текстов литературных источников и применения различных методов исследования; выработке умения самостоятельно и критически подходить к изучаемому материалу.

3. При самостоятельной работе с научной литературой аспиранту рекомендуется конспектировать изученный материал. Конспекты научной должны быть выполнены аккуратно, содержать ответы на каждый поставленный в теме вопрос, иметь ссылку на источник информации с

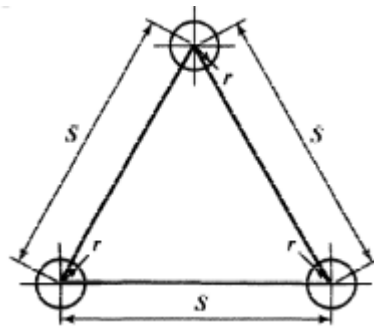
обязательным указанием автора, названия и года издания используемой научной литературы. Конспект может быть опорным (содержать лишь основные ключевые позиции), но при этом позволяющим дать полный ответ по вопросу, может быть подробным. Объем конспекта определяется самим аспирантом. В процессе работы с учебной и научной литературой аспирант может: делать записи по ходу чтения в виде простого или развернутого плана (создавать перечень основных вопросов, рассмотренных в источнике); составлять тезисы (цитирование наиболее важных мест статьи или монографии, короткое изложение основных мыслей автора); готовить аннотации (краткое обобщение основных вопросов работы).

4. Задачи преподавателя по организации самостоятельной работы аспиранта заключаются в следующем:

- информирование о разделах дисциплины, подлежащих изучению, о формах самостоятельной работы, сроках выполнения и формах контроля;
- разработка и выдача заданий для самостоятельной работы;
- проведение консультаций по вопросам выполнения заданий;
- контроль хода выполнения и результатов самостоятельной работы.

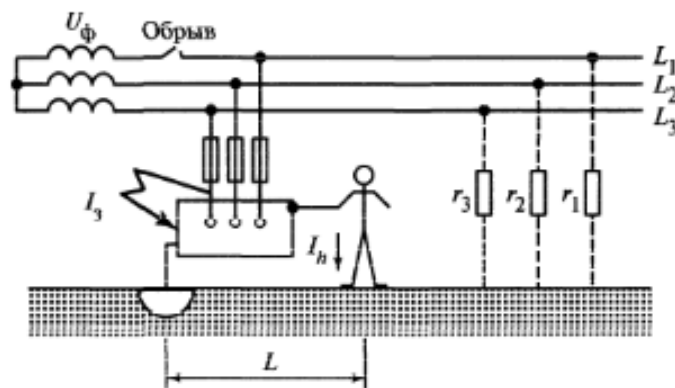
3. ТИПОВЫЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Ток I , равный 30 А , стекает с группового заземлителя, состоящего из трех одинаковых полушаровых электродов радиусом $0,5\text{ м}$, размещенных в вершинах равностороннего треугольника. Требуется определить потенциал группового заземлителя при расстояниях между центрами электродов S и удельном сопротивлении грунта равно $\rho\text{ Ом}\cdot\text{м}$ (земля однородная).



Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
расстояния между центрами электродов S, м	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
удельное сопротивление грунта равно ρ , Ом·м	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170

Задача 2. В трехфазной сети с изолированной нейтралью произошел обрыв фазы 1 в непосредственной близости от питающего трансформатора. В это же время возникло короткое замыкание фазы 3 на заземленный корпус электродвигателя, которого касался человек. Напряжение сети $U_n = 380$ В; сопротивление заземления корпуса потребителя электроэнергии 52 Ом; сопротивление изоляции фаз сети относительно земли r_1, r_2 ; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; удельное сопротивление земли 120 Ом·м; расстояние от человека до заземлителя 20 м.



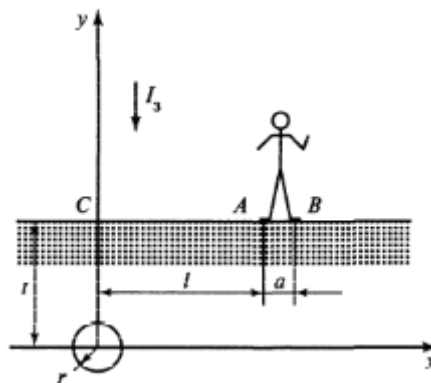
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r_1 , Ом	100	3000	520	5200	844	5220	5100	7000	800	9000
r_2 , Ом	100	2000	30000	200	6000	500	5000	8000	9000	8000

Задача 3. На территории промышленного предприятия в земле на небольшой глубине находится металлический предмет в форме шара большого размера, обладающий сравнительно малым сопротивлением стеканию с него тока.

В связи с этим было решено использовать этот предмет в качестве естественного заземлителя в системе существующего на данном предприятии защитного заземления. При этом была высказана необходимость предварительно проверить расчетом безопасность нахождения людей в непосредственной близости от участка расположения указанного естественного заземлителя.

Глубина погружения шара в землю t ; наибольшее значение тока I ; расчетное удельное сопротивление земли (с учетом коэффициента сезонности) 80 Ом м ; наименьшее расстояние от точки C до человека 2 м (меньшее расстояние невозможно из-за местных условий); длина шага человека $a = 0,8 \text{ м}$.

Требуется вычислить значение напряжения шага для человека, идущего по земле по прямой линии к точке C — месту входа провода в землю, а также потенциал заземлителя, во время стекания с него в землю тока.



Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина погружения шара в землю t , м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Наибольшее значение тока I , А	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Задача 3. Ток стекает в землю через стержневой заземлитель круглого сечения, погруженный в землю на глубину 3 м.

Требуется определить потенциал точки на поверхности земли, отстоящей от центра заземлителя на расстояние x , при токе I ; удельное сопротивление земли $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x , м	5	6	2	3	4	7	8	9	10	15
I , А	10	20	50	100	150	500	1000	1500	200	30

Задача 4. Определить энергию электрического поля промышленной частоты (50 Гц), поглощенную телом человека, работавшего в ОРУ в течение $t = 4$ ч, стоя непосредственно на земле в токопроводящей обуви без каких-либо средств защиты от воздействия электрического поля. При этом напряженность электрического поля на уровне высоты его роста составляла 5 кВ/м .

Рост человека a , масса его тела G , плотность тела $1,05 \text{ г/см}^3$; удельное электрическое сопротивление тела человека $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Следует заменить тело человека равной ему по высоте и объему половиной эллипсоида вращения (овоида) с полуосями a и b , стоящего так, что большая его полуось a перпендикулярна поверхности земли.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рост человека a , м	1.18	1.40	1.29	1.06	1.24	1.20	1.51	2.07	2.01	2.00
Масса тела человека G , кг	50	60	50	20	30	50	60	90	100	120

Задача 5. При подготовке воздушной линии электропередачи (ВЛ) к пофазному ремонту полагается устанавливать на отключенный (подлежащий

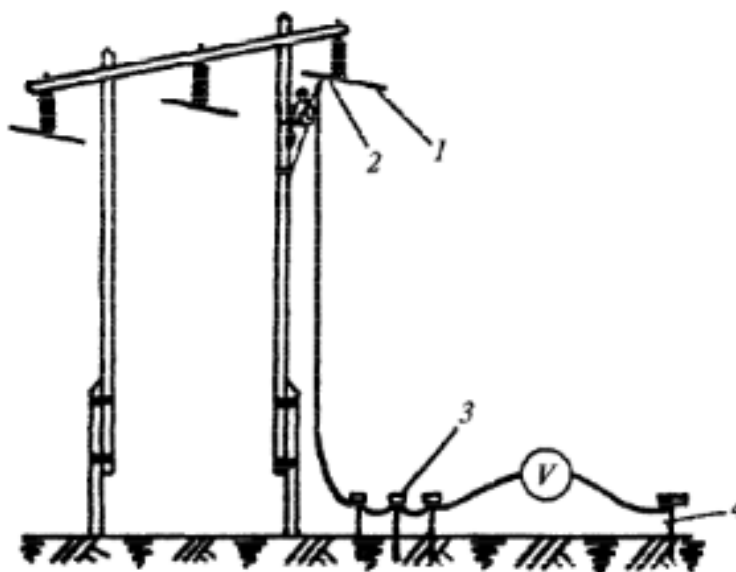
ремонту) провод два временных переносных заземления вблизи друг от друга. Это требование вызвано необходимостью обеспечить высокую степень надежности заземления провода, находящегося под электростатическим и магнитным влиянием оставшихся в работе проводов.

В данном случае одно из этих заземлений намечено присоединить к стационарному заземлителю стальной опоры ремонтируемой ВЛ, т.е. соединить провод с телом металлической опоры. Этот заземлитель, как показали испытания, обладает сопротивлением 26 Ом. Другое переносное заземление намечено установить на расстоянии нескольких метров от первого, где заземлителем будут служить вбитые в землю вертикальные электроды (стержни).

Напряжение ВЛ $U = 110$ кВ; допустимое напряжение прикосновения 42 В; длина отключенного провода $L_{\text{пр}}$; взаимная емкость между проводами $C_{ab} = 1,310^{-9}$ Ф/км; длина погруженной в землю части вертикального стержня (электрода) $L = 2$ м; диаметр стержня $d = 0,05$ м; расстояние между соседними вертикальными электродами, установленными в ряд, $S = 2$ м; удельное сопротивление земли ρ .

Требуется определить, каким сопротивлением должен обладать второй заземлитель, чтобы была обеспечена безопасность прикосновения монтера к отключенному проводу на участке выполнения работ, т.е. напряжение прикосновения не должно превышать допустимого правилами значения – 42 В; определить количество электродов, забиваемых в землю для устройства второго заземлителя, разместив их на одной прямой на одинаковом расстоянии друг от друга, например, 2 м.

Примечание. На практике защита обеспечивается одновременно как от статических, так и от магнитных наводок путем установки на всей длине провода лишь одного двойного заземления, описанного выше, при этом разрешается работать на отключенном проводе лишь в пределах до 20 м в каждую сторону от места его заземления.



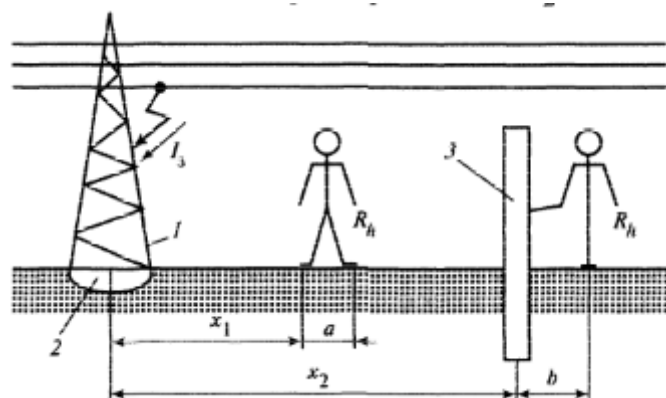
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина отключенного провода $L_{пр}$, км	50	60	70	80	90	100	110	120	130	150
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	90	100	80	110	120	130	140	150	200	240

Задача 6. На воздушной линии электропередачи (ВЛ) напряжением 35 кВ с металлическими решетчатыми опорами в результате наброса произошло замыкание одной фазы на тело опоры. При этом воздействию тока во время аварии подверглись два человека: первый, идущий вблизи опоры, на которой произошло замыкание, на расстоянии x_1 от оси опоры, и второй, касающийся металлической стойки забора 3, вбитой в землю и отстоящей от опоры на расстоянии x_2 .

Суммарная протяженность ВЛ 35 кВ, к которой относится и поврежденный участок L (кабельная сеть отсутствует); удельное сопротивление земли ρ ; длина шага человека $a = 0,8$ м; сопротивление тела человека $R_h = 1000$ Ом; расстояния: $x_1 = 2$ м; $x_2 = 4$ м; $b = 0,8$ м.

Требуется определить шаговое напряжение для первого человека и напряжение прикосновения для второго человека с учетом сопротивления основания, на котором стоит человек, а также потенциал стойки 3.

Ток с опоры в землю стекает через ее фундамент, представляющий собой бетонный параллелепипед, который будем считать токопроводящим и заменим металлическим полушаром.



Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Протяженность повреждённого участка L , км	100	200	500	400	150	90	80	60	40	250
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	110	115	110	210	200	100	220	240	90	100

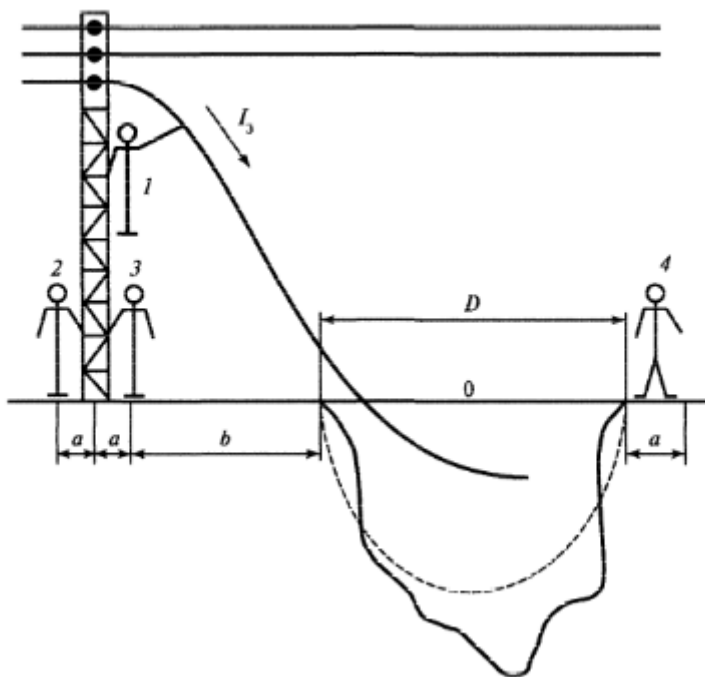
Задача 7. На воздушной электрической линии (ВЛ) 35 кВ с металлическими опорами, имеющей двухстороннее питание, произошел обрыв провода, конец которого упал в небольшой водоем (пруд). При этом воздействию тока подверглись четыре человека: 1 – человек, работающий на опоре, которую коснулся оборвавшийся провод; 2 и 3 – люди, касавшиеся в момент аварии металлического тела опоры; 4 – человек, идущий в непосредственной близости от водоема. Один из них был смертельно поражен

током. На его руке возник ожог и образовались электрические знаки в виде выпуклых круглых пятен темно-желтого цвета.

Суммарная длина электрической сети напряжением U , от которой питался поврежденный участок, равна 86 км, в том числе воздушной $L_{\text{в}} = 70$ км и кабельной $L_{\text{к}} = 16$ км; удельное сопротивление земли ρ ; сопротивление тела человека $R_{\text{ч}} = 1000$ Ом; размеры: $D - 4$ м, $a = 0,8$ м; $b - 2$ м.

Требуется определить значения напряжения прикосновения для людей 1, 3 и напряжение шага для человека 4 с учетом сопротивления основания каждого пострадавшего.

Форму водоёма следует принять в виде полусферы диаметром D , м.



Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	15	35	6	10	15	35	6	10
Удельное сопротивление земли ρ , Ом·м	110	115	110	210	200	100	220	240	90	100

4. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Шаровой заземлитель в земле на большой глубине
2. Шаровой заземлитель вблизи поверхности земли
3. Стержневой заземлитель
4. Определение сопротивления заземлителей растеканию тока методом электростатической аналогии
5. Распределение потенциала на поверхности земли при групповом заземлителе
6. Сопротивление группового заземлителя растеканию тока
7. Анализ опасности поражения током в однофазных электрических сетях
8. Анализ опасности поражения током в трехфазных электрических сетях
9. Чем обусловлена опасность для человека, находящегося рядом с высоковольтным оборудованием?
10. Какие факторы влияют на опасность человека, находящегося в зоне действия сильных электрических полей?
11. Как изменяется потенциал отключенного участка вдоль его длины при отключении одной из фаз? Как влияет длина участка на потенциал?
12. Напряжение прикосновения при одиночном и групповом заземлителях
13. Напряжение прикосновения при групповом заземлителе
14. Напряжение прикосновения с учетом падения напряжения в сопротивлении основания, на котором стоит человек
15. Напряжение шага
16. Напряжение шага при одиночном заземлителе
17. Напряжение шага при групповом заземлителе
18. Напряжение шага с учетом падения напряжения сопротивлении основания, на котором стоит человек

19. Как влияет заземление отключенной фазы на ток прикосновения к ней?
20. Что означает термин «сверхнизкое напряжение»? (ГОСТ 61140-2012)
21. Основополагающее правило защиты от поражения электрическим током. (ГОСТ 61140-2012)
22. Меры предосторожности для основной защиты от поражения электрическим током. (ГОСТ 61140-2012)
23. Методы идентификации выводов оборудования и проводников (IEC 60445:2010).
24. Идентификация посредством цвета (IEC 60445:2010).
25. Идентификация посредством графических обозначений (IEC 60445:2010).

5. КОНТРОЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Для оценки результатов освоения дисциплины используются задания для самостоятельной работы и вопросы для самопроверки. Задания для самостоятельной работы выполняются аспирантами индивидуально с целью приобретения умений применять теоретические модели на практике для решения прикладных задач. Индивидуальные задания выполняются в рамках предусмотренных программой типовых заданий для самостоятельной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многообразие факторов, влияющих на исход воздействия тока на человека, и многообразие ситуаций, возникающих при работе в электроустановках, предопределили тематическую направленность дисциплины. Для лучшего понимания условий, возникающих при работе с электроустановками, задач и получения их корректных решений приведены

теоретические положения электробезопасности. Задачи, рассмотренные в ходе изучения дисциплины, составлены с учетом результатов анализа несчастных случаев, имевших место на производстве или в быту.

Результаты освоения дисциплины будут использованы студентами не только при дальнейшем написании выпускной квалификационной работы, но и в профессиональной деятельности, связанной со взаимодействием с электрооборудованием. Глубокое теоретическое понимание сути явлений, определяющих влияние на опасности электротехнических комплексов, позволяет облегчить понимание нормативных требований и обеспечить безопасные условия труда будущим специалистам электроэнергетической отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература:

1. Электробезопасность. Теория и практика: учеб. пособие / П. А. Долин [и др.]. - Москва: МЭИ, 2008. - 270 с.

Дополнительная литература

1. Техника высоких напряжений: учеб. / В. Ф. Вазов, В. А. Лавринович. - Москва: ИНФРА-М, 2017. - 262 с.

2. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учеб. / А. Ф. Дьяков [и др.]: под ред. А. Ф. Дьякова. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: МЭИ, 2011. - 544 с.

3. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов / В. А. Андреев. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2006. - 639 с.

Локальный электронный методический материал

Илья Евгеньевич Кажекин

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Редактор И. Голубева

Уч.-изд. л. 4,7. Печ. л. 4,7.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1