

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

**Методические указания для самостоятельной и
контрольной работы**

Новосибирск 2021

Электробезопасность: метод. указания для самостоятельной и контрольной работы / Новосиб. гос. аграр. ун-т; Инженер. ин-т; сост.: А.Т. Калюжный, В.Г. Ляпин, Д.С. Болотов. – Новосибирск, 2021. – 20 с.

Авторы: канд. техн. наук ***А.Т. Калюжный***
канд. техн. наук, доцент ***В.Г. Ляпин***
аспирант ***Д.С. Болотов***

Рецензент: канд. техн. наук, доцент ***А.Ю. Кузнецов***

Методические указания предназначены для студентов НГАУ очной и заочной формы обучения по направлению подготовки: Агроинженерия, по профилю: Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе.

Утверждены и рекомендованы к изданию методическим советом Инженерного института (протокол №5 от 24 декабря 2020 г.).

© Новосибирский государственный аграрный университет, 2021

© Калюжный А.Т., Ляпин В.Г., Болотов Д.С.

ВВЕДЕНИЕ

Создание и широкое применение промышленного электричества началось чуть более 100 лет назад, и сейчас без него невозможно представить жизнь современного человека. Но электрическая энергия с одинаковым успехом способна как выполнять полезную работу, так и причинять вред материальным ценностям, здоровью и жизни людей или животных [1-3]. Опасность электрической энергии возрастает в связи с тем, что она не имеет ни запаха, ни цвета, не обнаруживается органами чувств человека, пока он не окажется пораженным. С другой стороны, электрическая энергия может обладать большой мощностью, способной в доли секунды вызвать значительные разрушения, в том числе тканей живых организмов.

Поражающими факторами электричества могут стать не только электрический ток, но также электрическая дуга или переменное электромагнитное поле, которое вызывает в проводниках ток индукции. Под действием электрического тока, протекающего через тело человека или животного, происходят нагрев тела вследствие выделения джоулевой теплоты ($P=I^2R$), непроизвольное сокращение мышц (фибрилляция), повреждение нервных клеток, электролиз крови.

Установлено, что при электротравмах страдают не только отдельные органы человека, подвергшиеся действию электрического тока, но и вся центральная нервная система, что иногда приводит к внезапной смерти пострадавшего после, казалось бы, успешного лечения. Опасность такого исхода особенно велика, если в цепи тока оказались т.н. «акупунктурные зоны», обладающие пониженным по сравнению с другими участками кожи сопротивлением. Поэтому человека, перенесшего даже легкую электротравму, следует считать тяжелым больным, требующим длительного медицинского контроля. Подтверждением этому является статистика - электротравматизм составляет 2-3% от производственного травматизма, но в то же время дает 12-18% всех смертельных случаев.

Следовательно, к обеспечению электробезопасности следует подходить со всей серьезностью, без неуважительного легкомыслия, т.е. соблюдать установленные правила и нормы, поскольку они составлены и приняты к исполнению во избежание повторений имевших место несчастных случаев. Основные нормы и правила, которые должен соблюдать электротехнический персонал, изложены в ряде официальных документов [4-8]:

Правила устройства электроустановок, издания 7 и 6;

Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, утвержденные приказом №6 Минэнерго от 13.02.2003 г.;

Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ РМ-016-2001, РД-153-34.0-03.150-00.

Особое внимание следует обратить на внедряемые и разрабатываемые технику и электротехнологии [9-11]. В частности в мобильных электротехнологических установках оператор в процессе обработки находится в кабине трактора, а в лабораторных комплексах - в соседнем помещении из которого ведется управление установкой. В подобных ситуациях обеспечение безопасности может быть достигнуто путем исключения воздействия опасных и вредных факторов на персонал, занятый обслуживанием, эксплуатацией или ремонтом этого оборудования. К числу воздействий относятся собственно электрический ток и создаваемые при выработке генератором, преобразовании источником вторичного питания и потреблении обрабатываемой средой (растительностью, почвой) электроэнергии, электрическое, магнитное и тепловое поля, шум, ультразвук, вибрации и т.д. Кроме того, на человека при электротехнологической обработке могут воздействовать ультрафиолетовое и ионизирующее излучения, он может быть поражен опасными факторами пожара и т.п. Такие факторы необходимо учитывать при разработке системы электробезопасности подобных систем и комплексов.

После освоения дисциплины студенты должны иметь следующие компетенции:

- способность обеспечивать выполнение правил техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и норм охраны труда и природы;
- готовность к профессиональной эксплуатации машин и технологического оборудования и электроустановок.

1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ, ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Краткое содержание темы 1, вопросы для самопроверки

Тема 1. Действие электрического тока на человека и животных

Краткое содержание: *Электролитическое и биологическое действие электрического тока на организм человека. Виды электротравм. Изменение степени тяжести электротравм в зависимости от величины электрического тока, протекающего через организм человека и от направления его прохождения через организм человека.*

Вопросы для самопроверки

1. Термическое действие электрического человека на организм человека.
2. Факторы, оказывающие влияние на исход поражения электрическим током человека.
3. Ток ощущения, фибрилляционный и неотпускающий ток.
4. Электрический удар, электрофтальмия.
5. Опасность поражения электрическим током в зависимости от его частоты и вида (постоянный и переменный).

Краткое содержание темы 2, вопросы для самопроверки

Тема 2. Оказание первой помощи пострадавшим от тока

Краткое содержание: *Освобождение пострадавшего от действия тока. Определение состояния пострадавшего. Оказание первой доврачебной помощи (для пострадавшего в сознании, для пострадавшего в бессознательном состоянии).*

Вопросы для самопроверки

1. Освобождение пострадавшего от действия тока человека, поражённого током, соприкасающегося с токоведущими частями.
2. Определение наличия дыхания у пострадавшего от действия электрического тока.
3. Определение наличия пульса у пострадавшего от действия электрического тока.
4. Основные действия по оказанию доврачебной медицинской помощи пострадавшему от действия электрического тока, находящемуся в сознании.
5. Основные действия по оказанию доврачебной медицинской помощи пострадавшему от действия электрического тока, находящемуся в бессознательном состоянии.

Краткое содержание темы 3, вопросы для самопроверки

Тема 3. Основные термины электроэнергетики

Краткое содержание: *Термины, характеризующие класс помещения (сухие, влажные, сырые и др.). Термины, характеризующие заземление и зануление (заземлитель, заземление, главная заземляющая шина и др.).*

Вопросы для самопроверки

1. Влажные, сухие и сырые помещения и их особенности.
2. Помещения без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные.
3. Заземление и его составные части.

Краткое содержание темы 4, вопросы для самопроверки

Тема 4. Требования к электроустановкам и их персоналу

Краткое содержание: *Структура персонала с точки зрения электробезопасности. Требования к лицам, претендующим на группу по электробезопасности. Классификация оборудования по системе IP и др.*

Вопросы для самопроверки

1. Электротехнологический, неэлектротехнический, административно-технический, оперативно-ремонтный, оперативный, ремонтный персонал.
3. Значение первой и второй цифр из классификации электрооборудования по системе IP.
4. Проверка знаний по электробезопасности у персонала предприятия.

Краткое содержание темы 5, вопросы для самопроверки

Тема 5. Правила проведения работ в электроустановках

Краткое содержание: *Организационные мероприятия. Технические мероприятия.*

Вопросы для самопроверки

1. Что включают в себя организационные мероприятия по электробезопасности.
2. Перечень лиц отвечающих за безопасное ведение работ в электроустановках.
3. Основное содержание технических мероприятий обеспечивающих безопасность ведения работ в электроустановках.

Краткое содержание темы 6, вопросы для самопроверки

Тема 6. Методика визуального осмотра электроустановок

Краткое содержание: *Цели визуального осмотра электрооборудования. Общие требования к состоянию электрооборудования.*

Вопросы для самопроверки

1. Для чего проводят визуальный осмотр электроустановок.
2. Какие параметры проверяют при визуальном осмотре электроустановок.
3. Какие требования предъявляются к состоянию элементов электрооборудования.

Краткое содержание темы 7, вопросы для самопроверки

Тема 7. Сертификационные испытания электрооборудования

Краткое содержание: *Измерение сопротивления заземления. Измерение параметров цепи «фаза-ноль». Определение сопротивления изоляции электропроводки. Проверка УЗО. Защитное заземление и его эффективность. Порядок выбора защитно-коммутационной аппаратуры.*

Вопросы для самопроверки

1. Каким оборудованием и по какой методике определяют сопротивление заземления.
2. Методика и приборное обеспечение для измерения параметров цепи «фаза-ноль».
3. Как определяют сопротивление изоляции электропроводки в помещениях.
4. Особенности проверки работоспособности УЗО.

Краткое содержание темы 8, вопросы для самопроверки

Тема 8. Правила пользования ручным электроинструментом

Краткое содержание: *Требования к персоналу, использующему электроинструмент. Особенности применения электроинструмента в помещениях различных классов. Применение электроинструмента при работах на высоте и д.р.*

Вопросы для самопроверки

1. Какая категория персонала может использовать электроинструмент в процессе выполнения своей работы.

2. Применение электроинструмента в помещениях без опасных факторов, в помещениях с повышенной опасностью, а так же в особо опасных помещениях.

3. Какие параметры электроинструмента необходимо проверить перед началом работы с ним.

Краткое содержание темы 9, вопросы для самопроверки

Тема 9. Правила пользования средствами защиты

Краткое содержание: *Перечень средств защиты для работы в электроустановках до и выше 1000 В и особенности их использования. Основные и дополнительные средства защиты.*

Вопросы для самопроверки

1. Основные средства защиты в электроустановках до 1000 В.
2. Дополнительные средства защиты в электроустановках до 1000 В.
3. Основные средства защиты в электроустановках выше 1000 В.
4. Дополнительные средства защиты в электроустановках выше 1000 В.
5. Какие параметры средств защиты необходимо проверить перед началом работ с их использованием.

Ниже приводится краткий обзор типовых задач по вычислению напряжения прикосновения и шагового напряжения стационарных и мобильных электроустановок и задания для выполнения расчётно-графической работы.

2. ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ И ШАГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. Напряжение прямого прикосновения в трехфазной сети IT

В симметричной трехфазной сети ток через изоляцию на землю зависит от фазного напряжения U , активного сопротивления изоляции $R_{из}$ и емкости C фазы относительно земли. Активный ток утечки через изоляцию $I_R=U/R_{из}$, ток утечки через емкость C зависит от частоты f напряжения сети: $I_C=U/X_C=U\omega C$, где $\omega=2\pi f$ – круговая частота напряжения сети.

На векторной диаграмме ток I_R по фазе совпадает с напряжением U сети, а ток I_C – опережает напряжение на 90° (рис. 1). Поэтому полный ток фазы на землю $I_\Sigma=\sqrt{I_R^2 + I_C^2} = I_{из}$.

В нормальном режиме сопротивление изоляции проводов Z много больше сопротивления тела человека R_h , которое примем равным нулю. Тогда при касании человеком, например, фазы А, потенциал этой фазы станет равным потенциалу земли, т.е. нулю, а потенциалы фаз В или С

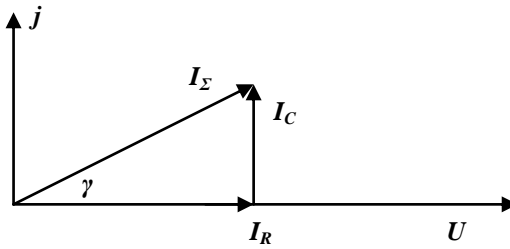


Рис. 1

возрастут до векторной суммы напряжений фазы А и В или С. Сказанное поясняется рис. 2а, где U_A, U_B, U_C – исходные напряжения фаз А, В, С; $\varphi_{A1}, \varphi_{B1}, \varphi_{C1}$ – потенциалы фаз А, В, С при замыкании провода А на землю.

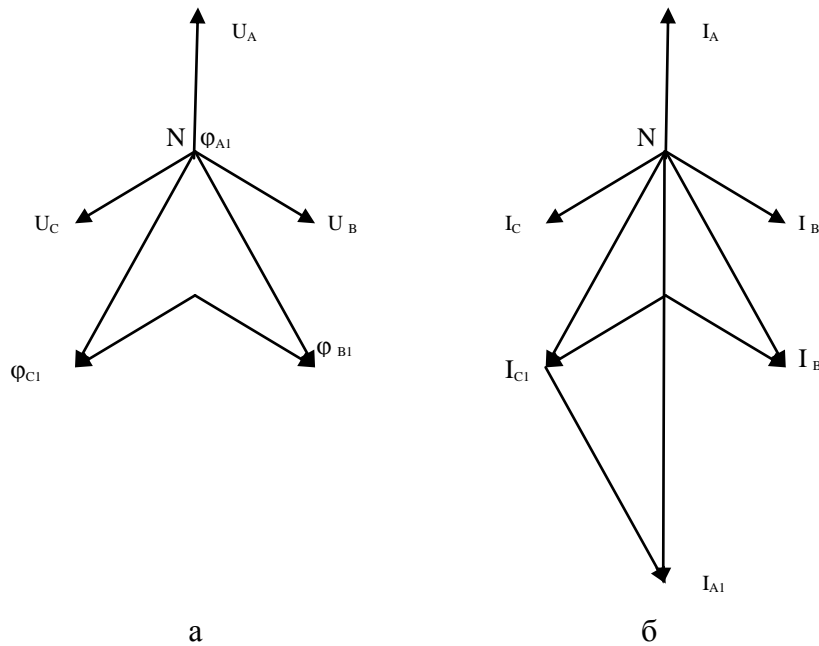


Рис. 2

Из геометрических построений рис. 2б (I_{B1} и I_{C1} – токи фаз В и С при замыкании провода А на землю; I_{A1} – суммарный ток фаз В и С, т.е. ток фазы А на землю) видно, что отрезок NI_{A1} в 3 раза больше отрезков $NU_C=NU_B$, пропорциональных токам утечки на землю в нормальном режиме I_C и I_B , т.е. ток через человека

$$I_h = 3U/Z = 3I_{uz}.$$

Поскольку реально сопротивление тела человека ненулевое, потенциал фазы А будет отличаться от нуля, в результате чего ток через человека будет описываться уравнением $I_h = U/(Z/3 + R_h)$.

Пример 1. Пусть в сети ИТ 380/220В сопротивление изоляции $R_{uz}=30$ кОм, а емкость фазных проводов относительно земли $C=0,1$ мкФ. Определить ток прямого прикосновения при $R_h=1$ кОм.

Решение. Активный ток утечки на землю

$$I_R = U/R_{uz} = 220/30 = 7,333 \text{ мА.}$$

Емкостной ток утечки на землю

$$I_C = U\omega C = 220 \cdot 314 \cdot 10^{-7} = 6,91 \text{ мА.}$$

Полный ток утечки на землю

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{53,77 + 47,72} = 10 \text{ мА.}$$

Полное сопротивление утечки через изоляцию провода

$$Z = U/I_{\Sigma} = 220/10 = 22 \text{ кОм.}$$

Ток через тело человека при прямом прикосновении

$$I_h = U/(Z/3 + R_h) = 220/(7,333 + 1) = 26,4 \text{ мА.}$$

2.2. Напряжение косвенного прикосновения в аварийной сети IT

Косвенное прикосновение имеет место при касании человеком корпуса электрооборудования с поврежденной изоляцией. Поскольку корпус заземлен, причем сопротивление заземления много меньше сопротивления изоляции неповрежденных фазных проводов и сопротивления тела человека, то потенциал корпуса будет близок к нулю. Так, в рассмотренном выше примере при коротком замыкании (КЗ) фазы А на корпус ток $I_{кз}$ составит 30 мА (утроенное значение тока утечки в исправном состоянии). Если сопротивление заземления оборудования R_z , например, 100 Ом, то напряжение косвенного прикосновения

$$U_{кн} = R_z \cdot I_{кз} = 100 \cdot 0,03 = 3 \text{ В.}$$

2.3. Напряжение прямого прикосновения в аварийной сети IT

Поскольку при замыкании одной из фаз на землю потенциалы остальных фаз возрастают в $\sqrt{3}$ раз (рис. 2а), то прямое касание к ним весьма опасно, поскольку к человеку в этом случае прикладывается практически линейное напряжение 380 В. Незначительное снижение напряжения за счет падения напряжения на сопротивлении заземления практически не оказывает влияния на тяжесть поражения электрическим током.

2.4. Напряжение прямого прикосновения в исправной трехфазной сети TT

При прямом прикосновении в сети TT ток через тело человека

$$I_h = U/(R_h + R_o),$$

где R_o – сопротивление заземления источника тока.

$$\text{Напряжение прикосновения} \quad U_{нн} = I_h \cdot R_h = U \frac{R_h}{R_h + R_o}.$$

Поскольку $R_h \gg R_o$, напряжение прикосновения практически равно фазному напряжению сети.

2.5. Напряжение прикосновения в аварийной трехфазной сети TT

При замыкании фазы на землю протекает ток заземления

$$I_z = U/(R_z + R_o).$$

При этом напряжение прикосновения к поврежденной фазе равно потенциалу поврежденной фазы

$$U_{кн} = I_3 \cdot R_3 = U \frac{R_3}{R_3 + R_0}.$$

Если $R_0=0$, то напряжение косвенного прикосновения равно фазному напряжению сети. Если же $R_0=\infty$, то имеем рассмотренную выше сеть IT.

Напряжение прямого прикосновения к неповрежденной фазе также зависит от сопротивления R_0 заземления источника питания. Если $R_0=0$, то напряжение прикосновения равно фазному. Однако по мере увеличения отношения R_0/R_3 напряжение прямого прикосновения растет, достигая линейного значения при $R_3=0$. При конечных значениях сопротивлений R_0 и R_3 напряжение прямого прикосновения можно рассчитать по формуле

$$U_{nn} = \sqrt{(0,5U + I_3 R_0)^2 + 0,75U^2},$$

которая выводится из построений рис. 2а при расположении точки ϕ_{A1} между U_A и N.

2.6. Напряжение прямого прикосновения в сети TN

При прямом прикосновении к двум фазам в сети TN, как и во всех остальных, человек оказывается под действием линейного напряжения 380 В. При однофазном прикосновении (человек под действием фазного напряжения 220 В) наличие заземления электрооборудования не сказывается на тяжести поражения током.

2.7. Аварийный режим сети TN

Наиболее вероятным аварийным режимом сети TN является замыкание фазного провода на зануленный корпус электрооборудования. В этом случае ток короткого замыкания

$$I_{кз} = U/R_{\phi-o},$$

где $R_{\phi-o}$ – сопротивление цепи фаза-ноль источника тока.

Согласно требованию Правил устройства электроустановок, в групповых сетях проводимость нулевого защитного проводника должна равняться проводимости фазного. При этом $R_{\phi-o}$ равно удвоенному значению сопротивления защитного проводника, а потенциал в месте КЗ

$$\phi_{кз} = I_{кз} \cdot R_{pe} = U \cdot R / 2R = U/2.$$

Таким образом, напряжение косвенного прикосновения не превышает половины фазного, если сопротивление нулевого защитного проводника не превышает сопротивление линейного. Наличие дополнительного заземления оборудования способно лишь незначительно снизить потенциал места КЗ за счет проводимости земли, т.е. протекания части тока по цепи заземлитель электрооборудования – земля – заземлитель источника.

2.8. Расчет сопротивления заземления

Сопротивление R_3 единичных заземлителей определяют по нижеприведенным формулам.

1. Шаровой в земле $R_3 = \frac{\rho}{2\pi D} \left(1 + \frac{D}{4t} \right)$.
2. Полушаровой у поверхности земли $R_3 = \rho / \pi D$.
3. Вертикальная труба до поверхности земли $R_3 = \frac{\rho}{2\pi \ell} \ln \frac{4\ell}{d}$.
4. Вертикальная труба на глубине t (до середины трубы)

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi \ell} \left(\ln \frac{2\ell}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + \ell}{4t - \ell} \right)$$
5. Горизонтальная труба на поверхности земли $R_3 = \frac{\rho}{\pi \ell} \ln \frac{2\ell}{d}$.
6. Горизонтальная труба на глубине t $R_3 = \frac{\rho}{2\pi \ell} \ln \frac{\ell^2}{dt}$.
7. Круглая пластина на поверхности земли $R_3 = \rho / 2D$.
8. Пластина $a \cdot b$, поставленная в земле на ребро $R_3 = 0,25 \sqrt{ab}$.
9. Горизонтальная полоса $R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bt}$.

В этих формулах:

ρ – удельное сопротивление грунта;

l – длина стержня или полосы;

d – диаметр электрода;

t – глубина от поверхности земли до середины электрода;

D – диаметр пластины или (полу)сферы,

b – ширина горизонтальной полосы.

2.9. Определение потенциала земли вблизи заземлителя

Потенциал заземлителя и соприкасающегося с ним слоя земли равен произведению тока заземлителя на его сопротивление растеканию тока $\varphi = I_3 R_3$. По мере удаления от заземлителя потенциал земли снижается вследствие падения напряжения в земле при протекании тока заземлителя. Потенциал земли φ_3 при протекании в ней тока I_3 равен падению напряжения в земле снаружи от эквипотенциальной поверхности, на которой расположена точка измерения потенциала. На расстояниях от заземлителя, превышающих его наибольший размер, эквипотенциальные поверхности образуют полусферы, поэтому для определения потенциала земли можно пользоваться формулой для полусферического заземлителя. Так, если $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и ток $I = 10 \text{ А}$ вертикального заземлителя $l = 3 \text{ м}$, то потенциал на поверхности земли на расстоянии $r = 5 \text{ м}$ от заземлителя будет

$$\varphi = \rho I / \pi r = 100 \cdot 10 / (3,14 \cdot 5) = 63,7 \text{ В.}$$

В то же время сопротивление заземлителя диаметром $0,03 \text{ м}$

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi \ell} \ln \frac{4\ell}{d} = \frac{100}{6,28} \ln \frac{4 \cdot 3}{0,03} = 95,4 \text{ Ом,}$$

а его потенциал $\varphi_3=10 \cdot 95,4=954$ В.

Пусть напряжение U приложено между двумя полусферическими заземлителями с диаметрами D_1 и D_2 , удельное сопротивление грунта ρ . Тогда сопротивление растеканию тока первого заземлителя $R_1=\rho/\pi D_1$, а второго – $R_2=\rho/\pi D_2$. Если расстояние между заземлителями на несколько порядков превышает их диаметры, ток заземлителей

$$I_3=U/(R_1+R_2).$$

При этом потенциалы электродов обратно пропорциональны их диаметрам и противоположны по знаку:

$$\varphi_1=U \frac{R_1}{R_1+R_2} = U \frac{\rho}{\pi D_1 \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)} = U \frac{D_2}{D_2+D_1}; \quad \varphi_2=-U \frac{D_1}{D_1+D_2}.$$

Пусть расстояние между центрами полусфер равно $2a$, тогда потенциал в средней точке между заземлителями от протекания тока электрода 1

$$\varphi_{a1} = I_3 \rho / \pi a,$$

а от протекания тока электрода 2 $\varphi_{a2} = -I_3 \rho / \pi a$.

Потенциал – скалярная величина, поэтому результирующее значение потенциала в средней точке между заземлителями

$$\varphi_a = \varphi_{a1} + \varphi_{a2} = I_3 \rho / \pi a - I_3 \rho / \pi a = 0$$

не зависит от их размеров, т.е. сопротивлений растеканию тока. Это важное положение позволяет на практике обнаруживать точку с нулевым потенциалом, не удаляясь от заземлителей на бесконечность.

При уменьшении расстояния $2a$ между заземлителями каждый из них окажется в зоне растекания тока второго заземлителя. Итогом этого станет увеличение тока каждого заземлителя, поскольку он будет протекать под действием разности потенциалов данного заземлителя и потенциала земли, создаваемого током второго заземлителя.

Пример 2. Напряжение $U=10$ В приложено между двумя полусферическими заземлителями с расстоянием между центрами $2a=2$ м и диаметрами $D_1=D_2=1$ м, удельное сопротивление грунта $\rho=62,8$ Ом·м. Найти электрические параметры заземлителей.

Решение. Сопротивление заземлителей $R_3=\rho/\pi D=20$ Ом.

Ток заземлителей без учета взаимного влияния $I_3=U/(2R_3)=0,25$ А.

Потенциал, создаваемый возле каждого заземлителя током второго заземлителя, $\Delta\varphi=(I\rho)/(2\pi a)=0,25 \cdot 62,8/(2 \cdot 3,14 \cdot 1)=2,5$ В.

Фактический ток заземлителей $I_3=(U+2\Delta\varphi)/(2R_3)=15/40=0,375$ А.

Фактическое сопротивление каждого заземлителя $R_\phi=0,5U/I=13,3$ Ом.

2.10. Сопротивление группового заземлителя

Групповой заземлитель (ГЗ) состоит из нескольких электродов, включенных параллельно, т.е. находящихся под одним потенциалом. Если сопротивление растеканию тока одиночного электрода R , а расстояние меж-

ду ними много больше их наибольшего размера, то суммарное сопротивление ГЗ, состоящего из n электродов, будет в n раз меньше, т.е. $R_{гз} = R/n$.

Но если каждый электрод ГЗ находится в зоне растекания тока соседних электродов, то его эффективность снижается, поскольку ток данного электрода определяется не полным потенциалом ГЗ, а разностью потенциалов ГЗ и земли в месте нахождения электрода. Степень снижения эффективности электродов ГЗ определяется расстоянием между ними, взаимным расположением и количеством. Значения коэффициентов использования вертикальных электродов группового заземлителя в зависимости от расстояния x между электродами, приведены в табл. 1, горизонтальных – в табл. 2.

Таблица 1

Коэффициент эффективности вертикальных электродов

| x/l | Число электродов | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 | 20 | 40 | 60 | 100 |
| Размещение электродов в ряд | | | | | | | | |
| 1 | 0,85 | 0,73 | 0,65 | 0,59 | 0,48 | - | - | - |
| 2 | 0,91 | 0,83 | 0,77 | 0,74 | 0,67 | - | - | - |
| 3 | 0,94 | 0,89 | 0,85 | 0,81 | 0,76 | - | - | - |
| Размещение электродов по контуру | | | | | | | | |
| 1 | - | 0,69 | 0,61 | 0,56 | 0,47 | 0,41 | 0,39 | 0,36 |
| 2 | - | 0,78 | 0,73 | 0,66 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,52 |
| 3 | - | 0,85 | 0,80 | 0,76 | 0,71 | 0,66 | 0,64 | 0,62 |

Таблица 2

Коэффициент эффективности соединительных полос

| x/l | Число электродов | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 | 20 | 40 | 60 | 100 |
| Размещение электродов в ряд | | | | | | | | |
| 1 | 0,85 | 0,77 | 0,72 | 0,62 | 0,42 | - | - | - |
| 2 | 0,94 | 0,84 | 0,80 | 0,75 | 0,56 | - | - | - |
| 3 | 0,96 | 0,92 | 0,88 | 0,82 | 0,68 | - | - | - |
| Размещение электродов по контуру | | | | | | | | |
| 1 | - | 0,45 | 0,40 | 0,34 | 0,27 | 0,22 | 0,2 | 0,19 |
| 2 | - | 0,55 | 0,48 | 0,40 | 0,32 | 0,29 | 0,27 | 0,23 |
| 3 | - | 0,70 | 0,64 | 0,56 | 0,45 | 0,39 | 0,36 | 0,33 |

Пример 3. Вертикальные стержни длиной $l = 5$ м диаметром $d = 2$ см соединены перемычками из таких же прутков. Расстояние между стержнями в ряду $b = 5$ м, расстояние от поверхности земли до стержней $t_0 = 0,7$ м. Удельное сопротивление земли $\rho = 100$ Ом•м. Пусть требуется рассчитать ГЗ с сопротивлением растекания току $R_{гз доп}$ не более 4 Ом.

Решение. Сопротивление одиночного вертикального электрода

$$R_3 = \frac{\psi\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{2\ell}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + \ell}{4t - \ell} \right) = \frac{1,3 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 5} \left(\ln \frac{10}{0,02} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 3,2 + 5}{4 \cdot 3,2 - 5} \right) = 27,43 \text{ Ом.}$$

где t - расстояние от поверхности грунта до середины вертикального электрода ($t = (l/2) + t_0 = (5/2) + 0,7 = 3,2$ м);

где ψ – коэффициент сезонности для климатической зоны III при нормальной влажности = 1,3 для вертикального заземлителя;

Ориентировочное количество вертикальных стержней

$$n = R_{\text{з}} / R_{\text{з доп}} = 27,43 / 4 = 6,8 \approx 7 \text{ шт.}$$

Сопrotивление шести вертикальных стержней при коэффициенте использования $k_{\text{в}} \approx 0,64$

$$R_{\text{в}} = R_{\text{з}} / (n \cdot k_{\text{в}}) = 27,43 / (7 \cdot 0,64) = 6,12 \text{ Ом.}$$

Сопrotивление всей горизонтальной полосы без учета вертикальных стержней

$$R_{\text{г}} = \frac{\psi \rho}{2\pi l_{\text{полосы}}} \ln \frac{2l_{\text{полосы}}^2}{dt_0} = \frac{2 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \ln [2 \cdot 30^2 / (0,02 \cdot 0,7)] = 12,48 \text{ Ом,}$$

где ψ – коэффициент сезонности для климатической зоны III при нормальной влажности = 2 для горизонтального заземлителя;

$l_{\text{полосы}}$ – длина горизонтальной полосы ($l_{\text{полосы}} = b \cdot (n-1) = 5 \cdot (7-1) = 30 \text{ м}$).

Сопrotивление результирующее горизонтальной полосы с учетом коэффициента использования.

$$R_{\text{г рез.}} = R_{\text{г}} / k_{\text{г}} = 14,52 / 0,72 = 17,35 \text{ Ом.}$$

Сопrotивление группового заземлителя

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{в}} \cdot R_{\text{г рез.}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{г рез.}}} = \frac{6,12 \cdot 17,35}{6,12 + 17,35} = 4,52 \text{ Ом,}$$

что не удовлетворяет условиям задачи, поскольку $R_{\text{з}} > 4 \text{ Ом}$.

Для приведения сопротивления группового заземлителя $R_{\text{з}}$ к допустимой величине необходимо увеличить количество вертикальных стержней с 7 до 10 шт.

Сопrotивление всей горизонтальной полосы с учётом увеличения количества вертикальных стержней с 7 до 10 шт.

$$R_{\text{г}} = \frac{\psi \rho}{2\pi l_{\text{полосы}}} \ln \frac{2l_{\text{полосы}}^2}{dt_0} = \frac{2 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot (7-1))} \ln [2 \cdot (45)^2 / (0,02 \cdot 0,7)] = 8,89 \text{ Ом,}$$

Сопrotивление семи вертикальных стержней при коэффициенте использования $k_{\text{в}} = 0,635$

$$R_{\text{в рез.}} = R_{\text{з}} / (n \cdot k_{\text{в}}) = 23,4 / (10 \cdot 0,59) = 3,9 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{г рез.}} = R_{\text{г}} / k_{\text{г}} = 8,89 / 0,62 = 14,33 \text{ Ом.}$$

Сопrotивление группового заземлителя

$$R_{\text{з}} = \frac{R_{\text{в рез.}} \cdot R_{\text{г рез.}}}{R_{\text{в рез.}} + R_{\text{г рез.}}} = \frac{3,9 \cdot 14,33}{3,9 + 14,33} = 3,065 \text{ Ом,}$$

что удовлетворяет условиям задачи, поскольку $R_{\text{з}} < 4 \text{ Ом}$.

2.11. Напряжение прикосновения с учетом потенциала земли

Пример 4. Светильник наружного освещения закреплен на металлической опоре, нижняя часть которой выполнена из трубы диаметром $d_m = 0,15 \text{ м}$, заглублена в землю на $l = 1 \text{ м}$ по центру бетонного цилиндра диамет-

ром 0,45м. Удельное сопротивление бетона $\rho_b=50$ Ом•м, земли $\rho_z=150$ Ом•м. Сеть TN-C, зануление опоры отсутствует. При повреждении изоляции светильника опора оказалась под напряжением $U_c=220$ В. Определить напряжение прикосновения к опоре при расстоянии между ней и ногами человека 0,4м при наличии и отсутствии бетонного крепления опоры.

Решение. Сопротивление растеканию тока слоя бетона толщиной $(0,45-0,15)/2=0,15$ м

$$R_b = \frac{\rho_b}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_T} - \frac{\rho_b}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_3} = \frac{50}{6,28} \left(\ln \frac{4}{0,15} - \ln \frac{4}{0,45} \right) = 8,75 \text{ Ом.}$$

Сопротивление растеканию тока земли

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_3} = \frac{150}{6,28} \ln \frac{4}{0,45} = 52,2 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление растеканию тока

$$R_{\Sigma} = R_b + R_z = 8,75 + 52,2 = 60,95 \text{ Ом.}$$

Пренебрегая сопротивлением заземления источника питания, определим $I_{кз}$ на землю:

$$I_{кз} = 220/60,95 = 3,61 \text{ А.}$$

Падение напряжения в слое бетона

$$\Delta U_b = R_b \cdot I_{кз} = 8,75 \cdot 3,61 = 31,59 \text{ В.}$$

Потенциал земли на расстоянии $r = 0,475$ м от центра опоры

$$\varphi_z = I_{кз} \cdot R = I_{кз} \cdot \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{2\pi r} = 3,61 \frac{150}{6,28} \ln \frac{4}{6,28 \cdot 0,475} = 25,2 \text{ В.}$$

Напряжение прикосновения $U_{np} = U_c - \varphi_z = 220 - 25,2 = 194,8 \text{ В.}$

При отсутствии бетонного слоя сопротивление заземления опоры

$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_3} = \frac{150}{6,28} \ln \frac{4}{0,15} = 87,4 \text{ Ом.}$$

Ток короткого замыкания на землю $I_{кз} = 220/87,4 = 2,517 \text{ А.}$

Потенциал земли на расстоянии 0,475м от центра опоры

$$\varphi_z = I_{кз} \cdot \frac{\rho_z}{2\pi l} \ln \frac{4l}{2\pi r} = 2,517 \frac{150}{6,28} \ln \frac{4}{6,28 \cdot 0,475} = 17,58 \text{ В.}$$

Напряжение прикосновения $U_{np} = 220 - 17,58 = 202,42 \text{ В.}$

2.12. Напряжение прикосновения с учетом сопротивления основания

В приведенном выше примере напряжение прикосновения 202,42 В прикладывается между рукой человека и землей. Ток протекает как через тело человека, так и через основание, на котором стоит человек (обувь). Если принять сопротивление тела человека $R_h = 1$ кОм, а основания $R_{осн} = 5$ кОм, тогда ток через тело человека

$$I_h = U_{np} / (R_h + R_{осн}) = 202,42 / (1 + 5) = 33,73 \text{ мА.}$$

Фактическое значение напряжения прикосновения

$$U_{np.факт} = I_h \cdot R_h = 1 \cdot 33,73 = 33,73 \text{ В.}$$

3. ЗАДАНИЯ К РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Учебным планом предусматривается одна самостоятельная контрольная работа. Прежде чем приступить к ее выполнению, необходимо изучить весь программный материал дисциплины и проанализировать особенности решений задач, приведенных в данных методических указаниях. При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования.

1. Выполняемый вариант должен соответствовать последней цифре учебного шифра студента. Работа, выполненная не по своему варианту, не учитывается и возвращается студенту без оценки.

2. Выполнение работы следует начинать с изучения методических указаний.

3. При выполнении расчетов необходимо приводить формулу, а затем вычисления в развернутом виде, обязательно указывать размерность получаемых величин.

4. Чертежи, схемы, графики, эскизы следует выполнять в соответствии с требованиями ЕСКД.

5. В пояснительной записке следует оставлять поля для замечаний.

6. На обложке работы должны быть указаны наименование дисциплины, фамилия и инициалы студента, номер группы, шифр.

7. В конце работы следует указать литературу, которой пользовался студент, проставить дату выполнения работы и подпись.

8. Если были допущены недочеты и ошибки, то после возвращения расчётно-графической работы её дорабатывают в соответствии с указаниями преподавателя, сделанными в рецензии. Дорабатывать следует в той же пояснительной записке после замечаний преподавателя.

Задание 1. По заданным в таблице 3 активной мощности P (кВт), углу φ между током и напряжением (градусов), коэффициент полезного действия η , длине линии L (м) выполнить расчет схемы электропитания 380/220 В трехфазного асинхронного электродвигателя:

- определить ток проводов I_{φ} ;
- выбрать питающий кабель;
- определить сопротивление цепи фаза-ноль $R_{\varphi-0}$;
- определить ток короткого замыкания электродвигателя $I_{к.з.}$;
- выбрать коммутационно-защитную аппаратуру.

Таблица 3

Начальные условия для задания 1

| № варианта | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|------|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|------|
| P , кВт | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 120 |
| φ | 60 | 60 | 60 | 50 | 45 | 45 | 30 | 30 | 25 | 20 |
| η | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,9 | 0,94 | 0,94 |
| L , м | 150 | 150 | 150 | 100 | 75 | 70 | 65 | 50 | 45 | 30 |

Задание 2. Произошел обрыв и замыкание на землю провода воздушной линии 380/220В. Определить зависимость шагового напряжения $U_{ш}$ и на-

пряжения прикосновения U_{np} к фазному проводу сети TN от расстояния до места замыкания. Длина контакта провода с землей l (м), диаметр провода d (см). Удельное сопротивление земли ρ (Ом•м), сопротивление заземления источника питания R_o (Ом). Соответствующие данные физических величин приведены в табл. 4.

Таблица 4

Начальные условия для задания 2

| № варианта | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------------|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|
| l , м | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 6 |
| d , см | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ρ , Ом•м | 50 | 60 | 70 | 30 | 4 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| R_o , Ом | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 |

Задание 2 (по выбору). В процессе обработки растительности электротехнологическим культиватором произошёл обрыв электрода и замыкание на почву электротехнологической сети 5кВ. Определить зависимость шагового напряжения $U_{ш}$ и напряжения прикосновения U_{np} к электроду сети TN от расстояния до места замыкания. Длина контакта электрода с почвой l (м), диаметр электрода d (см), удельное сопротивление почвы ρ (Ом•м), сопротивление заземления источника питания R_o (Ом). Соответствующие данные этих величин приведены в табл. 5, d (см) и ρ (Ом•м) выбрать из табл. 4.

Таблица 5

Начальные условия для задания 2 (по выбору)

| № варианта | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| l , м | 0,01 | 0,015 | 0,02 | 0,025 | 0,03 | 0,035 | 0,04 | 0,045 | 0,05 | 0,055 |
| R_o , Ом | 10 | 20 | 30 | 40 | 10 | 20 | 30 | 40 | 10 | 20 |

Задание 3. Выполнить расчет группового заземлителя с сопротивлением растекания току не более 4,0 Ом. Удельное сопротивление грунта $\rho = D+80$ (Ом•м), где D - последняя цифра учебного шифра студента (например, УЭ10136, то $\rho = 6+80 = 86$ Ом•м). Заземлитель выполнен из вертикальных стержней, длина которых $l = 0,1 \cdot \Gamma + 3$ (м), где Γ - предпоследняя цифра учебного шифра студента (например, УЭ10136, то $l = 3+1 = 4$ м). Диаметр стержней не должен превышать 0,05 м. Недостающие данные выбрать самостоятельно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Электробезопасность: теория и практика. Учебное пособие*/П.А. Долин, В.Т. Медведев и др.; под ред. В.Т. Медведева. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 279с.
2. *Халин, Е.В. Основы электрической безопасности* / Е.В. Халин, Д.С. Стребков, Н.Н. Липантьева, С.И. Коструба. Под редакцией Е.В. Халина. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. – 584с.
3. *Дацков, И.И. Электробезопасность в агропромышленном производстве* / И.И. Дацков, К.Ю. Сорокин. – М.: Росинформагротех, 2003. – 124с.
4. *Правила* технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Омега-Л, 2012. – 263с.
5. *Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок.* – М.: Омега-Л, 2011. – 152с.
6. *Правила устройства электроустановок.* – М.: Изд-во Деан, 2010. – 1168с.
7. **Межотраслевая инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве.* – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2011. – 84с.
8. *Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках.* – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2012. – 96с.
9. *Баранов, Л.А. Светотехника и электротехнология*/Л.А. Баранов, В.А. Захаров. - М.: КолосС, 2006. – 344с.
10. *Блинов, Ю.И. Современные энергосберегающие электротехнологии*/Ю.И. Блинов, А.С. Васильев, А.Н. Никаноров и др. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000. - 548с.
11. *Ляпин, В.Г. Оборудование и энергосберегающая электротехнология борьбы с нежелательной растительностью*/В.Г. Ляпин; Новосиб. гос. аграр. ун-т. – 2-е изд. перераб. и доп. - Новосибирск, 2012. - 366с.

* Приказом Минздравсоцразвития РФ от 17.05.2010 № 353н "О первой помощи" установлен перечень мероприятий по оказанию первой помощи. В данной связи Межотраслевая инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях на производстве, разработанная Министерством труда и социального развития РФ, не применяется. При оказании первой помощи рекомендуется руководствоваться учебным пособием "Алгоритмы первой помощи" и учебником "Первая помощь").

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ, ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ | 4 |
| 2. ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ И ШАГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ | 7 |
| 2.1. Напряжение прямого прикосновения в трехфазной сети IT | 7 |
| 2.2. Напряжение косвенного прикосновения в аварийной сети IT | 9 |
| 2.3. Напряжение прямого прикосновения в аварийной сети IT | 9 |
| 2.4. Напряжение прямого прикосновения в исправной трехфазной сети TT | 9 |
| 2.5. Напряжение прикосновения в аварийной трехфазной сети TT | 9 |
| 2.6. Напряжение прямого прикосновения в сети TN | 10 |
| 2.7. Аварийный режим сети TN | 10 |
| 2.8. Расчет сопротивления заземления | 10 |
| 2.9. Определение потенциала земли вблизи заземлителя | 11 |
| 2.10. Сопротивление группового заземлителя | 12 |
| 2.11. Напряжение прикосновения с учетом потенциала земли | 14 |
| 2.12. Напряжение прикосновения с учетом сопротивления основания | 15 |
| 3. ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ | 15 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 17 |

Авторы:
Калюжный Анатолий Тимофеевич
Ляпин Виктор Григорьевич
Болотов Денис Сергеевич

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

**Методические указания для самостоятельной и
контрольной работы**

Редактор Н.К. Крупина
Компьютерная верстка

Подписано к печати 2021 г.
Объем 1 уч.-изд.л., усл. печ. л. Формат 60×84^{1/16}
Тираж 100 экз. Изд. № Заказ №

Отпечатано в издательстве Новосибирского ГАУ
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160