

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Иркутская государственная сельскохозяйственная академия

Электротехника и электроника

Трехфазные электрические цепи

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

КНИГА 2

Иркутск 2013 г.

УДК (621.039.637:544.0130)(075.8)
ББК с211я73-я-5

Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи: учеб. пособие: в 2 кн. КН2 / М.Ю. Бузунова, А.Г. Черных. – Иркутск: Иркутск. гос. сельхоз. акад., 2013. – 194с.

Книга предназначена для студентов в качестве учебного пособия к теоретическим и практическим занятиям по одноименному курсу. Книга имеет своей целью дать студентам необходимое теоретическое понимание и возможность подготовки к практическим занятиям, входящим в программу дисциплины, при изучении раздела «Трехфазные электрические цепи». Содержание учебного пособия включает в себя вопросы теории и практики расчетов по электробезопасности в трехфазных сетях. Приводятся методы расчета предельных значений параметров электрических сетей и заземления, обеспечивающих безопасность электрооборудования и обслуживающего персонала, а также методы экспериментальной оценки параметров изоляции сетей в действующих электроустановках.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия» в рамках подготовки бакалавров по профилю «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве» и «Технические системы в агробизнесе». Может быть рекомендовано студентам обучающихся по профилю «Электроснабжение» и «Энергообеспечение предприятий». Издание представляет интерес для преподавателей, слушателей системы повышения квалификации и переподготовки кадров.

Авторы-составители: М.Ю. Бузунова, А.Г. Черных.

Рецензенты:

А.П.Степанов, кандидат технических наук, доцент; декан факультета систем обеспечения транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения.

В.О.Головщиков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. СО РАН; Генеральный директор СРО НП «Восточно-Сибирское объединение энергоаудиторов».

ISBN (книга 2)

© Бузунова М.Ю., Черных А.Г., 2013

© Иркутская государственная
сельскохозяйственная академии, 2013

ВВЕДЕНИЕ

В области электробезопасности персонала в промышленности достигнуты определенные успехи. Это стало возможным благодаря широкому использованию современных научных достижений в практике проектирования и эксплуатации систем электроснабжения.

Вместе с тем, в области технической электробезопасности (взрыво-, пожаробезопасность, выход из строя оборудования), положение остается сложным, и тенденций к улучшению не наблюдается, особенно в условиях смены прав собственности.

Предметом изучения материала книги является ряд определений и понятий в области электробезопасности, взаимосвязи параметров электрических сетей с параметрами электрического воздействия на организм человека, методы измерения, оценки и анализа экспериментальных данных условий электробезопасности действующих электроустановок.

Авторы надеются, что настоящее пособие поможет студентам, специалистам электроэнергетических служб и другим лицам, имеющим дело с электроэнергетикой, разобраться в специфических аспектах общей проблемы электробезопасности на промышленных предприятиях, что позволит целенаправленно разрабатывать организационные и технические мероприятия в условиях эксплуатации электроустановок.

Материал, излагаемый в пособии, базируется на знании основ высшей математики, физики и теоретических основ электротехники, имеет непосредственную связь с дисциплинами, изучаемыми студентами при реализации основной образовательной программы для подготовки бакалавров техники и технологии по направлению "Агроинженерия".

Кроме того, пособие базируется на научных достижениях в области энергетики в нашей стране и за рубежом, практике эксплуатации систем электроснабжения, на действующих отраслевых нормативно-технических документах, теоретических и экспериментальных исследованиях, выполненных авторами совместно в течение ряда последних лет. Тем не менее, в пособии не предусматривается изложение всех аспектов проблем расчетов по электробезопасности в трехфазных электросетях.

В первой части учебного пособия рассмотрены общие направления возможных решений проблем электробезопасности, что позволяет расширить

общий кругозор студентов в практической необходимости изучения методов расчетов и анализа в процессе инженерной подготовки.

В последующих частях пособия даются необходимые понятия и определения, которые являются исходными положениями для освоения последующего материала, где изучаются различные взаимосвязи параметров изоляции электрических сетей, параметров заземлений и занулений с электрическими параметрами тела человека как объекта защиты от поражения электрическим током. Кроме того, в основных разделах пособия рассмотрены также вопросы о допустимых значениях параметров изоляции электрических сетей и заземлений, приведены методики экспериментальной оценки допустимых параметров изоляции систем и заземления в действующих электроустановках, что очень важно для контроля состояния электросетей в условиях их эксплуатации. В заключительной части пособия рассматриваются вопросы связанные с правилами и способами монтажа защитного зануления и заземления, а также технологией монтажа различных заземляющих устройств.

Материал изложен в соответствии с общепринятой терминологией, понятиями и определениями в нормативно-технической и учебно-методической литературе.

В пособии строго соблюдена преемственность изложенного материала в опубликованной технической, учебно-методической и нормативной литературе. Подтверждением этому является углубленное и практически необходимое развитие многих установившихся положений и терминов учебников, законодательных актов и методических приемов экспериментальных измерений и оценок параметров действующих электроустановок.

Библиографический список содержит сведения о нормативной и справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов, вошедших в соответствующие разделы пособия.

1. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ В РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Понятие «безопасное использование электроэнергии» применительно к промышленным предприятиям органически связано с обеспечением высокой надежности работы электрооборудования и включает: взрывобезопасные и пожаробезопасные условия, электробезопасность персонала, безаварийную работу.

Взрывобезопасные условия работы во взрывоопасных помещениях (средах) должны обеспечиваться специальным исполнением оборудования, нормированием, испытанием и контролем взрывозащищенности, состояния изоляции сетей и заземления электрооборудования, автоматическим защитным отключением электроустановок при возникновении коротких замыканий и токов утечки на землю.

Пожаробезопасные условия работы электрифицированного технологического оборудования, сетей и электроустановок (обогачительных и других промышленных комплексов, компрессоров, воздуходувок, вентиляторов, экскаваторов, буровых установок, подстанций, кабельных и воздушных линий и т.д.) должны обеспечиваться, наряду с указанными выше мероприятиями, нормированием и последующим контролем положительных свойств электрооборудования и сетей, профилактическими мероприятиями, предусматривающими нормированный контроль, ремонт и защиту электрооборудования и электросетей от повреждения под действием агрессивных сред, а также влаги, пыли и других неблагоприятных факторов.

Электробезопасность персонала должна обеспечиваться, кроме таких же мер, как и при соблюдении взрыво- и пожаробезопасных условий (например, контроль изоляции, защита от утечек тока, защитное заземление, зануление), рядом дополнительных мероприятий позволяющих, в частности, исключить гальваническое влияние электрических сетей на организм человека, а также осуществлять нормирование и контроль конструктивных и эргономических показателей электрооборудования.

Безаварийная работа электрооборудования должна обеспечиваться (наряду с указанными выше) мерами, препятствующими прохождению электрического тока по путям, не предусмотренным для нормального функционирования системы, нормированием и реализацией настройки,

ревизии, сроков проведения планово-предупредительных ремонтов и т.д.

Из изложенного следует, что меры обеспечения взрыво-, пожаро-, электробезопасных и безаварийных условий использования электроэнергии на промышленных предприятиях в некоторой части являются общими, а неблагоприятные исходы рассматриваются специалистами как случайные события, возникающие при появлении опасных производственных ситуаций и оцениваются с вероятностных позиций.

Вместе с тем, учитывая, что нормативы безопасности и нормативный контроль призваны предупредить и снизить вероятность появления неблагоприятных исходов в процессе конкретной организованной деятельности персонала и работы электрооборудования, следует иметь в виду, что задача нормирования параметров электробезопасности имеет существенное отличие при различных видах опасности (взрыв, пожар, авария, электропоражение). Разработка нормативов электробезопасности носит дифференцированный характер.

В контексте вышесказанного следует обратить внимание на тот факт, что в ПУЭ не дается определение «критерия электробезопасности», однако количественные оценки по вопросам электробезопасности широко представлены, которые являются основой ряда положений, например, сопротивление заземлителей, проводников, нормативы допустимых токов и напряжений, сечения проводов и т.п. Термин «критерий электробезопасности» в аналогичном контексте использовался и используется в технической литературе в научных статьях и дискуссиях, периодических технических журналах.

В настоящее время обобщен объемный научно-исследовательский материал, но вопрос о выборе направления в нормировании критериев электробезопасности пока остается дискуссионным. Вероятно, это объясняется сложностью проблемы и недостаточной изученностью характера различных режимов воздействия электрических токов различного вида, степени влияния различных обстоятельств поражения и сопутствующих факторов.

Вопросы нормирования критериев электробезопасности в настоящее время рассматриваются с различных точек зрения, но в целом, с учетом общепринятой практики, позволяют их классифицировать следующим образом:

1. Нормирование допустимых токов и напряжений различного рода и частоты на основе экспериментального и теоретического изучения воздействия электрического тока на живой организм, в том числе и на человека. Позиция дифференцированного подхода к оценке уровня электробезопасности установок и реализации конкурентоспособных мероприятий безопасности.

2. Вероятностный метод решения проблемы критериев электробезопасности, при котором в качестве количественного показателя уровня электробезопасности рекомендуется вероятность электробезопасной работы человека за данный период времени. На основании этого метода по общим статистическим данным электротравматизма определяются допустимые параметры электробезопасности электроустановок в целом, а не дифференцированные величины таких параметров, соотнесенные с данными электротравматизма в конкретных электроустановках при их эксплуатации.

3. Отрицания нормирования токов и напряжений прикосновения для человека и создание таких условий труда и эксплуатации электрооборудования, которые исключали бы протекание тока через тело человека вообще. Как следствие, в этом случае предполагается абсолютное безаварийное состояние электроустановок в процессе эксплуатации при любых условиях. Очевидно, что такой подход на практике, для обеспечения заявленных условий безаварийной работы конкретной электроустановки, потребует прежде всего существенной концентрации материальных ресурсов, а с учетом современного состояния развития оборудования систем электроснабжения в целом, как следствие может рассматриваться, как чисто теоретический.

4. Дифференцированное нормирование критериев электробезопасности для различных отраслей народного хозяйства с учетом их особенностей и природно-климатических условий, дифференцированное нормирование применительно к различным группам электрооборудования и даже к отдельным видам электроустановок.

Наиболее перспективными в области разработки критериев и норм электробезопасности являются первое и четвертое направление. Это объясняется тем, что по сложившейся традиции в науке и практике эксплуатации электроустановок ориентируются на не абстрактные показатели вероятностных событий, а на конкретные условия и состояния

электроустановки. Поэтому проектно-конструкторский и эксплуатационный персонал ориентируется на выбор и нормирование конкретных параметров электробезопасности, обеспечивающих безопасность человека в процессе контактирования с электроустановками, т.е. создание таких параметров электроустановок, при которых даже в аварийных режимах не могли бы возникнуть опасные воздействия на человека, либо человек должен быть предупрежден о предстоящем возникновении опасности (защитное отключение, контроль фактических показателей и сравнение их с предельно допустимыми, сигнализация и т.п.).

Второе и третье направления могут быть применимы при планировании материальных средств на технические и организационные мероприятия в масштабах страны, отрасли и при решении региональных задач. В целом оба эти направления отражают стремление создать высоконадежное электрооборудование.

Целесообразно рассмотреть исходные положения построения системы электробезопасности, заложенные в нормативно-технической документации, реализуемые на стадиях проектирования, монтажа и эксплуатации электроустановок. К таким исходным положениям относится регламентация «Правилами устройства электроустановок» режимов нейтрали электрических сетей, параметров заземлений, защитных мер электробезопасности, норм испытаний и т.п.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Любая инженерная система содержит электроустановки, состоящие из электрооборудования (машин, трансформаторов, аппаратов, измерительных приборов, аппаратов защиты, кабелей и пр.). Электроустановки являются электроприемниками энергии. Электроустановка характеризуется следующими признаками: формой собственности; видом; элементом; номинальным напряжением; режимом нейтрали; родом и частотой тока; способом электропитания (от электросети, от автономного источника); степенью мобильности (стационарные, передвижные, переносные, ручные); режимом работы (нормальный, аварийный); неисправностью; причиной неисправности; соответствием типа установки условиям применения; соответствием конструкции, монтажа и эксплуатации требованиям техники безопасности.

К характеристикам электроустановки отнесены следующие: номинальное напряжение, род и частота тока, способ электроснабжения (от стационарной сети, автономного источника питания электроэнергией), режима нейтрали (средней точки) источника питания (изолированная, заземленная), вид исполнения (стационарные, передвижные, переносные).

Номинальным значением параметра (номинальным параметром) называется указанное изготовителем электротехнического устройства значение параметра, являющееся исходным для отсчета отклонений от этого значения при эксплуатации и испытаниях устройства [1]. При этом, в отличие от кратковременного (1, 2, 5 мин.) испытательного напряжения «номинальное напряжение» – это длительное максимальное напряжение, регламентируемое заводом изготовителем.

Номинальным током $I_{\text{ном}}$ электроустановки называется длительно допустимый максимальный ток, при котором температура электроустановки, регламентируемая нормативными документами, не превосходит допустимых пределов.

Номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ электроустановки называется длительно допустимое максимальное напряжение, на которое рассчитана изоляция обмоток электроустановки, изоляция кабеля и т.п., регламентируемое нормативными документами завода – изготовителя.

Номинальной мощностью электроустановки $S_{\text{ном}}$ называется мощность, соответствующая номинальному току и номинальному напряжению.

Номинальной частотой вращения электрической машины $\omega_{\text{ном}}$, рад/с (n, об/мин) называется длительно допустимая максимальная частота вращения, на которую рассчитана механическая прочность машины. Номинальная частота вращения регламентируется нормативными документами завода изготовителя.

Большинство других номинальных параметров являются производными основных, среди них $P_{\text{ном}}$, $Q_{\text{ном}}$, $\cos \varphi$, $\eta_{\text{ном}}$, $Z_{\text{ном}}$, и др.

Наиболее распространенные номинальные напряжения силовых электроустановок переменного тока удобно для дальнейших рассуждений по вопросам режимов нейтрали, релейной защиты, максимально-токовой защиты, заземлений, других технических и организационных мероприятий электробезопасности разделить на три группы.

I-я группа номинальных напряжений – это напряжения электроустановок до 1000 В, а именно: 127В; 220/127 В; 380/220 В; 660/380 В. Эти напряжения являются напряжениями распределительных сетей до 1000 В и напряжениями большинства электроустановок силовой нагрузки на предприятиях. Электрические сети с таким напряжением эксплуатируются как с изолированной, так и глухозаземленной нейтралью.

II-я группа номинальных напряжений – это напряжения силовой нагрузки и, главным образом, распределительных сетей: 3,15 кВ; 6,3 кВ; 10,5 кВ; 13,8 кВ; 15,75 кВ; 18 кВ; 20 кВ и 35 кВ.

Напряжения 6,3 ÷ 20 кВ иногда называют генераторными напряжениями электростанций, на которых при близко расположенной нагрузке, также осуществляют распределение электроэнергии. Степень напряжения 3,15 кВ при проектировании систем электроснабжения в настоящее время не применяется как устаревшая, а действующие установки заменены или заменяются на электроустановки более высокого напряжения. Сети с напряжением 6,3 ÷ 35 кВ эксплуатируются только с изолированной (или неэффективно заземленной) нейтралью в любых отраслях промышленности и сельского хозяйства.

III-я группа номинальных напряжений: 110 кВ; 150 кВ; 220 кВ; 330 кВ; 400 кВ; 500 кВ и 750 кВ. Это напряжения энергетических систем, используемых при распределении электроэнергии между потребителями с большими нагрузками, а также для передачи электроэнергии на большие расстояния. Электрические сети с такими напряжениями эксплуатируются с эффективно заземленной нейтралью.

В практике эксплуатации систем электроснабжения часто используется термин «электрическая сеть». От этого понятия зависит нормирование сопротивления заземления (сопротивление растеканию тока заземляющего устройства), расчет однофазного (однополюсного) тока к.з. $I_{кз}^{(1)}$, однофазного замыкания на землю (корпус) $I_{озн}$, выбор способа контроля изоляции и т.п.

Электрическая сеть – это часть системы (схемы) электроснабжения, элементы которой объединены одной ступенью напряжения. Например, в системе (схеме) электроснабжения предприятия, запитанного от энергосистемы напряжением 110 кВ, могут быть электрические сети напряжением 110 кВ; 35 кВ; 6 ÷ 10 кВ; 660/380 В; 380/220 В; 220/127 В; 36 В, т.е. 7 электрических сетей.

3. РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Выбор и оценка параметров эксплуатации и электробезопасности систем электроснабжения в значительной степени зависит от режима нейтрали питающих трансформаторов или генераторов. От того, каков режим нейтрали сети, зависят многие технические и экономические показатели эксплуатации электроустановок: уровень изоляции, а следовательно, и стоимость электросетей и оборудования; износ оборудования; повреждения его и разрушения при однофазных коротких замыканиях на землю (корпус) или при однофазных замыканиях (при утечках) на землю (корпус); наличие блуждающих токов в земле; распределение напряжения на фазах нагрузки; защитоспособные свойства системы заземления и зануления. Вопросам режимов нейтрали уделяется большое внимание в связи с высокими требованиями по надежности систем электроснабжения и безопасности их обслуживания.

Дискуссии ученых и специалистов промышленности о возможности и необходимости использования того или иного режима нейтрали электрических сетей в нашей стране проводились на страницах журналов «Электричество», «Промышленная энергетика», «Безопасность труда в промышленности» и др. в 60-е 70-е годы прошлого столетия.

Под режимом нейтрали электрической сети понимается состояние нейтральной точки трансформатора или генератора по отношению к земле, т.е. соединена нейтральная точка с землей (с заземляющим устройством), или не соединена, или соединена через какой-либо аппарат с большим или малым сопротивлением [1, 2, 3].

Заземление, т.е. преднамеренное в целях электробезопасности электрическое соединение с заземляющим устройством металлических частей, нормально не находящихся под напряжением, применяется в сетях с изолированной нейтралью. Чем меньше сопротивление защищенного заземления, тем меньше напряжение на этих частях при пробое изоляции.

Зануление, т.е. преднамеренное в целях отключения напряжения при нарушении изоляции электрическое соединение металлических частей электроустановок, нормально не находящихся под напряжением, с заземленной нейтралью (нулем), применяется в сетях с напряжением 380/220 и 220/127 В с глухозаземленной нейтралью.

Заземлители – металлические проводники, находящиеся в непосредственном соприкосновении с землей. Заземлители делятся на искусственные и естественные.

Заземляющие проводники – металлические проводники, соединяющие заземляющие части электроустановок с заземлителями.

Заземляющее устройство – совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Замыкание на землю – случайное электрическое соединение токоведущей части непосредственно с землей или с нетоковедущими электропроводящими конструкциями или предметами, не изолированными от земли.

Замыкание на корпус – случайное электрическое соединение токоведущей части с металлическими нетоковедущими частями электроустановки.

Нулевой защитный проводник – проводник, соединяющий зануляемые части с глухозаземленной нейтральной точкой обмотки источника тока или ее эквивалентом.

Нулевой рабочий проводник – в электроустановках напряжением до 1000В – проводник, используемый для питания электроприемников, соединенный с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях многофазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в трехпроводных сетях постоянного тока.

Магистраль заземления или зануления – соответственно заземляющий или нулевой защитный проводник с двумя или более ответвлениями.

Глухозаземленная нейтраль – нейтраль генератора или трансформатора, присоединенная к заземляющим устройствам непосредственно.

Изолированная нейтраль – нейтраль генератора или трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через аппараты, компенсирующие емкостный ток сети, трансформаторы напряжения или другие аппараты, имеющие большое сопротивление.

Правила устройства электроустановок для электросетей переменного тока регламентируют следующие режимы нейтрали [1]:

1. Трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью.

2. Трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью с занулением.

3. Трехфазные четырехпроводные сети с изолированной нейтралью без зануления.

4. Трехфазные трехпроводные сети с глухозаземленной (эффективно заземленной) нейтралью.

3.1 ТРЕХФАЗНЫЕ ТРЕХПРОВОДНЫЕ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Изолированной нейтралью называют такую нейтраль трансформатора или генератора, которая не присоединена к заземляющему устройству или присоединена к нему через большое сопротивление того или иного вида, например, через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие катушки и реакторы и т.п. Сети с таким режимом нейтрали эксплуатируются при напряжениях от 127 до 1000 В, а также при $6 \div 35$ кВ. Корпуса всех электроустановок до 1000 В должны быть присоединены к главному заземлителю заземляющими и магистральными заземляющими проводниками [1].

3.1.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ $220 \div 1000$ ВОЛЬТ

На рис. 1 приведена схема сети с изолированной нейтралью. Нейтральная точка N соединена с заземляющим устройством (главный заземлитель – ГЗ) через пробивной предохранитель – разрядник (ПР). Параметры изоляции между фазами сети и землей: R_A, R_B, R_C, C_A, C_B и C_C .

Известно, что земля (грунт) является проводником, проводимость которого зависит от ряда факторов (химических свойств, структуры, влажности, температуры и т.п.). Второй проводник – это провод электрической сети или электроустановки. Между этими двумя проводниками, на одном из которых существует потенциал, имеется изолятор (воздух или твердая изоляция провода, кабеля и т. п.). Такая конструкция представляет собой конденсатор (рис. 2).

Таким образом, между каждым проводом и землей существует емкость. Кроме того, между каждым проводом сети и землей существует активное (омическое) сопротивление изоляции. В некоторых случаях это

сопротивление очень велико, но оно все же имеет конечную величину и может быть измерено, например, омметром, мегомметром. Следует помнить, что емкость и активное сопротивление относительно земли распределены по всей длине проводов сети, а на схемах они изображаются сосредоточенными параметрами (см. рис. 1).

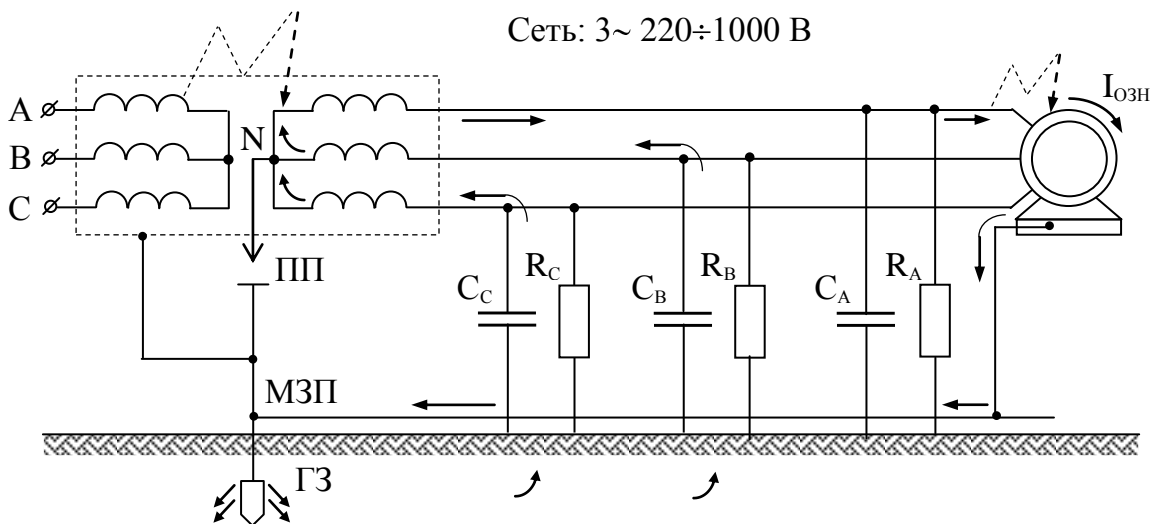


Рис. 1 Сеть с изолированной нейтралью: $I_{\text{ОЗН}}$ – ток однофазного замыкания на землю (корпус); ПП – предохранитель пробивной; МЗП – магистральный заземляющий провод; ГЗ – главный заземлитель.

Предохранитель пробивной (ПП) – разрядник низкого напряжения конструктивно состоит из двух металлических пластин, между которыми помещена слюдяная прокладка с четырьмя отверстиями по периферии и одним отверстием в центре для крепления (рис. 3). Одна пластина соединяется с нейтралью трансформатора, вторая – с заземленным корпусом. Слюдяная прокладка служит для точной установки искрового промежутка между пластинами.

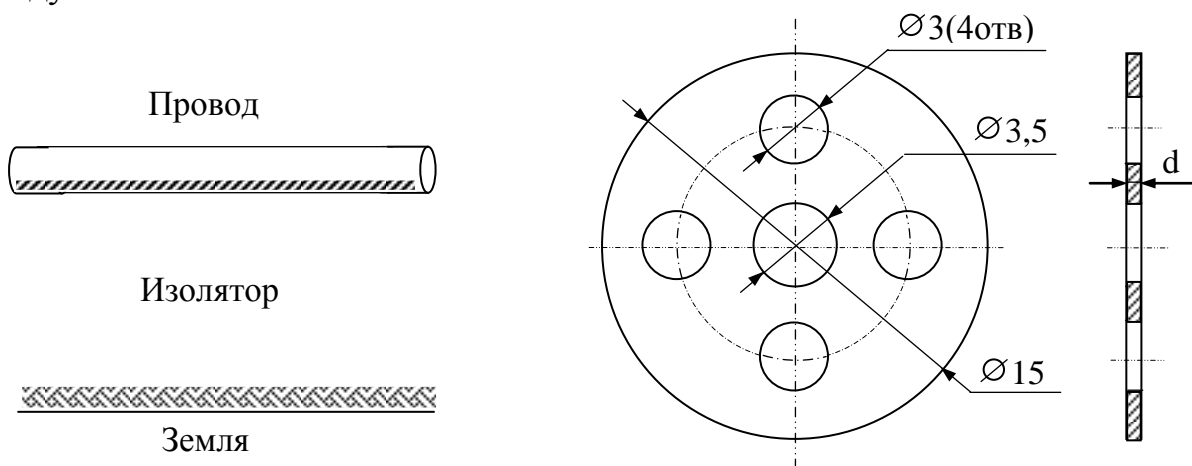


Рис. 2 Конденсатор

Рис. 3 Слюдяная прокладка

ПП (табл. 1) предназначены для защиты сетей низкого напряжения переменного тока от появления в них высокого потенциала по отношению к земле при пробое изоляции между обмотками высокого и низкого напряжения в трансформаторе, при падении проводов высокого напряжения на провода низкого напряжения и т.п. Защита сетей низкого напряжения обеспечивается путем пробоя искровых промежутков через периферийные отверстия в слюдяной прокладке. В случае пробоя искрового промежутка и соединения разделенных прокладкой пластин происходит замыкание на землю сети высокого напряжения, в результате должна сработать защита от замыкания на землю в сети высокого напряжения.

Таблица 1

Технические данные пробивных предохранителей

Исполнение	Номинальное напряжение сети, В	Пробивное напряжение в пределах, В	Расстояние разрядных промежутков d , мм
I	до 220	351 ÷ 600	0,08 ÷ 0,02
II	до 500	701 ÷ 1000	0,22 ^{+0,03} _{-0,02}
III	до 660	1000 ÷ 1300	0,33 ± 0,03

ПП устанавливаются непосредственно на крышке бака силовых трансформаторов, рядом с выводами обмоток низкого напряжения, к которым присоединяется один контакт (верхняя пластина) пробивного предохранителя; второй контакт (нижняя пластина) соединен с заземленным корпусом трансформатора.

В сетях с изолированной нейтралью для обеспечения безопасности применяется *защитное заземление* электроустановок. *Защитным заземлением называют* металлическое соединение корпусов электрооборудования или электрофицированных машин с заземляющим устройством.

Если бы отсутствовало заземление электромашины, то при замыкании (повреждении изоляции) одной из фаз на корпус, например, фазы "а", весь ток замыкания I_K проходил бы от корпуса через человека в землю, а затем через емкости C_B и C_C и сопротивления R_B и R_C ко второму полюсу источника э.д.с. (фаза "а"). Путь тока показан стрелками (рис. 1). При существующих напряжениях электрических сетей прикосновение в этих случаях к корпусу электрооборудования или к металлическим элементам, связанным с

электрооборудованием, всегда опасно и может стать причиной электротравм со смертельным исходом.

При наличии заземления через человека проходит только часть тока замыкания на землю I_h , а вторая часть I_3 проходит с корпуса через заземлитель, т.е.

$$I_{\text{озн}} = I_h + I_3$$

Следовательно, защитное заземление предназначено для создания параллельного пути току в землю при прикосновении человека к корпусу оборудования, которое случайно оказалось под напряжением. Защитное заземление, т.е. параллельный путь току, значительно снижает величину тока через человека. Это можно показать на эквивалентной схеме участка цепи "корпус-земля" (рис. 4).

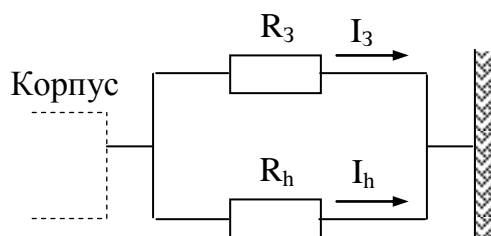


Рис. 4. Схема «корпус-земля»

Сопротивление тела человека примем равным 1000Ом, а норму сопротивления заземления $R_3 = 4\text{Ом}$. При параллельном соединении сопротивлений токи в них распределяются, как известно, обратно пропорционально величинам сопротивлений, т.е.

$$\frac{I_3}{I_h} = \frac{R_h}{R_3} = \frac{1000}{4} = 250$$

Таким образом, при данных значениях R_h и R_3 через человека будет протекать ток в 250 раз меньше, чем через цепь заземления. В этом и проявляются защитные свойства заземления.

3.1.2 ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ С НАПРЯЖЕНИЕМ 220 ÷ 1000 ВОЛЬТ

В случае прикосновения к фазе ток, пройдя через человека, возвращается в сеть к источнику тока через активные сопротивления и емкости по отношению к земле двух других фаз (рис. 5).

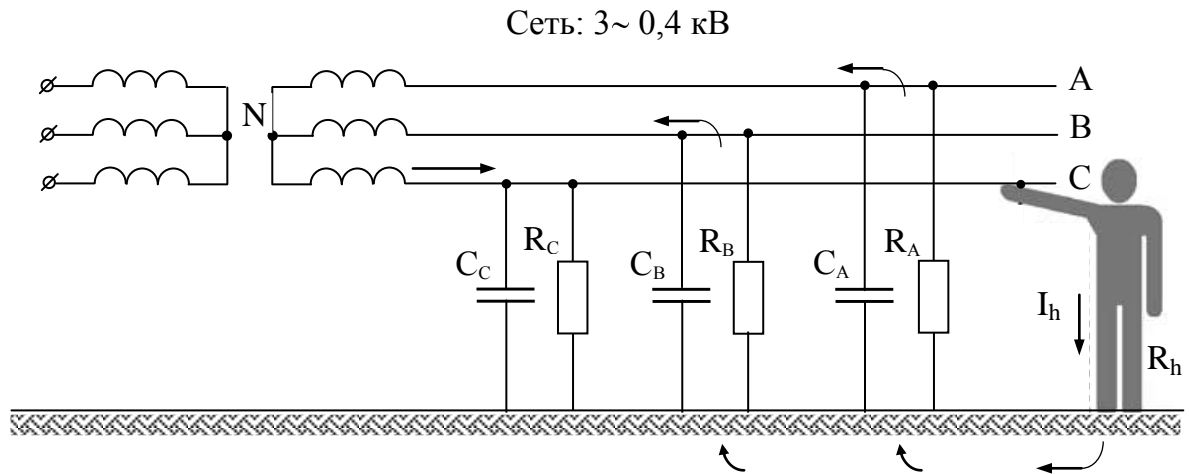


Рис. 5 Прикосновение человека к фазе в сети с изолированной нейтралью трансформатора

Величина тока будет ограничиваться сопротивлением тела человека и сопротивлением изоляции фаз сети.

Из теоретических основ электротехники известно, что алгебраическая сумма токов в трехфазной сети равна нулю, т.е. сумма токов фаз сети и тока человека, прикоснувшегося к фазе А (см. рис. 5) в узле "земля", равна нулю

$$\sum \dot{I} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_h = 0 \quad (1)$$

Для упрощения расчета примем, что емкость фазных проводов по отношению к земле равна нулю, т.е. $C_A = C_B = C_C = 0$, а также активные сопротивления фаз по отношению к земле одинаковы, т.е. $R_A = R_B = R_C = r_{из}$ (в дальнейших расчетах эти упрощения будут сняты).

Токи через изоляцию фазных проводов и через тело человека определяются:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (2) \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (3)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (4) \quad \dot{I}_h = \frac{\dot{U}_C}{R_h} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h}; \quad (5)$$

где R_h – сопротивление тела человека; U_N – напряжение смещения нейтрали (напряжение между землей и нейтралью после прикосновения); U_1, U_2, U_3 – фазные ЭДС трансформатора; U_A, U_B, U_C – напряжения фазных проводов по отношению к земле после прикосновения к фазе.

Подставив значения токов (2 ÷ 5) в выражение (1), получим

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h} = 0$$

или

$$\frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3}{r_{из}} - \frac{3\dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h} = 0 \quad (6)$$

Фазные э.д.с. трансформатора сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° электрических и по абсолютной величине равны, т.е. $U_1 = U_2 = U_3$ или $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$, поэтому

$$\frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h} - \frac{3\dot{U}_N}{r_{из}} = 0,$$

откуда напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_3 \cdot r_{из}}{3R_h + r_{из}} \quad (7)$$

Подставив (7) в выражение (5), получим ток через человека, прикоснувшегося в фазе

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h} = \frac{3U_\phi}{3R_h + r_{из}}, \quad (8)$$

где U_ϕ – фазное напряжение сети, $U_3 = U_\phi$.

С учетом реактивной составляющей сопротивления изоляции сети выражение (8) примет вид

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{R_h} = \frac{3\dot{U}_\phi}{3R_h + z_{из}} \quad (9)$$

Таким образом, величина тока, протекающего через тело человека, при прикосновении к фазе зависит от сопротивления изоляции сети по отношению к земле. Зная величину допустимого тока для человека, можно определить минимально необходимое сопротивление изоляции сети, которое может ограничить ток через человека до безопасной величины.

В практике эксплуатации электрических сетей не всегда удается с малыми затратами достигнуть требуемой величины сопротивления заземляющих устройств в сети напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью, что вызывает необходимость прибегнуть к недостаточно обоснованному отклонению от его нормированного значения. Положение усугубляется особенно при эксплуатации передвижных электроустановок (трансформаторных подстанций и электростанций шахт, разрезов и

приисков, автономных источников геологоразведки, газовых промыслов и т.п.), где заземление и другие меры безопасности должны устраиваться и контролироваться при каждом перемещении источника за фронтом работ или при изменении места работы. Отсутствие норм сопротивления изоляции по отношению к земле указанных сетей не может способствовать эффективности мероприятий электробезопасности.

О необходимости нормирования сопротивления изоляции сети в целом, а не по отдельным её элементам, как это имеет место в настоящее время, а также увеличения сопротивления заземления при одновременном обеспечении необходимого уровня электробезопасности высказано мнение ряда исследователей и специалистов промышленности. Однако рекомендации по ограничению нижнего уровня сопротивления изоляции и максимального сопротивления заземления не могут быть достаточно полно обоснованы без учета нормируемых критериев оценки электробезопасности – допустимых для человека тока и напряжения прикосновения. Поэтому целесообразно рассмотреть комплекс взаимосвязей параметров изоляции электрической сети и заземления с параметрами организма человека, как объекта защиты, дать их оценку.

Введенные в нашей стране отраслевые нормативные документы, в частности, "Правила устройства электроустановок" [1] разработаны с учетом широкого использования современных достижений в практике проектирования и эксплуатации электроустановок и направлены на повышение уровня электробезопасности при одновременном сокращении материальных затрат. Эти нормативные документы базируются на постоянно совершенствующихся исходных положениях основ электробезопасности, развитии науки и технических возможностях.

Особенностью требований [1] в отношении обеспечения безопасности электроустановок является возможность использования в качестве исходного критерия электробезопасности – напряжения прикосновения (напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек), которое при однополюсном замыкании на землю (корпус) в сетях с изолированной нейтралью не должно превышать допустимого значения, что расширяет возможности использования научных достижений в области электробезопасности (это касается значительного числа разнообразных

передвижных автономных источников, где не всегда удается с малыми затратами достигнуть требуемого уровня электробезопасности.

Надежная оценка фактической величины напряжения прикосновения в практике эксплуатации электроустановок возможна лишь с учетом взаимосвязи с параметрами изоляции сети, тока однофазного замыкания на землю и заземления. В связи с этим целесообразно установить предельные значения параметров, удовлетворяющих требованиям [1], и рассмотреть практические рекомендации по их измерению и расчету.

Пусть напряжение прикосновения на заземленных участках оборудования при времени воздействия $t_B > 1$ с и коэффициенте прикосновения, равном единице, для частоты тока 50 Гц не должно быть больше 36 В (см. табл. 2), т.е.

$$U_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot R_3 \leq 36 \text{ В.}$$

Таблица 2

Допустимые величины токов и напряжений прикосновения с частотой 50 Гц, исключающие фибрилляцию сердца при аварийном режиме электроустановок производственного назначения

t_B , сек	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$U_{\text{доп}}$, В	650	500	250	165	125	100
$I_{\text{доп}}$, mA	650	500	250	165	125	100
t_B , сек	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	> 1,0
$U_{\text{доп}}$, В	85	70	65	55	50	36
$I_{\text{доп}}$, mA	85	70	65	55	50	6

Примечание: Сопротивление тела человека R_h в расчетах принимается равным 1 кОм, при $t_B > 1$ с равным 6 кОм.

При питании электроприемников передвижных установок от передвижных автономных источников с изолированной нейтралью [1] допускают либо не нормировать сопротивление заземления, если заземляющее устройство выполнено с соблюдением требований к напряжению прикосновения [1], либо не выполнять защитное заземление электроприемников, если значения напряжений прикосновения при однополюсном замыкании на землю не превышают допустимых. Эти

значения должны быть определены специальным расчетом или экспериментально [1].

Чтобы прикосновение персонала к корпусу было безопасным, необходимо соблюдать условия, при которых сопротивление заземления должно ограничить напряжение прикосновения до безопасной величины, т.е.

$$R_3 \leq \frac{U_{h \text{ доп}}}{I_{\text{озн}}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{озн}}$ – ток однофазного замыкания на землю (корпус), А.

В случае, когда заземление не устраивается, напряжение прикосновения и ток должны быть ограничены сопротивлением изоляции сети по отношению к земле.

Максимально допустимые величины R_3 , ограничивающие напряжение прикосновения до 36 В и величину тока через человека до 6 мА при $R_h = 6$ кОм, можно определить по выражению (10), задаваясь значениями $I_{\text{озн}}$. На рис. 6 представлена зависимость R_3 от $I_{\text{озн}}$. Например, $R_3 = 36$ Ом (рис. 6) ограничивает напряжение прикосновения до 36 В при токе однофазного замыкания на корпус 1 А. Таким образом, сопротивление заземления R_3 не должно превышать значений, оцениваемых указанной зависимостью. При этом имеется в виду, что заземляющее устройство должно обеспечивать безопасность прикосновения к корпусу, находящемуся под напряжением, в предположении отсутствия или неработоспособности защитного отключения, учитывающего временные характеристики воздействия тока на организм человека.

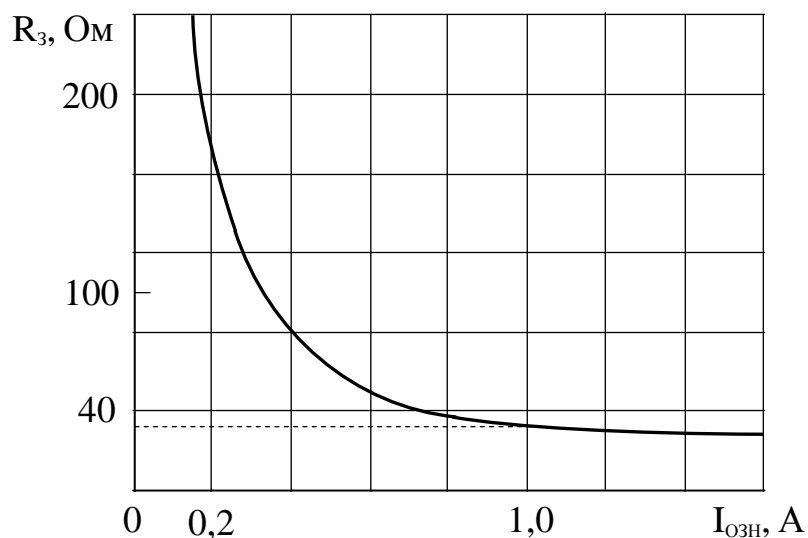


Рис. 6 Зависимость минимально необходимого сопротивления заземления от тока замыкания на землю

Максимально допустимые значения R_3 , ограничивающие напряжения прикосновения до 36 В и величину тока через человека до 6 мА, можно определить по выражению (10), задаваясь значениями $I_{озн}$. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

$I_{озн}, А$	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$R_3, Ом$	180	120	72	60	45	36	30	26	22,5

Нормирование величины напряжения прикосновения, с одной стороны, дает возможность без ущерба электробезопасности увеличить R_3 в сетях с малыми токами замыкания на землю и тем самым уменьшить материальные затраты на содержание заземляющих устройств, а с другой – возникает необходимость практической оценки предельных значений параметров изоляции, при которых обеспечивается этот уровень безопасности.

3.1.3 ПРИКОСНОВЕНИЕ К ФАЗЕ ИЛИ К КОРПУСУ НЕЗАЗЕМЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Из выражения (9) минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети $Z_{из}$ в комплексной форме определится

$$\dot{z}_{из} = R_{эКВ} - jX_{эКВ} = \frac{3\dot{U}_\phi}{\dot{I}_h} - 3R_h, \quad (11)$$

где $R_{эКВ}$, $X_{эКВ}$ – эквивалентное активное и реактивное (емкостное) сопротивление изоляции фазы относительно земли; j – поворотный множитель.

Число j (мнимая единица), применяемое в символическом методе расчета цепей переменного тока не имея количественного значения, является символом, умножение на который равносильно повороту вектора на угол 90° (без изменения его величины) в положительном направлении, т.е. против хода стрелки часов.

Для определения предельных величин активной и емкостной составляющих сопротивление изоляции сети воспользуемся методом перехода от эквивалентных значений к фактическим через проводимости. Учитывая, что эквивалентные $R_{эКВ}$ и $X_{эКВ}$ соединены последовательно, переход к фактическим сопротивлениям изоляции $R_{из}$ и $X_{из}$, соединенным параллельно, производим методом проводимостей фаз (рис. 7).

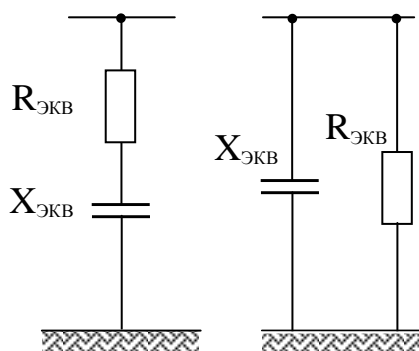


Рис. 7 Схема перехода от последовательного к параллельному соединению параметров

тогда емкость фазы относительно земли

$$C_{из} = \frac{1}{\omega \cdot X_{из}}, \quad (14)$$

где ω – угловая частота тока.

Минимально необходимое (критическое) r_k сопротивление изоляции, при котором обеспечивается безопасность прикосновения к фазе, определяется из условия, что емкость сети полностью скомпенсирована (емкостная проводимость равна нулю), т.е.

$$g = y_{из} = \frac{1}{Z_{из}},$$

тогда $r_k = Z_{из}$. (Для компенсации емкости сети по отношению к земле подключают индуктивность между нейтралью трансформатора и землей или между искусственно созданной нейтралью точкой и землей, например, с помощью трех конденсаторов, подключенных к каждой фазе одним эжимом, а вторым – в общую точку, соединенную с землей).

Предельное значение емкости $C_{пр}$ фазы относительно земли, когда при любом сопротивлении изоляции ток, проходящий через человека, превысит допустимую величину, определяется из условия, что активное сопротивление изоляции равно бесконечности, т.е. $g=0$, при этом

$$b = y_{из}, \quad X_{из} = \frac{1}{y_{из}} = Z_{из}, \quad \text{тогда } C_{пр} = \frac{1}{\omega \cdot X_{из}}.$$

При емкости, скомпенсированной полностью, минимально необходимое сопротивление изоляции может быть определено по

Активная и реактивная проводимости фаз к земле

$$g = \frac{R_{ЭКВ}}{Z_{из}^2}; \quad b = \sqrt{y_{из}^2 - g^2}, \quad (12)$$

где $y_{из}$ – полная проводимость изоляции фазы ($y_{из} = \frac{1}{Z_{из}}$).

Активное и реактивное сопротивление изоляции

$$R_{из} = \frac{1}{g}; \quad X_{из} = \frac{1}{b}, \quad (13)$$

вышеприведенным зависимостям и при известном допустимом токе через человека.

Например, допустимый ток через человека при времени воздействия более 1 с не должен превышать $I_{\text{доп}}=6$ мА, тогда полное сопротивление изоляции фазы сети определится:

$$z_{\text{из}} = \frac{3U_{\text{ф}}}{I_{\text{h доп}}} - 3R_{\text{h}} = \frac{3 \cdot 220}{6} - 3 \cdot 6 = 92 \text{ кОм}$$

Следовательно, минимально необходимое сопротивление изоляции фазы сети при полностью скомпенсированной емкости равно

$$r_{\text{k}} = z_{\text{из}} = 92 \text{ кОм}$$

Предельное значение емкости определяется через емкостное сопротивление, когда $R_{\text{из}} = \infty$, а $X_{\text{из}} = Z_{\text{из}} = 92$ кОм:

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega \cdot X_{\text{из}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 92 \cdot 10^3} = 0,0346 \approx 0,035 \text{ мкФ}$$

Таким образом, если емкость сети $C_{\text{из}} = C_{\text{пр}} = 0,035$ мкФ, то при любых значениях $R_{\text{из}}$ ток прикосновения к фазе сети напряжением 380/220 В превзойдет величину $I_{\text{доп}} = 6$ мА.

Выполнив аналогичные вычисления для сетей напряжением 220 В и 660 В, получим значения минимально необходимых сопротивлений изоляции соответственно 45,5 и 172 кОм.

Предельные значения емкости определяются:

При напряжении сети 220/127 В, когда $X_{\text{из}} = Z_{\text{из}} = 45,5$ кОм,

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega \cdot X_{\text{из}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 45,5 \cdot 10^3} = 0,069 \text{ мкФ}$$

При напряжении сети 660/380 В, когда $X_{\text{из}} = Z_{\text{из}} = 172$ кОм,

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega \cdot X_{\text{из}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 172 \cdot 10^3} = 0,018 \text{ мкФ}$$

При некомпенсированной емкости сети, что является обычным в условиях эксплуатации, активное сопротивление $R_{\text{из}}$ должно быть выше этих расчетных значений. Другими словами, в каком бы отношении не находились $R_{\text{из}}$ и $C_{\text{из}}$, полное сопротивление изоляции $Z_{\text{из}}$ не должно быть меньше значений 45,5; 92 и 172 кОм соответственно для сетей напряжением 220 В, 380 В и 660 В.

Если емкость сети не скомпенсирована полностью (пусть $C_{из} = 0,02$ мкФ), то минимально необходимое сопротивление изоляции фазы r_k при том же самом токе однофазного замыкания через тело человека ($I_{доп} = 6$ мА) будет найдено в следующем порядке:

$$X_{из} = \frac{1}{\omega \cdot C_{из}} = \frac{1}{314 \cdot 0,02 \cdot 10^6} = 159,2 \text{ кОм};$$

$$b = \frac{1}{X_{из}} = \frac{1}{159,2 \cdot 10^3} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$y_{из} = \frac{1}{Z_{из}} = \frac{1}{92 \cdot 10^3} = 10,87 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$g = \sqrt{y_{из}^2 - b^2} = \sqrt{(10,87 \cdot 10^{-6})^2 - (6,28 \cdot 10^{-6})^2} = 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$$

Тогда

$$r_k = \frac{1}{g} = \frac{1}{8,9 \cdot 10^{-6}} = 112,7 \text{ кОм}.$$

Соотношение между $R_{из}$ и $C_{из}$ нетрудно установить, задавшись рядом значений $R_{экв}$ и вычислив их при известном $Z_{из}$ равным 45,5; 92 и 172 кОм соответственно при напряжениях сети 220, 380 и 660 В, по формулам [(12) – (14)]. Расчетные данные представлены в табл. 4. Полученные зависимости минимально необходимого сопротивления изоляции $R_{из}$ от $C_{из}$ для различных напряжений сети представлены на рис. 8, где штриховыми линиями отмечены предельные емкости $C_{пр}$, которые означают, что если фактическая емкость фазы сети будет превышать $C_{пр}$, то даже при идеальной изоляции ($R_{из} = \infty$) ограничить ток через человека и напряжение прикосновения до безопасной величины невозможно.

Таблица 4

Расчетные данные зависимости $R_{из} = f(C_{из})$

$Z_{из}, \text{кОм}$	$R_{экв}, \text{кОм}$	$g = \frac{R_{экв}}{Z_{из}^2}, \text{См} \cdot 10^{-6}$	$b = \sqrt{y_{из}^2 - g^2}, \text{См} \cdot 10^{-6}$	$C_{из}, \text{мкФ}$	$R_{из}, \text{кОм}$
1	2	3	4	5	6
Напряжение сети 220/127 В					
45,5	45	21,74	3,24	0,010	46,0
45,5	40	19,32	10,48	0,033	51,76
45,5	35	16,91	14,04	0,045	59,14
45,5	30	14,49	16,52	0,053	69,01

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6
45,5	25	12,08	18,36	0,058	82,78
45,5	20	9,66	19,74	0,063	103,52
45,5	15	7,25	20,75	0,066	137,93
45,5	10	4,83	21,44	0,068	207,04
45,5	5	2,42	21,85	0,0696	413,22
45,5	1	0,48	21,97	0,0699	2083,33
45,5	0	0	21,98	0,07	∞
Напряжение сети 380/220 В					
92	88	10,4	3,16	0,010	96,2
92	85	10,04	4,17	0,013	99,6
92	80	9,45	5,37	0,017	105,8
92	70	8,27	7,05	0,022	120,9
92	60	7,09	8,24	0,026	141,0
92	50	5,91	9,12	0,029	169,2
92	40	4,73	9,79	0,031	211,4
92	30	3,54	10,28	0,033	282,5
92	20	2,36	10,61	0,034	423,7
92	10	1,18	10,81	0,0344	847,5
92	0	0	10,87	0,0346	∞
Напряжение сети 660/3800 В					
172	165	5,58	1,62	0,005	179,2
172	150	5,07	2,84	0,009	197,2
172	130	4,39	3,81	0,012	227,8
172	110	3,72	4,46	0,014	268,8
172	90	3,04	4,95	0,016	328,9
172	70	2,37	5,30	0,017	421,9
172	50	1,69	5,56	0,018	591,7
172	30	1,01	5,72	0,0182	990,1
172	20	0,68	5,77	0,0184	1470,6
172	10	0,34	5,80	0,0185	2941,2
172	0	0	5,81	0,0185	∞

Графики (см. рис. 8) представляют собой границу между допустимыми значениями параметров изоляции сети (выше и левее) и недопустимыми значениями (ниже и правее), они позволяют определить минимально необходимое сопротивление $R_{из}$ при известном значении $C_{из}$. Например, если емкость фазы по отношению к земле в сети напряжением 380 В составляет 0,032 мкф, то сопротивление изоляции $R_{из}$ должно быть не менее 236 кОм (ход от точки *a* до *b* и *c*). Задача может быть решена в обратном порядке. Пусть достигнута величина $R_{из} = 150$ кОм, тогда емкость фазы в сети напряжением 220 В не должна быть больше 0,066 мкф (ход от точки *d* до точек *e* и *f*).

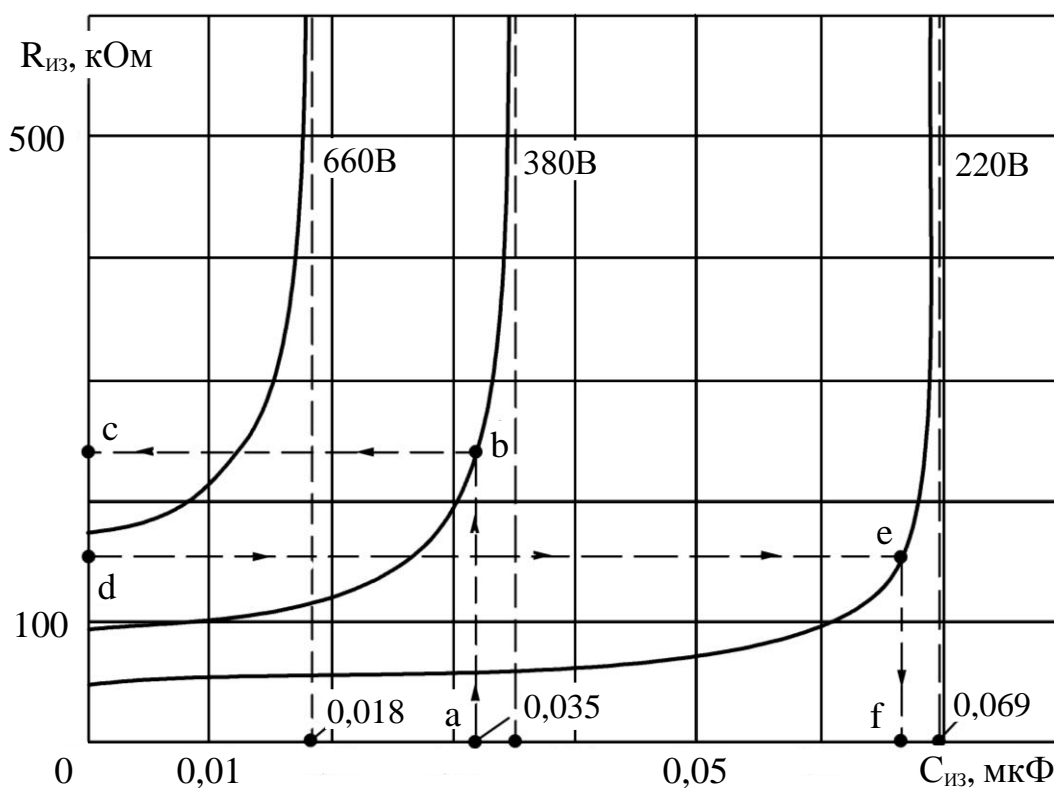


Рис. 8 Зависимость минимально необходимого сопротивления изоляции от емкости $C_{из}$ в сетях напряжением 660, 380 и 220 В без применения заземления.

В передвижных электроустановках, питающихся от автономных источников с изолированной нейтралью [1], допускают не нормировать сопротивление заземления, если заземляющее устройство выполнено с соблюдением требований к напряжению прикосновения [1], либо не выполнять защитное заземление электроприемников, если значения напряжений прикосновения при однополюсном замыкании на землю не превышает нормированных, причем эти значения должны быть определены

специальным расчетом или экспериментально [4]. Однако если невозможно достичь значений сопротивлений изоляции сети, определяемых зависимостями $R_{из} = f(C_{из})$ по рис. 8, или это связано с большими материальными затратами по сравнению с сооружением заземляющих устройств (замена кабелей, электродвигателей и т.п.), то следует применить защитное заземление и произвести оценку безопасности по графикам, приведенным на рис. 9 и рис. 10.

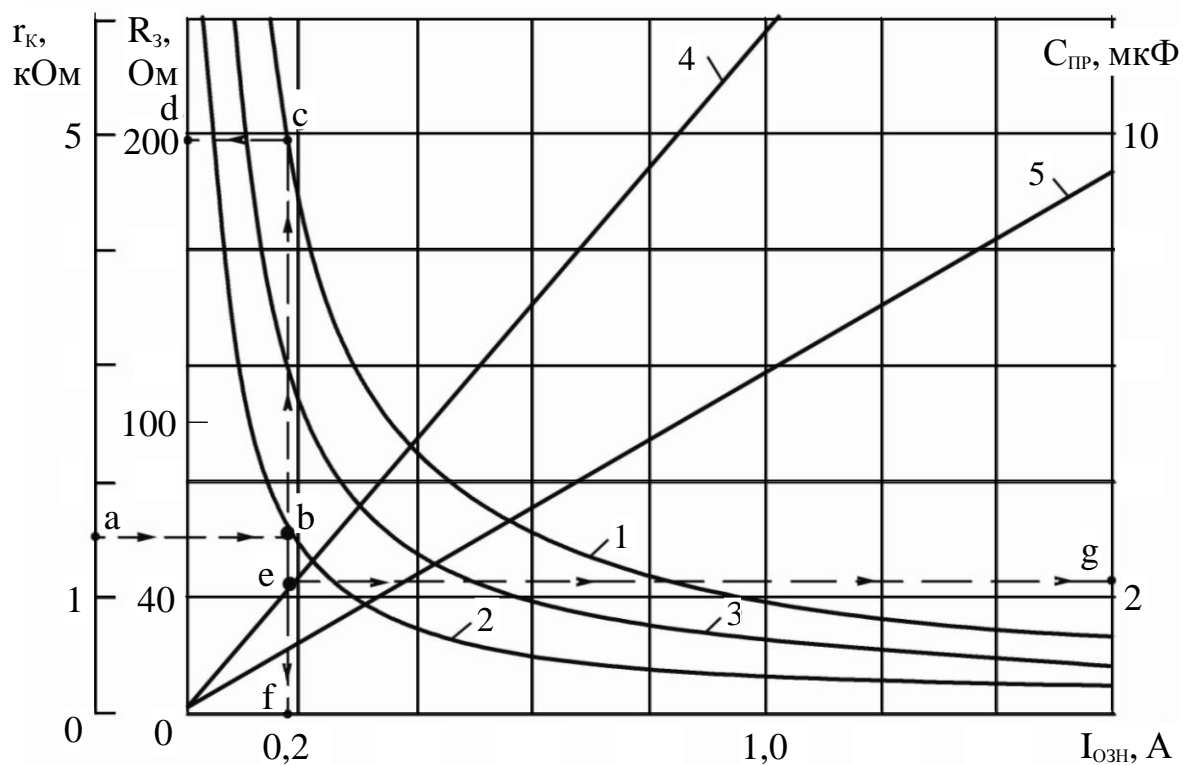


Рис. 9 Зависимости предельных значений параметров от тока однофазного замыкания на землю при напряжении сети 220 и 380 В:

1 – максимально допустимые сопротивления заземления R_3 ; 2 и 3 – минимально необходимое сопротивление изоляции сети r_k соответственно при напряжении 220 и 380 В; 4 и 5 – значения предельных емкостей $C_{пр}$ при напряжениях сети 220 и 380 В.

3.1.4 ПРИКОСНОВЕНИЕ К ЗАЗЕМЛЕННОМУ КОРПУСУ

Заземляющее устройство должно обеспечивать безопасность прикосновения к корпусу, который случайно оказался под напряжением, например, в случае замыкания одной фазы на корпус. Величина тока через человека в этом случае ограничивается заземлением и изоляцией сети. Поэтому учитывая, что защитоспособные свойства заземления зависят от параметров изоляции сети, целесообразно оценить предельные значения их

по величине тока однофазного замыкания и сопротивлению заземления, которое должно ограничить ток, проходящий через человека до безопасной величины. Следует иметь в виду, что изоляция сети и заземление должны обеспечить безопасность прикосновения к корпусу в предположении отсутствия или неработоспособности защитного отключения.

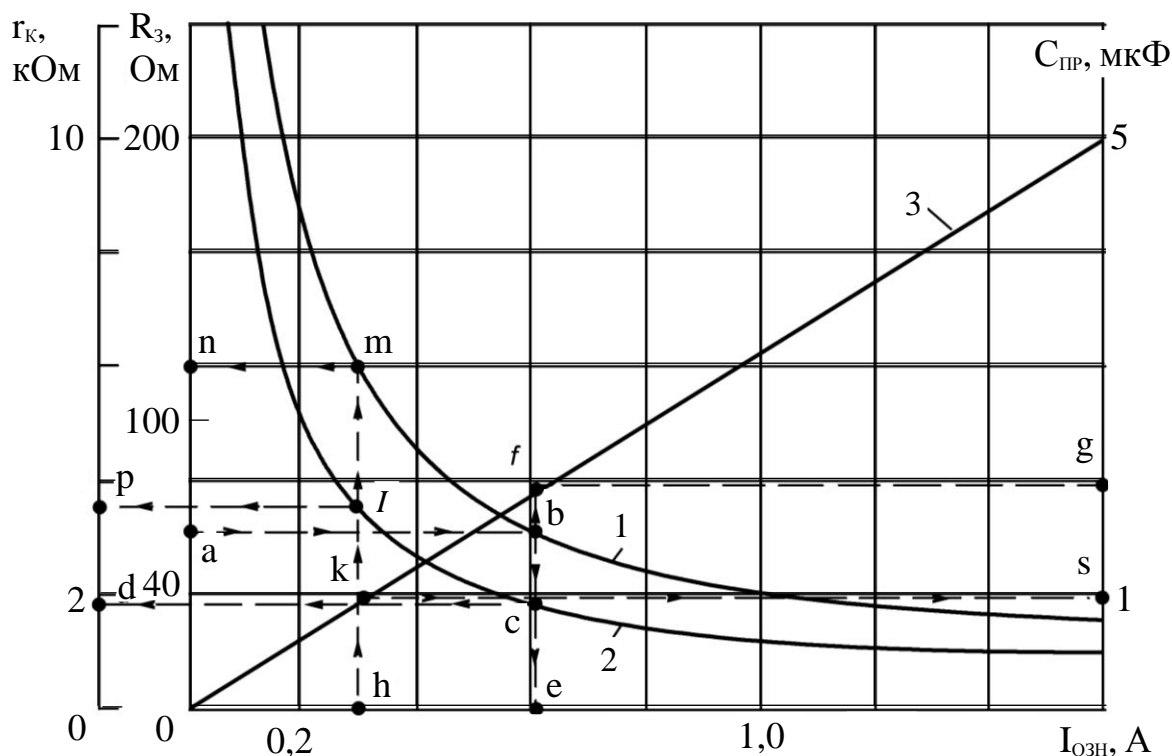


Рис. 10 Зависимости предельных значений параметров от тока однофазного замыкания на землю при напряжении сети 660 В: 1 – максимально допустимое сопротивление заземления; 2 – минимально необходимое сопротивление изоляции сети; 3 – значения предельных емкостей $C_{пр}$

Приняв в выражении (11) вместо сопротивления тела человека сопротивление заземления и вместо тока через человека (тока утечки) ток однофазного замыкания на корпус, можно определить сопротивление изоляции фазы сети $Z_{из}$ в комплексной форме

$$\dot{Z}_{из} = R_{эКВ} - j \cdot X_{эКВ} = \frac{\dot{U}_{\phi}}{\dot{I}_3} - 3R_3$$

Допустим, ток однофазного замыкания на корпус в сети напряжением 380 В составляет 0,6 А, тогда максимально допустимое сопротивление заземления электроустановки, ограничивающее напряжение прикосновения до предельно допустимого значения $U_{доп} = 36$ В, должно быть не более

$$R_3 \leq \frac{U_{\text{доп}}}{I_{\text{из}}} \leq \frac{39}{0,6} \leq 60 \text{ Ом}$$

А полное сопротивление изоляции фазы сети – не менее

$$Z_{\text{из}} = \frac{3\dot{U}_{\phi}}{I_{\text{озн}}} - 3R_3 = \frac{3 \cdot 220}{0,6} - 3 \cdot 60 = 920 \text{ Ом}$$

Дальнейший ход расчетов, имея некоторые особенности, в целом аналогичен, что и при прикосновении к фазе.

При полностью скомпенсированной емкости сети по отношению к земле ($C_{\text{из}} = 0$) минимально необходимое (критическое) сопротивление изоляции

$$r_k = z_{\text{из}} = 920 \text{ Ом}$$

Предельное значение емкости $C_{\text{пр}}$ фазы относительно земли, когда при любом активном сопротивлении изоляции сети $R_{\text{из}}$, напряжение прикосновения к корпусу и ток, проходящий через тело человека, будут больше допустимых значений, определяется из условия, что активное сопротивление изоляции равно бесконечности, т.е. реактивное (емкостное) сопротивление $X_{\text{из}} = 920 \text{ Ом}$, тогда

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\omega \cdot X_{\text{из}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 920} = 3,46 \text{ мкФ}$$

Если емкость сети не скомпенсирована полностью (пусть $C_{\text{из}} = 1,5 \text{ мкФ}$), то минимально необходимое сопротивление изоляции фазы при том же самом токе однофазного замыкания будет найдено

$$X_{\text{из}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{из}}} = \frac{10^6}{314 \cdot 1,5} = 2123 \text{ Ом},$$

$$b = \frac{1}{X_{\text{из}}} = \frac{1}{2123} = 4,71 \cdot 10^{-4} \text{ См},$$

$$Y_{\text{из}} = \frac{1}{Z_{\text{из}}} = \frac{1}{920} = 10,9 \cdot 10^{-4} \text{ См},$$

$$g = \sqrt{Y_{\text{из}}^2 - b^2} = \sqrt{(10,9 \cdot 10^{-4})^2 - (4,71 \cdot 10^{-4})^2} = 9,83 \cdot 10^{-4} \text{ См},$$

тогда

$$r_k = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,83 \cdot 10^{-4}} = 1017 \text{ Ом}$$

В табл. 5 для различных токов однофазного замыкания на корпус при напряжениях 220, 380 и 660 В приведены расчетные данные максимально допустимого сопротивления заземления, обеспечивающего безопасность прикосновения к корпусу оборудования, минимально необходимое (критическое) сопротивление изоляции и предельные значения емкости фазы сети по отношению к земле.

Зависимости $R_3 = f(I_{\text{ОЗН}})$, $r_k = f(I_{\text{ОЗН}})$ и $C_{\text{ПР}} = f(I_{\text{ОЗН}})$, построенные по расчетным данным, позволяют определить предельные значения параметров изоляции сети и заземления в сетях напряжением 220, 380 и 660 В (см. рис. 9 и рис. 10). Например, если в сети напряжением 220 В достигнуто сопротивление изоляции 1,5 кОм, то для обеспечения безопасности прикосновения к корпусу оборудования, случайно оказавшегося под напряжением, сопротивление заземления не должно превышать 197 Ом, а ток замыкания на корпус не должен быть более 0,18 А (на рис. 9 значения параметров указаны стрелками – ход от точки *a* до точек *b*, *c*, *d* и *f*). По зависимости $C_{\text{ПР}} = f(I_{\text{ОЗН}})$ можно определить предельную емкость сети по отношению к земле (для данного случая $C_{\text{ПР}} = 2,12$ мкФ – ход от точки *a* до точек *b*, *e* и *q*). Аналогично предельные значения параметров можно определить по рис. 9 при напряжении сети 380 В (табл. 5).

Таблица 5

Расчетные данные R_3 , r_k , и $C_{\text{ПР}}$

$I_{\text{ОЗН}}, \text{ А}$	$R_3, \text{ Ом}$	220 В		380 В		660 В	
		$r_k, \text{ кОм}$	$C_{\text{ПР}}, \text{ мкФ}$	$r_k, \text{ кОм}$	$C_{\text{ПР}}, \text{ мкФ}$	$r_k, \text{ кОм}$	$C_{\text{ПР}}, \text{ мкФ}$
0,1	360	2,730	1,17	5,520	0,58	10,32	0,31
0,2	180	1,365	2,33	2,740	1,16	5,16	0,62
0,4	90	0,663	4,67	1,380	2,31	2,58	1,23
0,6	60	0,455	7,00	0,920	3,46	1,72	1,85
0,8	45	0,341	9,33	0,690	4,62	1,29	2,47
1,0	36	0,273	11,67	0,552	5,77	1,032	3,09
1,5	24	0,182	17,50	0,368	8,65	0,688	4,63
2,0	18	0,136	23,30	0,276	11,54	0,516	6,17
4,0	9	0,068	46,70	0,165	19,30	0,258	12,34

Задача может быть решена в обратном порядке. Пусть в сети напряжением 660 В (см.рис. 10) известно сопротивление заземления, равное

60 Ом, тогда ток однофазного замыкания не должен превышать 0,6 А, минимально необходимое сопротивление изоляции оценивается величиной 1,72 кОм (на рис. 10 – ход от точки *a* до точек *b*, *c*, *e* и *d*). Предельная емкость равна 1,85 мкФ (точки *f* и *q*). И, наконец, при известном токе однофазного замыкания на корпус оборудования, например, равном 0,3 А, в сети напряжением 660 В (см. рис. 10) для обеспечения безопасности прикосновения к корпусу сопротивления заземления не больше 120 Ом, минимально необходимое сопротивление изоляции составляет 3,44 кОм, а предельная емкость фазы сети – 0,92 мкФ (точки *h*, *l*, *p*, *m*, *n*, *k*, *s*).

Величины допустимого тока и напряжения прикосновения для длительности воздействия на организм человека более 1 с (см. табл. 2) определяют более высокий уровень электробезопасности, чем во многих странах мира. Вместе с тем сравнение полученных данных и результатов исследований токов утечки, напряжения прикосновения и параметров изоляции сетей и заземления электроустановок в ряде отраслей отечественной промышленности свидетельствует о реальных технических возможностях соблюдения нормативных требований при условии выполнения расчетных и контрольно-измерительных работ.

Рассмотренные взаимосвязи и приведенная методика оценки предельных значений параметров изоляции сети и заземления рекомендуются, главным образом, для оценки уровня электробезопасности сетей с изолированной нейтралью, напряжением до 1000 В, при проектировании и конструировании защитных средств, а также при расследовании электротравм, для разработки норм сопротивления заземляющих устройств и изоляции сетей электроустановок с компенсацией и без компенсации емкости сети по отношению к земле, при разработке инструкций по эксплуатационному контролю.

3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ

Для надежной оценки фактических значений параметров изоляции сети, заземления, тока однофазного замыкания и последующего их сравнения с расчетными данными целесообразно выполнить ряд эксплуатационных измерений в электрической сети, что и предусматривают ПУЭ, рекомендуя напряжение прикосновения определять специальным расчетом или экспериментально.

Следует напомнить, что активная проводимость характеризует изоляционные свойства диэлектрика, емкостная проводимость соответственно характеризует емкость сети, то есть количество подключенных электроприемников, и протяженность воздушных и кабельных линий, а полная проводимость характеризует величину тока однофазного замыкания на землю. Поэтому в практике эксплуатации электроустановок необходимо знать активную, емкостную и полную проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли.

Экспериментальная оценка параметров изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В находящейся под рабочим напряжением и тока однофазного замыкания на землю может быть выполнена методом амперметра-вольтметра, предложенным профессором Л.В.Гладилиным [2]. Указанный метод сочетает в себе простоту, безопасность и обеспечивает удовлетворительную точность при определении искомых величин. Схема измерения параметров изоляции сети по методу амперметра-вольтметра приведена на рис. 11.

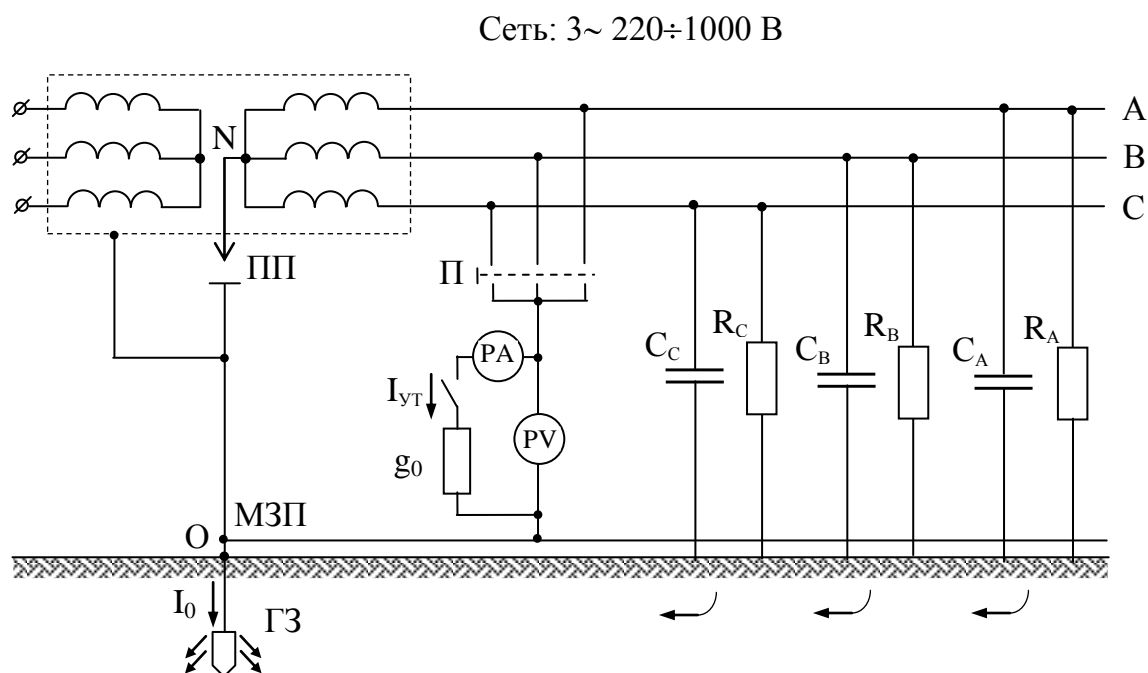


Рис. 11 Схема измерения параметров изоляции сети по методу амперметра-вольтметра: ПП – предохранитель пробивной; ГЗ – главный заземлитель; П – вольтметровый переключатель; МЗП – магистральный заземляющий провод; g_0 – дополнительная активная проводимость; I_0 – полный ток замыкания на землю; $I_{ут}$ – ток через проводимость g_0 ; PV – вольтметр; РА – амперметр.

Пусть вольтметровый переключатель П (рис. 11) находится в таком положении, что обеспечивает подключение активной дополнительной проводимости g_0 между фазой А электрической сети и землей. Напряжение фазы А электрической сети определится выражением

$$\dot{U}_{A0} = \frac{\dot{y}_B \cdot \dot{U}_{BA} - \dot{y}_C \cdot \dot{U}_{AC}}{\dot{y}_{A0} + \dot{y}_B + \dot{y}_C}, \quad (15)$$

где \dot{U}_{A0} – напряжение фазы А относительно земли; \dot{U}_{BA} , \dot{U}_{AC} – линейные напряжения между фазами В, А и фазами А, С электрической сети; \dot{y}_B , \dot{y}_C – полные проводимости изоляции фаз В и С относительно земли; \dot{y}_{A0} – полная проводимость фаз В А после подключения g_0 .

Обозначим через U_A величину напряжения фазы А электрической сети до подключения g_0 между фазой А электрической сети и землей.

Учитывая, что активные проводимости и емкостные проводимости фаз электрической сети равны, т.е.

$$g_A = g_B = g_C \quad \text{и} \quad b_A = b_B = b_C,$$

а также, что

$$\dot{y}_{A0} = g_0 + g_A - j b_A,$$

то уравнение (15) может быть преобразована к виду

$$U_{A0} = \frac{U_A}{2} \sqrt{\frac{[3(g_B + g_C) + \sqrt{3}(b_B + b_C)]^2 + [\sqrt{3}(g_B + g_C) + 3(b_B + b_C)]^2}{(g_A + g_B + g_C + g_0)^2 + (b_A + b_B + b_C)^2}} \quad (16)$$

Учитывая, что полная проводимость изоляции \dot{y}_Σ равна утроенному значению геометрической суммы активной и емкостной проводимости изоляции фазы электрической сети \dot{y} , уравнение (16) может быть преобразовано к виду

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_A \frac{\dot{y}_\Sigma}{\dot{y}_\Sigma - g_0},$$

откуда

$$\dot{y}_\Sigma = \frac{\dot{U}_{A0}}{\dot{U}_A - \dot{U}_{A0}} g_0, \quad (17)$$

С учетом введенных на рис. 11 обозначений:

– полная проводимость изоляции сети (например, фазы А)

$$\dot{y} = \frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_A}, \quad (18)$$

– суммарная проводимость изоляции сети

$$\dot{y}_{\Sigma 0} = \frac{\dot{I}_{yT}}{\dot{U}_{A0}}, \quad (19)$$

– активная проводимость изоляции сети

$$g = \frac{\dot{y}_{\Sigma 0}^2 - \dot{y}^2 - g_0^2}{2g_0}, \quad (20)$$

– емкостная проводимость изоляции сети

$$b = \sqrt{\dot{y}^2 - g^2}, \quad (21)$$

Определим величину тока протекающего через дополнительную проводимость g_0

$$\dot{I}_{yT} = \dot{U}_{A0} g_0, \quad (22)$$

Решая совместно уравнения (17) и (22) определим величину тока однофазного замыкания на землю

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_A \dot{I}_{yT}}{\dot{U}_A - \dot{U}_{A0}}, \quad (23)$$

При совместном решении уравнений (19) и (22) суммарная проводимость примет вид

$$\dot{y}_{\Sigma 0} = \frac{\dot{U}_{A0} g_0}{\dot{U}_A}, \quad (24)$$

Подставив в уравнение (20) уравнения (17) и (24) получим математическую зависимость определения активной проводимости изоляции сети

$$g = \frac{\frac{\dot{U}_{A0}^2 g_0^2}{\dot{U}_A^2} - \frac{\dot{U}_{A0}^2 g_0^2}{(\dot{U}_A - \dot{U}_{A0})^2} - g_0^2}{2g_0}, \quad (25)$$

После преобразования уравнения получим математическую зависимость определения активной проводимости изоляции сети

$$g = \left(\frac{\dot{U}_{A0}^2}{\dot{U}_A^2} - \frac{\dot{U}_{A0}^2}{(\dot{U}_A - \dot{U}_{A0})^2} - 1 \right) 0,5 g_0. \quad (26)$$

Емкостная проводимость изоляции определяется как геометрическая разность между полной и активной проводимостью сети.

Безопасность при прикосновении к корпусу электрооборудования, случайно оказавшегося под напряжением, будет обеспечиваться, если фактические параметры изоляции сети и заземления будут соответствовать безопасным значениям (см. рис. 8 ÷ 10).

Следует отметить, что метод амперметра-вольтметра не требует создания специального измерительного прибора. В качестве дополнительной проводимости можно использовать сопротивление типа ПЭ-200, с $R=1000,0$ Ом, а для измерения величины модуля напряжения фазы относительно земли – вольтметр марки Э-515, со шкалой измерения $U=0\div 500$ В.

4. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Трехфазные четырехпроводные сети с изолированной нейтралью без зануления широко применяются в передвижных электроустановках. Их применение регламентируется [1]. Преимущества этих сетей перед трехфазными трехпроводными сетями с изолированной нейтралью заключаются в наличии двух стандартных напряжений (линейного и фазного), в возможности равномерного распределения напряжения на фазах потребителя при несимметричной нагрузке, а перед сетями с глухозаземленной нейтралью с занулением – в высокой безопасности прикосновения к фазному проводу или к корпусу заземленного оборудования, случайно оказавшегося под напряжением, в меньшей величине (в сотни и тысячи раз) тока однофазного замыкания на землю (корпус).

В передвижных электроустановках, где количество установок и длина кабельных линий не нормируется [1] при однофазных замыканиях на землю через тело человека при его прикосновении непосредственно к токоведущей части или к корпусу незаземленного оборудования, случайно оказавшегося под напряжением, ток и напряжение прикосновения не должны превышать допустимых. В этом случае защитную роль должны выполнять изоляция сети и аппарат защитного отключения. Кроме того [1] в некоторых случаях

допускают не выполнять защитное заземление электроприемников передвижных электроустановок, питающихся от автономных передвижных источников с изолированной нейтралью. При таких допущениях значения напряжения прикосновения при однополюсном замыкании на землю не должны превышать нормированных, эти значения должны быть определены специальным расчетом или экспериментально.

Однако в практике эксплуатации сетей определить достоверно прямым измерением величину тока или напряжение прикосновения сложно. Эти величины зависят не только от параметров изоляции сети, но и от других факторов (площади контакта, переходного сопротивления, температуры и структуры грунта, модели тела человека, времени срабатывания защитного отключения и т.п.). Поэтому целесообразно расчетным путем установить предельные уровни параметров изоляции сети, при которых ток через человека не достигает опасных значений при любых неблагоприятных стечениях обстоятельств и при любых значениях неучтенных случайных факторов, а затем сравнить их с фактическими параметрами сети, установленными экспериментально.

Особенность оценки предельных значений параметров изоляции сети, удовлетворяющих требованиям [1], заключается в том, что в четырехпроводных трехфазных сетях с изолированной нейтралью без зануления отсутствует гальваническая связь сети с землей (корпусом) в отличие от четырехпроводных трехфазных сетей с глухим заземлением нейтрали с занулением, где нулевой провод соединен с заземлителем и корпусами источника и потребителя, и в отличие от трехпроводных трехфазных сетей с изолированной нейтралью, где нулевой провод отсутствует.

В случае прикосновения человека к фазному проводу в четырехпроводной сети с изолированной нейтралью без зануления ток утечки через тело человека возвращается в сеть к источнику тока как через активную и емкостную составляющие сопротивления изоляции двух других фаз по отношению к земле, так и через изоляцию нулевого провода, а в случае прикосновения к нулевому проводу через изоляцию фазных проводов (рис. 12). Таким образом, наличие нулевого изолированного от земли провода вносит некоторые особенности в расчеты предельных значений параметров изоляции сети.

Для упрощения расчета предварительно примем следующие допущения, а именно: что емкость фазных проводов и нулевого провода по отношению к земле равна нулю, т.е. $C_A = C_B = C_C = 0$ и $C_0 = 0$; активные сопротивления фаз по отношению к земле (корпусу) одинаковы, т.е. $R_A = R_B = R_C = r_{из}$ (в дальнейших расчетах эти упрощения будут сняты).

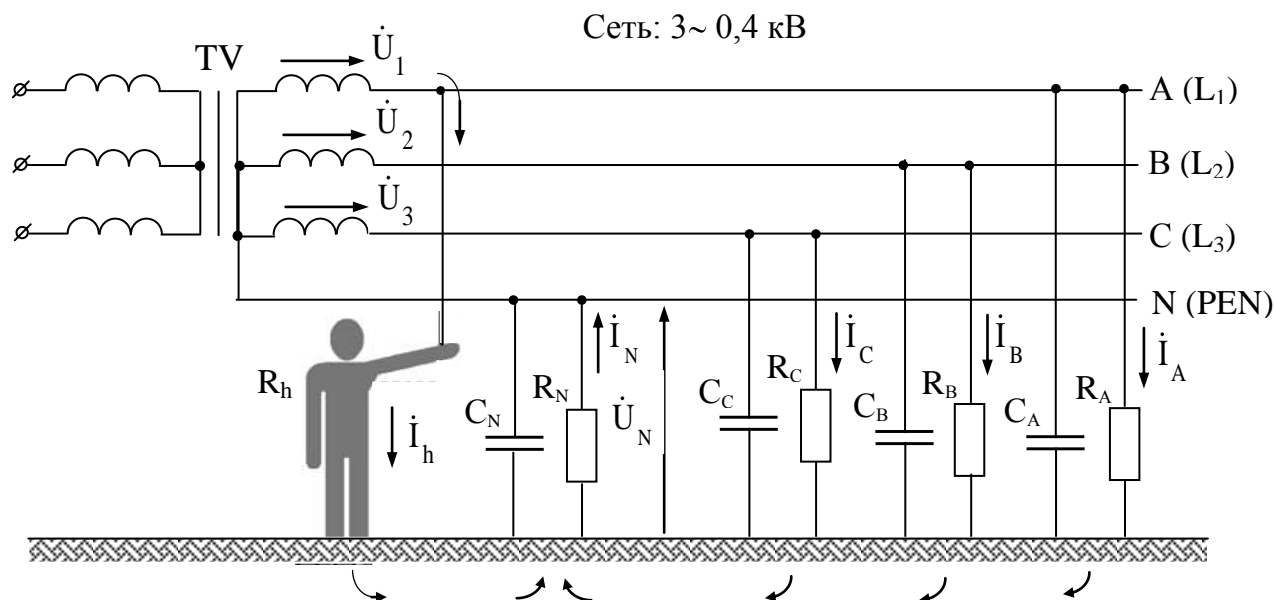


Рис. 12 Прикосновение человека к фазе в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью трансформатора

В трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью алгебраическая сумма токов для узла "земля" равна нулю. В случае прикосновения к фазе А эта сумма представляется следующим выражением:

$$\sum \dot{I} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_h - \dot{I}_N \quad (27)$$

Токи через изоляцию фазных проводов определяются:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (28)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (29)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{r_{из}} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{r_{из}}; \quad (30)$$

Токи через тело человека и изоляцию нулевого провода определяются:

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_A}{R_h} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{R_h}; \quad (31)$$

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_N}{R_N}, \quad (32)$$

где R_h – сопротивление тела человека; R_N – сопротивление изоляции нулевого провода по отношению к земле; U_N – напряжение смещения нейтрали (напряжение между нулевым проводом и землей после прикосновения).

Учитывая (28 ÷ 32), равенство (27) примет вид:

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{R_h} - \frac{\dot{U}_N}{R_N} = 0$$

или

$$\frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3}{r_{из}} - \frac{3\dot{U}_N}{r_{из}} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{R_h} - \frac{\dot{U}_N}{R_N} = 0$$

При равенстве фазных э. д. с. источника $U_1 = U_2 = U_3$ в сети с изолированной нейтралью с учетом сдвига фаз $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$, поэтому

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{R_h} - \frac{3\dot{U}_N}{r_{из}} - \frac{\dot{U}_N}{R_N} = 0,$$

откуда напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_1 r_{из} R_N}{3R_h R_N + r_{из} R_N + R_h r_{из}} \quad (33)$$

Ток через тело человека, прикоснувшегося к фазе, с учетом (33) определится:

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_N}{R_h} = \frac{\dot{U}_1 (3R_N - r_{из})}{3R_h R_N + r_{из} R_N + R_h r_{из}}$$

здесь U_1 – фазное напряжение сети, $U_1 = U_\phi$, т.е.

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi (3R_N - r_{из})}{3R_h R_N + r_{из} R_N + R_h r_{из}} \quad (34)$$

Для удовлетворения требований ПУЭ к напряжению прикосновения и допустимому току для человека минимально необходимое сопротивление изоляции сети $r_{из}$ будет определено из выражения (34), где I_h не должно превышать допустимого значения, т. е. $I_h \leq I_{доп}$

$$r_{из} \geq \frac{3R_N (\dot{U}_\phi - \dot{I}_{h доп} R_h)}{\dot{I}_{h доп} (R_h + R_N) - \dot{U}_\phi}. \quad (35)$$

С учетом реактивных составляющих сопротивлений изоляции сети выражения (34) и (35) примут вид

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi (3\dot{Z}_N + \dot{Z}_{из})}{3R_h R_N + \dot{Z}_{из} R_N + R_h \dot{Z}_{из}} \quad (36)$$

$$\dot{Z}_{из} \geq \frac{3\dot{Z}_N (\dot{U}_\phi - \dot{I}_{h \text{ доп}} R_h)}{\dot{I}_{h \text{ доп}} (R_h + \dot{Z}_N) - \dot{U}_\phi} \quad (37)$$

где $Z_{из}$ и Z_N – полные сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов.

Задаваясь значениями $\dot{Z}_{из}$ и \dot{Z}_N , можно определить по выражению (36) величину тока, проходящего через человека в случае его прикосновения к фазе [5].

На рис. 13 представлены зависимости величины тока при прикосновении к фазе от сопротивления сети для различных значений сопротивления изоляции нулевого провода Z_N , где сопротивление тела человека $R_h = 6$ кОм для времени воздействия более 1 с. Кривые занимают промежуточное положение между прямой тока прикосновения в сети с глухозаземленной нейтралью (кривая $Z_N = 0$) и кривой тока при прикосновении к фазе в трехпроводной сети с изолированной нейтралью.

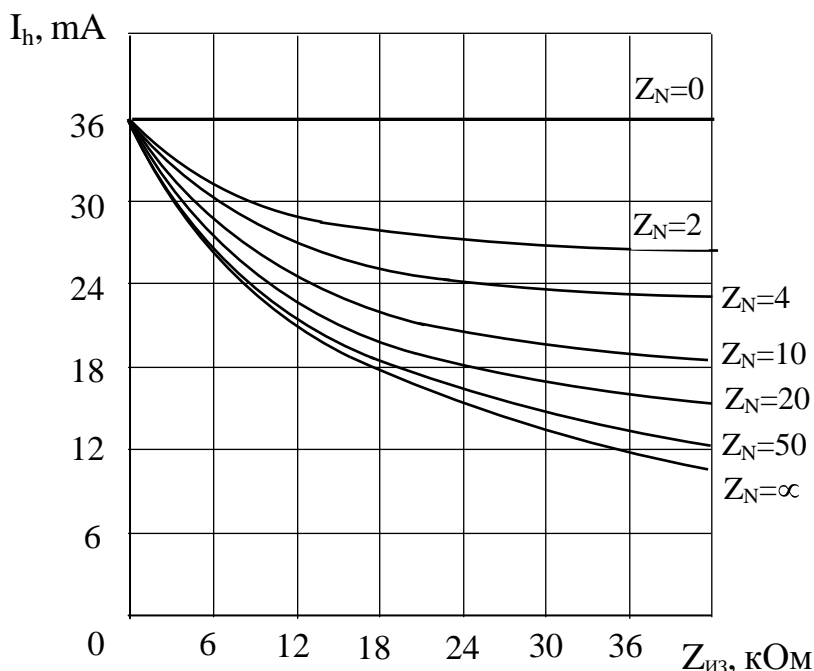


Рис. 13 Зависимость тока через человека, прикоснувшегося к фазе, от сопротивления изоляции фазных проводов при различных сопротивлениях нулевого провода Z_N : при $Z_N=0$ сеть с глухозаземленной нейтралью; при $Z_N=\infty$ сеть с изолированной нейтралью.

С увеличением сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов ток прикосновения к фазе снижается, однако всегда остается выше по сравнению с током прикосновения в трехпроводной сети с изолированной нейтралью (кривая $Z_N = \infty$).

Важное практическое значение имеет анализ выражения (37), по которому можно определить минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети, которое обеспечит безопасность, т.е. снизит ток через человека до нефибрилляционных значений. Этим самым сопротивление предотвратит смертельное поражение в случае прикосновения к фазному проводу при наличии защитного отключения и без него. При наличии и работоспособности аппаратов защитного отключения предельно допустимые значения параметров изоляции должны определяться с учетом временных характеристик. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, исключающие фибрилляцию сердца при аварийном режиме электроустановок производственного назначения напряжением до 1000 В с глухозаземленным нейтральным проводом и выше 1000 В с изолированной нейтралью даны в табл. 6.

Таблица 6

Минимально необходимые сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов для ограничения тока до 6 мА при прикосновении к фазе в сети напряжением 220 и 380 В

220 В		380 В	
$Z_{из}, \text{кОм}$	$Z_N, \text{кОм}$	$Z_{из}, \text{кОм}$	$Z_N, \text{кОм}$
∞	16,2	∞	30,7
253	20	743	35
105	30	236	50
72	50	164	70
63	70	132	100
64,7	64,7	122,7	122,7
56	100	109	200
53	200	96	500
50	500	95	1000
48,5	∞	92	∞

Анализ выражения (37) показывает, что для обеспечения безопасности в случае прикосновения к фазному проводу, т.е. для ограничения тока через человека до 6 мА при действии тока более 1 с в предположении отсутствия или неработоспособности защитного отключения, необходимо иметь сопротивление изоляции не менее величин, представленных в табл. 6.

При бесконечно большом сопротивлении изоляции ($Z_{из} \rightarrow \infty$), знаменатель выражения (37) стремится к нулю, т.е. можно записать

$$\dot{I}_{h \text{ доп}} (R_h + \dot{Z}_N) - \dot{U}_\phi = 0$$

Откуда для сети напряжением 230 В (см. табл. 6) минимально необходимое (критическое) сопротивление нулевого провода при $Z_{из} \rightarrow \infty$ будет определено

$$\dot{Z}_N = \frac{\dot{U}_\phi - \dot{I}_{h \text{ доп}} R_h}{\dot{I}_{h \text{ доп}}} = \frac{133 - 6 \cdot 6}{6} = 16,2 \text{ кОм}$$

А в случае $Z_{из} \rightarrow \infty$, что соответствует схеме трехпроводной сети изолированной нейтралью, минимально необходимое сопротивление изоляции определяется по выражению (11). т.е. $Z_{из} = 48,5 \text{ кОм}$.

Таким образом, существует взаимосвязь между $Z_{из}$ и Z_N , в частности, с увеличением сопротивления изоляции нулевого провода можно допустить снижение изоляции фазных проводов и наоборот. Однако даже при бесконечно большом сопротивлении изоляции нулевого провода, например, в сети 380 В, должно быть не менее критического значения 92 кОм, а минимально необходимое сопротивление нулевого провода должно быть не менее 30,7 кОм даже в том случае, когда сопротивление изоляции фазных проводов бесконечно большое. Обеспечить такие высокие уровни сопротивления изоляции сети в практике эксплуатации сети трудно. Такие уровни могут иметь место в коротких линиях с высоким уровнем культуры обслуживания, поэтому [1] предписывают применение защитного отключения, при котором обеспечить безопасность можно со значительным снижением $Z_{из}$ и Z_N . Применение защитного отключения не означает отказ от нормирования и поддержания необходимого уровня сопротивления изоляции сети. При наличии аппарата защитного отключения важное значение имеет время его срабатывания. Допустимые величины тока и напряжения прикосновения зависят от времени воздействия тока на человека и могут быть ограничены изоляцией сети, т.е. сопротивление изоляции должно быть

не любым, а таким, какое может ограничить ток через человека до безопасного при наличии средств защитного отключения. Следовательно, в сети, где используется защитное отключение, должен быть контроль изоляции, и, если уровень изоляции сети ниже необходимых величин, требуется увеличение быстродействия защитного отключения.

На рис. 14 представлены зависимости минимально необходимого сопротивления изоляции сети от величины сопротивления нулевого провода по выражению (37) при различном времени воздействия и соответствующего этому времени допустимого тока. Кривые показывают, что с увеличением Z_N минимально необходимое сопротивление изоляции фазных проводов $Z_{из}$ уменьшается. Например, при времени действия тока на организм человека в сети 380 / 220 В в течение 0,6 с (кривая 5 рис. 14, допустимый ток $I_{\text{доп}} = 85$ мА, $R_h = 1$ кОм) сопротивление изоляции нулевого провода должно быть не менее 7 кОм, а фазных проводов – не менее 6,5 кОм. В противном случае даже при высоком быстродействии защитного отключения кратковременный ток через человека может превысить допустимые величины.

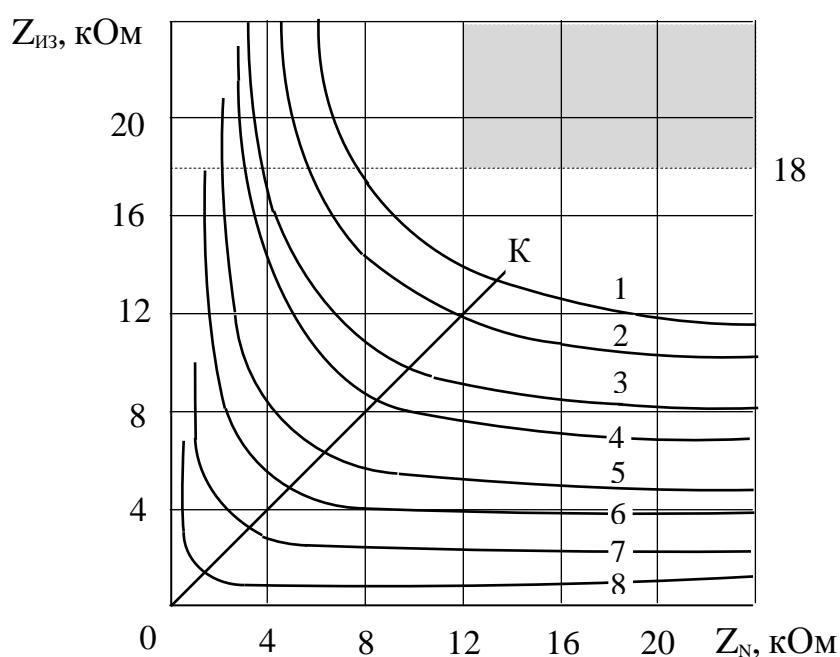


Рис. 14 Зависимости минимально необходимых значений сопротивления изоляции фаз сети от сопротивления изоляции нулевого провода при времени действия тока на человека: 1 – 1с; 2 – 0,9с; 3 – 0,8с; 4 – 0,7с; 5 – 0,6с; 6 – 0,5с; 7 – 0,4с; 8 – 0,3с.

Учитывая возможное появление асимметрии изоляции фаз до 20 % и то, что среди потребителей практически всегда имеются электродвигатели,

э.д.с. выбега которых может существовать после отключения в течение десятых долей секунды, сопротивление изоляции сети напряжением 380/220 В рекомендуется поддерживать при наличии и работоспособности защитного отключения на уровне $Z_{из} \geq 18$ кОм, $Z_N \geq 12$ кОм. Аналогично в сети напряжением 230/127 В – на уровне $Z_{из} \geq 9$ кОм, $Z_N \geq 7$ кОм (см. рис. 14). Не ниже этих уровней необходимо иметь уставки срабатывания аппаратов защитного отключения. При таком уровне сопротивления изоляции удовлетворяются требования в диапазоне времени действия тока $0,08 \div 1$ с (зона рекомендуемых значений сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов на рис. 14, заштрихована, прямая ОК соединяет точки кривых со значением сопротивлений $Z_{из} = Z_N$). Следует заметить, что при времени действия тока менее 0,2 с в сети напряжением 380/220 В при прикосновении к фазе ток не достигает 250 мА выше допустимых, поэтому кривые, соответствующие времени 0,2 с и меньше, не приведены на рис. 14.

Таким образом, для оценки безопасности сети, эксплуатируемой с устройством защитного отключения и без него, необходимо иметь фактические данные о величинах сопротивления изоляции сети.

Известно, что напряжение смещения нейтрали определяется по выражению

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{y}_A \cdot \dot{U}_1 + \dot{y}_B \cdot \dot{U}_2 + \dot{y}_C \cdot \dot{U}_3}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_N}, \quad (38)$$

где $\dot{y}_A, \dot{y}_B, \dot{y}_C, \dot{y}_N$ – полные проводимости изоляции фаз сети и нулевого провода относительно земли, соответственно. При замыкании одной из фаз на землю (например, фазы А) сопротивление изоляции ее по отношению к земле будет равно нулю, т.е. $\dot{z}_A = 0$. Умножим числитель и знаменатель выражения (38) на \dot{z}_A , а затем приравняем \dot{z}_A к нулю, тогда получим

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{z}_A \cdot \dot{y}_A \cdot \dot{U}_1 + \dot{z}_A \cdot \dot{y}_B \cdot \dot{U}_2 + \dot{z}_A \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{U}_3}{\dot{z}_A \cdot \dot{y}_A + \dot{z}_A \cdot (\dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_N)} = \dot{U}_1$$

Ток замыкания I_3 фазы А на землю возвращается к источнику через изоляцию фаз В и С и нулевого провода. Из этого следует, что

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_N \quad (39)$$

Примем $\dot{U}_1 = \dot{U}_\phi$, тогда с учетом сдвига фаз эдс источника $\dot{U}_2 = a^2 \cdot \dot{U}_\phi$, $\dot{U}_3 = a \cdot \dot{U}_\phi$, где a – оператор поворота на угол 120° против хода стрелки часов на комплексной плоскости. Для единичного вектора оператор a , в

соответствии с формулой Эйлера, определяется выражением

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (40)$$

где j – мнимая единица.

Токи в фазах и в нулевом проводе определяются выражениями:

$$\dot{I}_B = (\dot{U}_2 - \dot{U}_N) \cdot \dot{y}_B = (a^2 \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_\Phi) \cdot \dot{y}_B; \quad (41)$$

$$\dot{I}_C = (\dot{U}_3 - \dot{U}_N) \cdot \dot{y}_C = (a \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_\Phi) \cdot \dot{y}_C; \quad (42)$$

$$\dot{I}_N = \dot{U}_\Phi \cdot \dot{y}_N. \quad (43)$$

Положим, что $\dot{y}_B = \dot{y}_C = \dot{y}_{из}$, тогда выражение (4.13) с учетом (40) ÷ (43) примет вид:

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_\Phi \cdot (\dot{y}_N - 3\dot{y}_{из}),$$

отсюда следует

$$\dot{y}_N = \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_\Phi} + 3\dot{y}_{из}, \quad (44)$$

Проводимость изоляции фаз сети можно определить с достаточной для практики эксплуатации точностью по выражению:

$$\dot{y}_{из} = \frac{\dot{I}_3 - \dot{I}_N}{\dot{U}_\Phi} \quad (45)$$

или, при наличии напряжения смещения нейтрали, по выражению:

$$\dot{y}_{из} = \frac{\dot{I}_N}{\dot{U}_N}, \quad (46)$$

где \dot{I}_N – ток замыкания на землю нулевого провода, измеренный амперметром; \dot{U}_N – напряжение смещения нейтрали, измеренное вольтметром между нулевым проводом и землей.

Учитывая, что

$$\dot{z}_{из} = \frac{1}{\dot{y}_{из}}; \quad \dot{z}_N = \frac{1}{\dot{y}_N}, \quad (47)$$

то, для определения сопротивлений изоляции $\dot{z}_{из}$ и нулевого провода \dot{z}_N относительно земли (корпуса) необходимо измерить \dot{I}_3 , \dot{I}_N , и \dot{U}_N . Измерение этих параметров для схемы, приведенной на (рис. 15, а и б), можно произвести в следующем порядке:

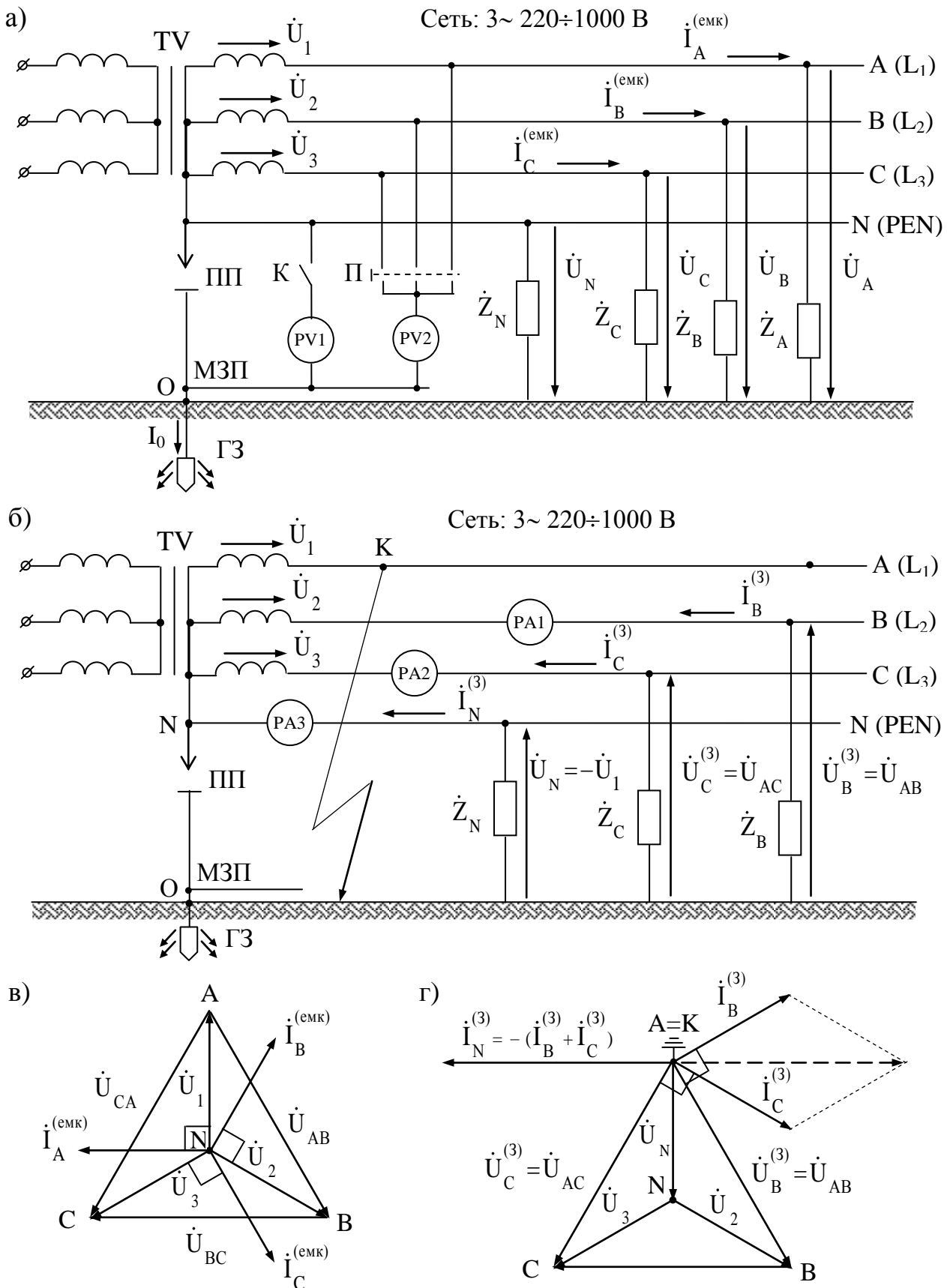


Рис. 15 Измерение параметров изоляции сети: а) – схема полнофазного симметричного режима; б) – схема замыкания на землю фазы А; в) – векторная диаграмма токов и напряжений для полнофазного режима; г) – векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании на землю.

1. Вольтметром PV2 (рис. 15, а) измеряются напряжения всех трех фаз сети по отношению к земле, их значения должны быть примерно одинаковыми и равными фазному $U_1 \approx U_2 \approx U_3 \approx U_\phi$, одновременно следует измерить напряжение U_N между нулевым проводом и землей вольтметром PV1(см. рис. 15, а). Если на одной из фаз напряжение близко к нулю, а на других оно стремится к линейному, что свидетельствует о наличии однофазного замыкания на землю, то перед дальнейшими измерениями это повреждение должно быть устранено.

2. В нормальном режиме напряжения проводов А, В и С по отношению к земле равны соответствующим фазным напряжениям U_1, U_2 и U_3 . Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду (рис. 15, в), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали N отсутствует: $U_N = 0$. Если пренебречь распределенным активным сопротивлением фаз относительно земли, то под действием фазных напряжений через сопротивления \dot{Z}_A, \dot{Z}_B и \dot{Z}_C (рис. 15, а) проходят емкостные токи $\dot{I}_A^{(емк)}$, $\dot{I}_B^{(емк)}$ и $\dot{I}_C^{(емк)}$ (рис. 15, в), опережающие фазные напряжения на 90° .

$$\dot{I}_A^{(емк)} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{Z}_1} = \dot{U}_1 \cdot j\omega \cdot C_{уд} ; \quad (48)$$

$$\dot{I}_B^{(емк)} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_2} = \dot{U}_2 \cdot j\omega \cdot C_{уд} ; \quad (49)$$

$$\dot{I}_C^{(емк)} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{Z}_3} = \dot{U}_3 \cdot j\omega \cdot C_{уд} , \quad (50)$$

где $C_{уд}$ – удельная емкость одной фазы на 1 км сети.

При коротком замыкании, например фазы А (рис. 15, б) напряжение нейтрали \dot{U}_N по отношению к земле становится равным напряжению между точками К и N (рис. 15, б). В соответствии с векторной диаграммой (рис. 15, г) напряжение нейтрали \dot{U}_N равно по величине и обратно по знаку напряжению \dot{U}_1 заземлившейся фазы, а напряжения $\dot{U}_B^{(3)}$ и $\dot{U}_C^{(3)}$ неповрежденных фаз относительно земли повышаются до междуфазного (рис. 15, г). В неповрежденных фазах с учетом выражений (49) и (50) под действием напряжений $\dot{U}_B^{(3)} = \dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_C^{(3)} = \dot{U}_{AC}$ появляются токи $\dot{I}_B^{(3)}$ и $\dot{I}_C^{(3)}$, соответственно, опережающие на 90° эти напряжения (рис. 15, г). В соответствии с первым законом Кирхгофа для точки N (рис. 15, б) справедливо выражение:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N^{(3)} &= -(\dot{I}_B^{(3)} + \dot{I}_C^{(3)}) = -(\dot{U}_{AB} \cdot j\omega \cdot C_{уд} + \dot{U}_{AC} \cdot j\omega \cdot C_{уд}) = -j\omega \cdot C_{уд} \cdot (\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{AC}) = \\ &= -j\omega \cdot C_{уд} \cdot 3 \cdot \dot{U}_N = j\omega \cdot C_{уд} \cdot 3 \cdot \dot{U}_1 = 3 \cdot \dot{I}_\Phi^{(емк)}, \end{aligned}$$

где $\dot{I}_\Phi^{(емк)}$ – емкостной ток фазы для полнофазного режима (рис. 15, а).

Таким образом, ток в месте замыкания $\dot{I}_N^{(3)}$ равен утроенному току нормального емкостного тока фазы $\dot{I}_\Phi^{(емк)}$. В свою очередь, токи в неповрежденных фазах $\dot{I}_B^{(3)}$ и $\dot{I}_C^{(3)}$ в $\sqrt{3}$ раз больше тока $\dot{I}_\Phi^{(емк)}$.

Амперметрами РА1 и РА2 (рис. 15, б) измеряются токи в неповрежденных фазах, а амперметром РА3 измеряется ток короткого замыкания I_N фазы А на землю. Аналогичным образом производятся измерения при поочередном замыкании фаз В и С.

3. По выражению (44) ÷ (47) определяются сопротивления изоляции $\dot{z}_{из}$ и нулевого провода \dot{z}_N .

Безопасность сети при прикосновении к токоведущей части будет обеспечиваться, если фактические величины $\dot{z}_{из}$ и \dot{z}_N будут выше предельных значений, приведенных в табл. 6, в сетях без использования устройств защитного отключения, и, если выше предельных значений, ограниченных кривыми, представленными на рис. 13 при наличии и работоспособности защитного отключения.

Анализ результатов исследований параметров изоляции сети в передвижных электроустановках и сопоставление полученных расчетных данных свидетельствуют о реальных возможностях удовлетворения требований нормативных документов.

Приведенную методику оценки расчетных и экспериментальных значений параметров изоляции в трехфазных сетях четырехпроводных с изолированной нейтралью рекомендуется использовать в практике эксплуатации сетей передвижных электроустановок, при разработке и модернизации средств защитного отключения.

5. ТОКИ ЧЕРЕЗ ЧЕЛОВЕКА И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ФАЗ СЕТИ ПРИ АСИММЕТРИИ ИЗОЛЯЦИИ

5.1 ТРЕХПРОВОДНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ

Ток прикосновения к фазе существенно зависит от различия величин сопротивления изоляции и емкости отдельных фаз сети по отношению к

земле, т.е. от асимметрии изоляции фаз. Причинами появления асимметрии обычно являются: неравномерное ухудшение изоляции жил кабелей, проводов воздушных линий, обмоток двигателей; состояние изоляторов коммутационных и распределительных аппаратов; неравномерное распределение влажности воздуха (газа) внутри корпусов электроаппаратуры и др. Появление напряжения смещения нейтрали сети может быть вызвано асимметрией нагрузки (неравномерное распределение нагрузки по фазам потребителя), неодинаковой проводимостью силовых жил кабелей и проводов, неодинаковым сопротивлением контактных соединений по фазам в процессе передачи электроэнергии и т.п.

Асимметрия сопротивления изоляции фаз по отношению к земле и асимметрия напряжений в целом ухудшают условия электробезопасности. Ниже показано, что большую опасность представляет прикосновение к фазе, обладающей большим сопротивлением по сравнению с другими фазами, это положение вытекает из известных основ электротехники. Для известных значений параметров изоляции сети при асимметрии, расчет тока через тело человека произведем с учетом обозначений приведенных на рис. 16.

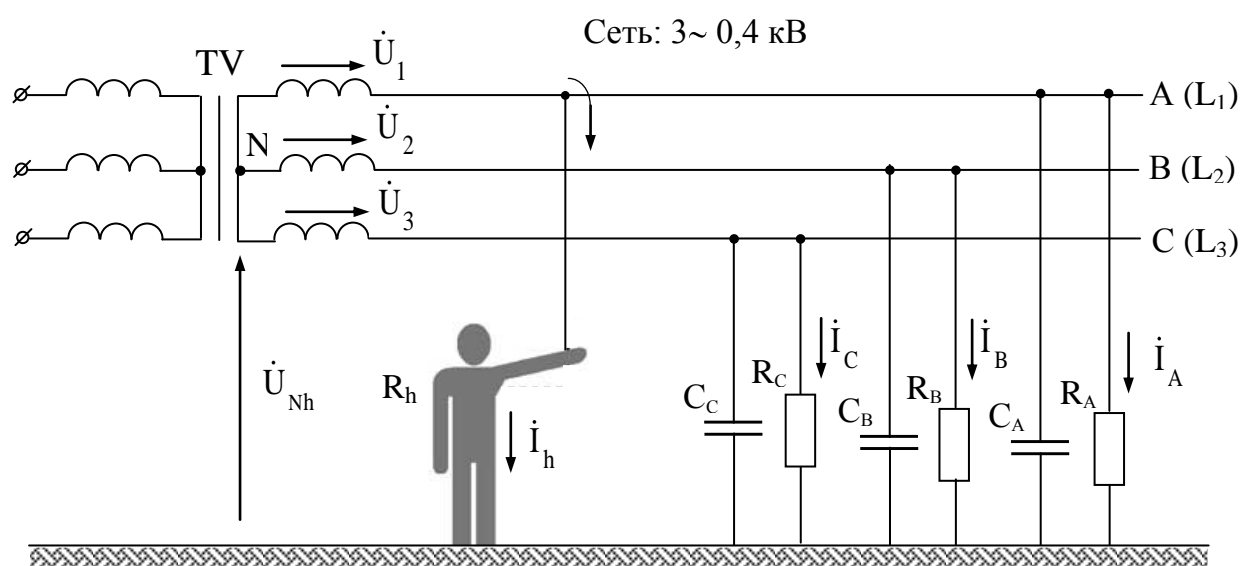


Рис. 16 Прикосновение человека к фазе в трехфазной трехпроводной сети с изолированной нейтралью трансформатора

Используя известные соотношения напряжения нейтрали и напряжения фазы относительно земли через проводимости изоляции имеем:

$$\dot{U}_N = \dot{U}_\Phi \frac{\dot{y}_A + \dot{y}_B \cdot a^2 + \dot{y}_C \cdot a}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C}, \quad (51)$$

где \dot{U}_ϕ – напряжение фазы относительно земли, соответствующее нормальному симметричному режиму работы сети; \dot{U}_N – напряжение смещения нейтрали; $\dot{y}_A, \dot{y}_B, \dot{y}_C$ – полные проводимости изоляции фаз сети относительно земли; a – операторный множитель определяемый выражением (40).

Прикосновение человека к фазе (например, фазе А – см. рис. 16) эквивалентно введению в эту фазу дополнительной проводимости \dot{y}_h равной проводимости тела человека. По аналогии с выражением (51), напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{Nh} в этом случае равно

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\phi \frac{\dot{y}_A + \dot{y}_h + \dot{y}_B \cdot a^2 + \dot{y}_C \cdot a}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_h} \quad (52)$$

Ток через тело человека \dot{I}_h определится выражением

$$\dot{I}_h = (\dot{U}_1 - \dot{U}_{Nh}) \cdot g_h \quad (53)$$

Введем следующие допущения: емкость фазных проводов по отношению к земле равна нулю, т.е. $C_A = C_B = C_C = 0$, а проводимость тела человека чисто активная, т.е. $\dot{y}_h = g_h$. С учетом сделанных допущений уравнение (52) примет вид

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\phi \frac{g_A + g_h + g_B \cdot a^2 + g_C \cdot a}{g_A + g_B + g_C + g_h} \quad (54)$$

Асимметрию сопротивлений (проводимостей) изоляции фаз сети будем характеризовать величиной n . Она показывает, во сколько раз проводимость изоляции фазы, к которой прикасается человек (фазы утечки), больше проводимости двух других фаз. Например, при $g_A = n \cdot g_B = n \cdot g_C$ проводимость фазы А в n раз выше, чем проводимость фаз В и С. Величина n может принимать значения от 0 до $+\infty$. При $n = 1$ изоляция фаз симметрична, при $n = 0$ – обрыв фазы А. Если $n = \infty$, то режим однофазного замыкания фазы А на землю. Когда $n < 1$, проводимость изоляции фазы А по отношению к земле меньше проводимости фаз В и С. Например, при $n = 0,8$ проводимость фазы А на 20 % ниже проводимостей изоляции фаз В и С. При $n > 1$ меньшей проводимостью изоляции обладают провода фаз В и С.

Пусть $g_B = g_C = g_{из}$, тогда $g_A = n \cdot g_{из}$ и выражение (54) с учетом (40) примет вид

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_{\Phi} \frac{n \cdot g_{из} + g_h + g_{из} \cdot a^2 + g_{из} \cdot a}{n \cdot g_{из} + g_{из} + g_{из} + g_h} = \dot{U}_{\Phi} \frac{(n-1) \cdot g_{из} + g_h}{(n+2) \cdot g_{из} + g_h} \quad (55)$$

Учитывая, что $g_{из}=1/r_{из}$ и $g_h=1/R_h$, после преобразований (55) получим

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_{\Phi} \frac{(n-1) \cdot R_h + r_{из}}{(n+2) \cdot R_h + r_{из}} \quad (56)$$

С учетом выражений (54) и (56) ток через тело человека при асимметрии изоляции сети равен

$$\dot{I}_h = (\dot{U}_1 - \dot{U}_{Nh}) \cdot g_h = (\dot{U}_{\Phi} - \dot{U}_{\Phi} \frac{(n-1) \cdot R_h + r_{из}}{(n+2) \cdot R_h + r_{из}}) \cdot g_h = \frac{3 \dot{U}_{\Phi}}{(n+2) \cdot R_h + r_{из}} \quad (57)$$

С учетом реактивных (емкостных) составляющих сопротивлений выражение (57) примет вид

$$\dot{I}_h = \frac{3 \dot{U}_{\Phi}}{(n+2) \cdot R_h + z_{из}} \quad (58)$$

Зависимость тока через человека, прикоснувшегося к фазе сети с асимметрией изоляции, от сопротивления изоляции сети при различных значениях коэффициента асимметрии n представлены на рис. 17.

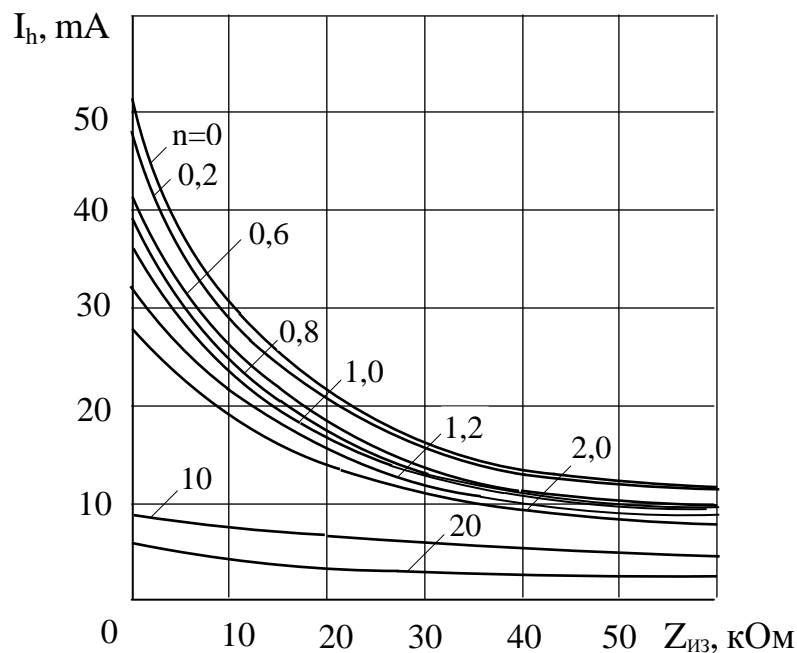


Рис. 17 Зависимости тока через тело человека при прикосновении к фазе от сопротивления изоляции фаз для различных значений коэффициента асимметрии n .

Минимально необходимое сопротивление изоляции сети Z_{\min} (кОм), каждой из двух фаз (В и С) по отношению к земле при прикосновении к третьей фазе (А) определится из выражения (58)

$$z_{\min} = \frac{3 \dot{U}_{\Phi}}{I_{\text{hдоп}}} - (n+2) \cdot R_h, \quad (59)$$

где $I_{\text{hдоп}}$ – предельно допустимый ток для человека, мА; R_h – сопротивление тела человека, соответствующее $I_{\text{hдоп}}$, кОм.

Пример. Определить минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети напряжением 380/220 В при прикосновении к фазе при $n = 0,6$. Ток через человека должен быть ограничен до $I_{\text{hдоп}} = 50$ мА при времени воздействия 1 с (см. табл. 2).

В соответствии с выражением (59) имеем

$$z_{\min} \geq \frac{3 \cdot 220}{50 \cdot 10^{-3}} - (0,6+2) \cdot 10^3 = 10,6 \text{ кОм}$$

Из выражения (59) следует, что наибольшую опасность однофазного прикосновения при асимметрии представляет случай, когда человек касается фазы находящейся по той или иной причине в ненагруженном состоянии, т.е. при $n=0$. В частности, для приведенного выше примера минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети определится выражением

$$z_{\min} = \frac{3 \cdot 220}{50 \cdot 10^{-3}} - (0,6+0) \cdot 10^3 = 12,6 \text{ кОм}$$

С учетом выражения (59) для заданных значений U_{Φ} , $z_{\text{из}}$, R_h и $I_{\text{hдоп}}$ допустимая асимметрия изоляции сети определится в виде

$$n_{\text{доп}} = \frac{3 U_{\Phi}}{I_{\text{hдоп}} \cdot R_h} - \frac{z_{\text{из}}}{R_h} - 2$$

5.2 ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ

В четырехпроводных трехфазных сетях с изолированной нейтралью без зануления, которые нашли широкое применение в передвижных электроустановках, питающихся от автономных источников [3], особую опасность представляют прикосновения к нулевому проводу (рис. 18), где его суммарная длина часто превышает длину фазного провода сети. В связи с чем вероятность прикосновения к нулевому проводу значительно выше, чем

к фазному. В этом случае ток через человека протекает через изоляцию фазных проводов сети и является результирующим током утечки всех трех фаз.

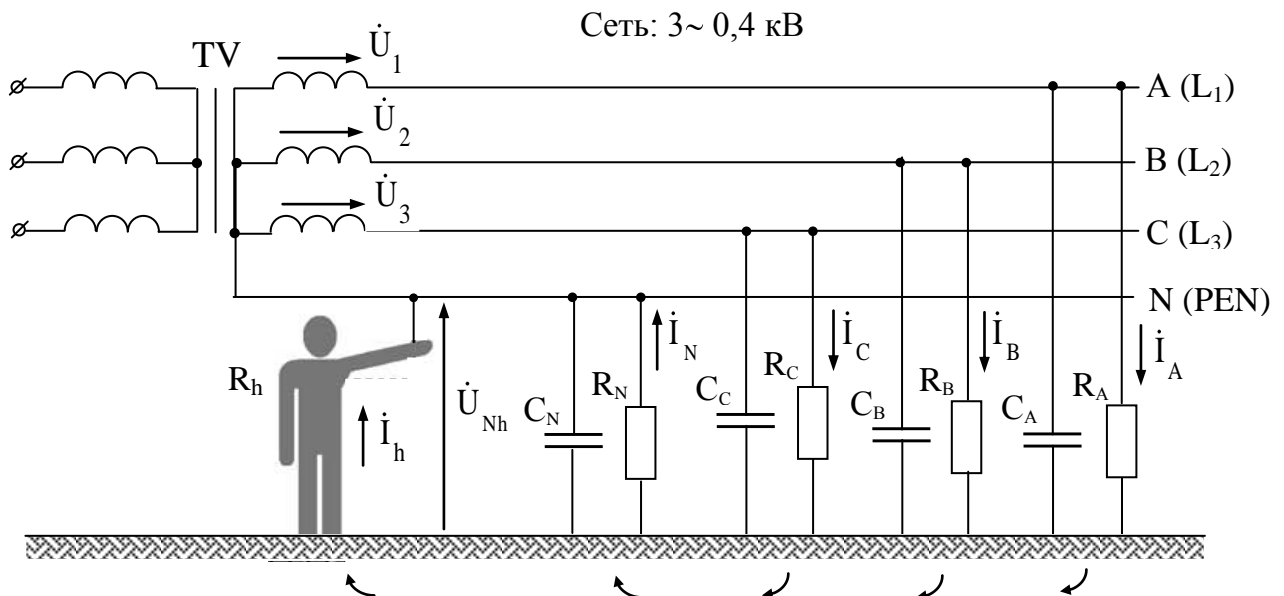


Рис. 18 Прикосновение человека к нейтрали в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью трансформатора

Следует заметить, что ток через человека при его прикосновении к нулевому проводу будет протекать только в том случае, когда имеет место асимметрия изоляции фазных проводов сети, либо асимметрия фазных напряжений, т.е. когда существует напряжение между нулевым проводом и землей (корпусом) – напряжение смещения нейтрали. Результаты измерений свидетельствуют о том, что асимметрия изоляции фазных проводов, как правило, не превышает 15 %, а асимметрия фазных напряжений – 5 %. В редких случаях (при неравномерной нагрузке фаз и в разветвленных сетях) суммарная асимметрия достигает 25 %. Кроме того, сопротивление изоляции нулевого провода по отношению к земле (корпусу) находится в пределах 60÷120 % от сопротивления изоляции фазного провода.

Величина тока при прикосновении к нулевому проводу зависит от ряда факторов, главными из которых является напряжение сети, сопротивление изоляции фазных и нулевого проводов, асимметрия напряжений, сопротивление цепи тела человека.

Для оценки опасности прикосновения к нулевому проводу (величины тока через тело человека, предельно допустимых параметров изоляции фазных и нулевого проводов, которые могут ограничить ток до допустимых

значений) целесообразно рассмотреть взаимосвязь параметров изоляции сети и критериев электробезопасности.

Известно, что напряжение смещения нейтрали в трехфазной сети переменного тока определяется по выражению [5]

$$\dot{U}_N = \dot{U}_\Phi \frac{\dot{y}_A + \dot{y}_B \cdot a^2 + \dot{y}_C \cdot a}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_N}, \quad (60)$$

где $\dot{y}_A, \dot{y}_B, \dot{y}_C, \dot{y}_N$ – полные проводимости изоляции фаз сети и нулевого провода относительно земли, соответственно; \dot{U}_Φ – напряжение фазы относительно земли, соответствующее нормальному симметричному режиму работы сети; \dot{U}_N – напряжение смещения нейтрали; a – операторный множитель определяемый выражением (40).

Прикосновение человека к нейтрали (см. рис. 18) эквивалентно введению в нейтраль дополнительной проводимости \dot{y}_h равной проводимости тела человека. По аналогии с выражением (60), напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{Nh} в этом случае равно

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\Phi \frac{\dot{y}_A + \dot{y}_B \cdot a^2 + \dot{y}_C \cdot a}{\dot{y}_A + \dot{y}_B + \dot{y}_C + \dot{y}_N + \dot{y}_h} \quad (61)$$

По аналогии с п. 5.1 введем следующие допущения: $C_A = C_B = C_C = 0$ и $\dot{y}_h = g_h$. Из уравнения (61) имеем

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\Phi \frac{g_A + g_B \cdot a^2 + g_C \cdot a}{g_A + g_B + g_C + g_N + g_h} \quad (62)$$

Положим, что $g_B = g_C = g_{из}$, тогда $g_A = n \cdot g_{из}$ и выражение (62) с учетом (40) примет вид

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\Phi \frac{n \cdot g_{из} + g_{из} \cdot a^2 + g_{из} \cdot a}{n \cdot g_{из} + g_{из} + g_{из} + g_N + g_h} = \dot{U}_\Phi \frac{(n-1) \cdot g_{из}}{(n+2) \cdot g_{из} + g_N + g_h} \quad (63)$$

Заменим проводимости в выражении (62) на соответствующие им сопротивления, т.е. $g_h = 1/R_h$; $g_{из} = 1/R_{из}$; $g_N = 1/R_N$. Получим

$$\dot{U}_{Nh} = \dot{U}_\Phi \frac{(n-1) \cdot R_N \cdot R_h}{(n+2) \cdot R_N \cdot R_h + R_{из} \cdot R_h + R_{из} \cdot R_N} \quad (64)$$

Ток через человека при его прикосновении к нулевому проводу определится выражением

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_{Nh}}{R_h} = \dot{U}_\Phi \frac{(n-1) \cdot R_N}{(n+2) \cdot R_N \cdot R_h + R_{из} \cdot R_h + R_{из} \cdot R_N} \quad (65)$$

Зависимости $I_h = f(Z_{из})$ для различных значений n при $R_h = 6 \text{ кОм}$ представлены на рис. 19 (время воздействия тока более 1 с).

На рис. 20 представлены зависимости $I_h = f(Z_{из})$ при $R_h = 1 \text{ кОм}$ (время воздействия тока менее 1с).

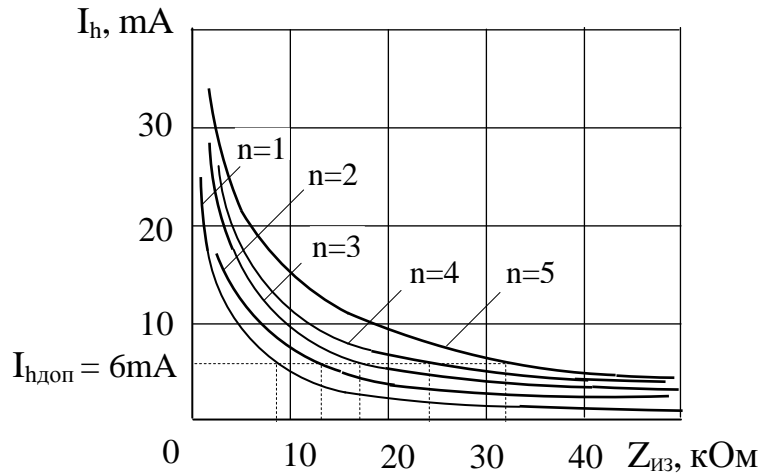


Рис. 19 Зависимости тока через тело человека $I_h=f(Z_{из})$ при $R_h=6\text{кОм}$ (время воздействия $t_{возд} > 1\text{с}$)

Точкой "а" на рис. 20 отмечены минимально необходимые сопротивления изоляции при различных $Z_{из} = R_{из}$.

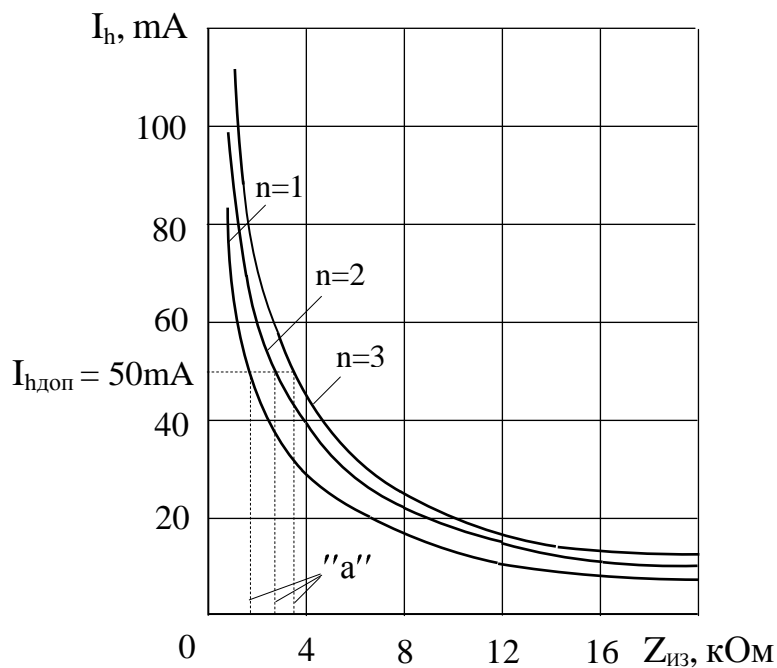


Рис. 20 Зависимости тока через тело человека $I_h=f(Z_{из})$ при $R_h=1\text{кОм}$ (время воздействия $t_{возд} < 1\text{с}$)

Минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети, которое может ограничить ток через человека до допустимых значений, может быть определено из выражения (65), т.е.

$$R_{из} \geq \frac{\dot{U}_\phi \cdot (n-1) \cdot R_N - \dot{I}_{доп} \cdot (n+2) \cdot R_N \cdot R_h}{(R_h + R_N)}$$

На рис. 21 представлены зависимости $Z_{min} = f(Z_{из})$ для различных значений показателя асимметрии n при $R_h = 6$ кОм и $I_{доп} = 6$ мА.

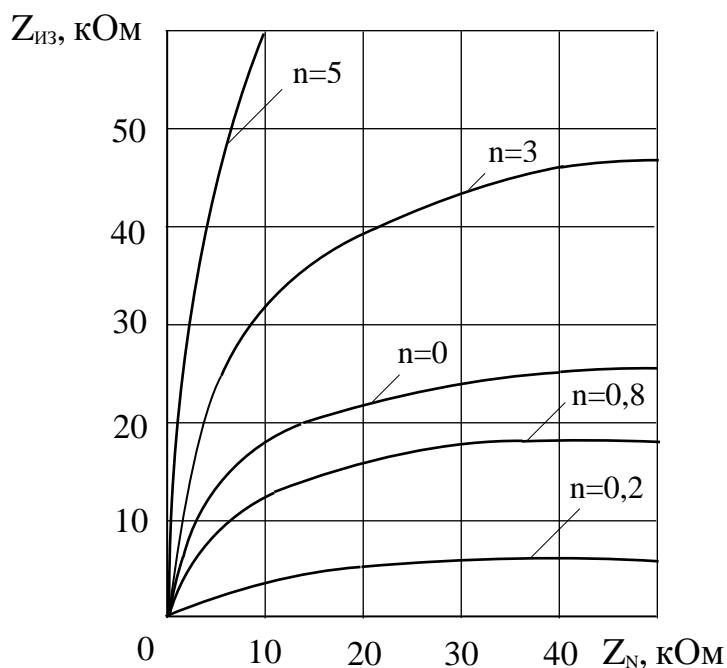


Рис. 21 Минимально необходимое сопротивление изоляции фаз при различных значениях n ($I_{доп} = 6$ мА, прикосновение к нулевому проводу в четырехпроводной сети с изолированной нейтралью).

Анализ формулы (65) позволяет получить важные для практики эксплуатации электрических сетей выводы в схемах с однократной продольной и поперечной несимметрией:

1. В случае $n = 0$, что соответствует обрыву фаз А на рис. 18, ток через тело человека, прикоснувшегося к нулевому проводу, определится по выражению

$$\dot{I}_h = - \dot{U}_\phi \frac{R_N}{2 \cdot R_N \cdot R_h + R_{из} \cdot R_h + R_{из} \cdot R_N} \quad (66)$$

Знак минус в выражении (5.16) указывает на тот факт, что направление тока I_h на рис. 5.3 изменится на противоположное.

2. При разрыве двух фаз участков сети, например фазы А и фазы В, ток через тело человека, с учетом выражений (61) и (65) определится в виде

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi \cdot R_N \cdot a}{R_N \cdot R_h + R_{из} \cdot R_h + R_{из} \cdot R_N}$$

3. При однофазном на землю коротком замыкании фазы А, ток через тело человека при прикосновении к нулевому проводу достигает максимального значения и с учетом выражений (61) и (65) равен

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi}{R_h}$$

4. При двухфазном на землю коротком замыкании, например фазы А и фазы В, ток через тело человека, принимая во внимание выражения (61) и (65) равен

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi \cdot (n + a^2)}{R_h \cdot (n + 1)}$$

Зависимости $I_h = f(n)$ при двухфазном на землю коротком замыкании ($g_B = g_{из} = \infty$ и $g_A = n \cdot g_{из} = \infty$) для $R_h = 6$ кОм и $R_h = 3$ кОм представлены на рис. 22.

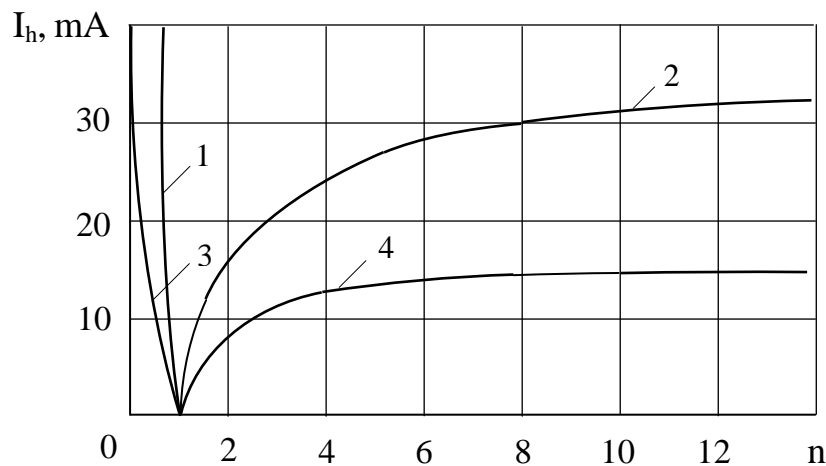


Рис. 22 Зависимости тока через тело человека $I_h=f(n)$, прикоснувшегося к нулевому проводу, от показателя асимметрии изоляции фаз в сети напряжением 380/220 В: 1,2 – при $R_h=3$ кОм; 3,4 – при $R_h=6$ кОм;

При снижении n от 1 до 0 ток через человека стремительно увеличивается от 0 до 36,7 мА при $R_h = 6$ кОм и от 0 до 73,3 мА при $R_h = 3$ кОм, а если сопротивление тела человека составляет 1 кОм, то ток может достигнуть 220 мА. При $n \rightarrow \infty$ ток через человека, прикоснувшегося к нулевому проводу, достигает максимального значения, равного 18,3 мА при $R_h = 6$ кОм, 36,7 мА при $R_h = 3$ кОм и 110 мА при $R_h = 1$ кОм.

Необходимо отметить, что при $n = 1$, что соответствует симметрии изоляции фаз по отношению к земле, ток через человека, прикоснувшегося к нулевому проводу, равен нулю.

6. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ИХ АНАЛИЗ НА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

6.1 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ

Проведение расчетов несимметричных режимов описывающих токораспределение в трехфазных электрических сетях в фазных координатах, как правило, связано с трудоемкими матричными операциями при решении системы линейных алгебраических уравнений высокого порядка, для решения которой могут использоваться прямые методы, такие, как модификация метода Гаусса, методы окаймления и др.

Например, связь между вектором падения напряжения вдоль участка линии $\Delta \dot{U}$ и вектором токов в фазах \dot{I} будет иметь вид следующего матричного равенства:

$$\|\Delta \dot{U}\| = \|\dot{Z}\| \cdot \|\dot{I}\|$$

Соответственно, уравнения по определению емкостных токов в фазах \dot{I}_c через частичные емкостные проводимости фаз линии \dot{Y} можно представить в виде

$$\|\dot{I}_c\| = \|\dot{Y}\| \cdot \|\dot{U}\|$$

Существенного упрощения при решении данных уравнений можно добиться введением матричного преобразования подобия $\|C\|$, позволяющего диагонализировать матрицу погонных параметров $\|\dot{Z}\|$ и матрицу частичных емкостных проводимостей $\|\dot{Y}\|$. Наибольшее распространение получило преобразование фазных координат к симметричным составляющим – прямой, обратной и нулевой последовательностям (система координат 1–2–0).

Для определения коэффициентов матрицы $\|C\|$, один из столбцов матрицы выберем таким образом, чтобы в наиболее часто встречающемся

симметричном режиме, когда напряжения и токи фаз образуют систему прямой последовательности ($\dot{U}_A, a^2 \cdot \dot{U}_A, a \cdot \dot{U}_A$ где $a = e^{j2\pi/3}$), какое-либо из фазных напряжений (или токов), например \dot{U}_A , определялось только одной составляющей – \dot{U}_1 . Аналитически указанное ограничение можно записать следующим образом: $\dot{U}_A = \dot{U}_1, \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = 0$. Тогда

$$\begin{Bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{Bmatrix} = \|C\| \times \begin{Bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & \kappa_1 & \kappa_3 \\ 1 & \kappa_2 & \kappa_4 \\ 1 & -\kappa_1 - \kappa_2 & -\kappa_3 - \kappa_4 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{Bmatrix}$$

или

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_0 + \kappa_1 \cdot \dot{U}_1 + \kappa_3 \cdot \dot{U}_2 = \kappa_1 \cdot \dot{U}_1 = \dot{U}_A \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_0 + \kappa_2 \cdot \dot{U}_1 + \kappa_4 \cdot \dot{U}_2 = \kappa_2 \cdot \dot{U}_1 = a^2 \cdot \dot{U}_A \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_0 - (\kappa_1 + \kappa_2) \cdot \dot{U}_1 - (\kappa_3 + \kappa_4) \cdot \dot{U}_2 = -(\kappa_1 + \kappa_2) \cdot \dot{U}_1 = a \cdot \dot{U}_A \end{aligned}$$

Если выбрать такие значения коэффициентов, что будут выполняться следующие тождества $\kappa_1 = 1, \kappa_2 = a^2, \kappa_1 + \kappa_2 = -a$, то значения фазных напряжений будут определяться только одной составляющей – \dot{U}_1 .

В свою очередь, сделанное допущение о том, что при симметричном режиме, когда напряжения и токи фаз образуют систему обратной последовательности ($\dot{U}_A, a \cdot \dot{U}_A, a^2 \cdot \dot{U}_A$), значения фазных напряжений определяются только одной составляющей – \dot{U}_2 , позволяет получить дополнительные ограничения в виде $\dot{U}_A = \dot{U}_2, \dot{U}_1 = \dot{U}_0 = 0$. При этом значения коэффициентов удовлетворяют соотношениям: $\kappa_3 = 1, \kappa_4 = a, \kappa_3 + \kappa_4 = -a^2$.

Матрица преобразований $\|C\|$ (преобразование а-в-с \rightarrow 1-2-0), удовлетворяющая первому и второму допущению имеет вид:

$$\|C\| = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{Bmatrix} \quad (67)$$

Пусть трехфазный несимметричный потребитель с сопротивлениями \dot{z}_a, \dot{z}_b и \dot{z}_c питается от источника электрической энергии (э.д.с. \dot{E}_A, \dot{E}_B и \dot{E}_C) по схеме четырехпроводного соединения «звезда» через линию передачи (рис. 23). Провода линии передачи с сопротивлениями $\dot{z}_{ла}, \dot{z}_{лв}$ и $\dot{z}_{лс}$ соединены последовательно с соответствующими фазами приемника. Наличие нейтрального провода обозначено введением в расчетную схему (рис. 23) соответствующего комплексного сопротивления $\dot{z}_{нн}$.

Пусть \dot{Z}_A, \dot{Z}_B и \dot{Z}_C – комплексные сопротивления соответствующих фаз источника; $\dot{Z}_{AB}, \dot{Z}_{BC}, \dot{Z}_{CA}, \dot{Z}_{BA}, \dot{Z}_{CB}$ и \dot{Z}_{AC} – комплексы сопротивлений взаимноиндуктивности фаз источника, соответствующих индексам.

С учетом введенных обозначений уравнения электрического равновесия по второму закону Кирхгофа для независимых контуров включающих соответствующие фазы приемника (рис. 23) запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A \cdot (\dot{Z}_{лА} + \dot{Z}_a) + \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} + \dot{U}_{NA} &= 0 \\ \dot{I}_B \cdot (\dot{Z}_{лB} + \dot{Z}_b) + \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} + \dot{U}_{NB} &= 0 \\ \dot{I}_C \cdot (\dot{Z}_{лC} + \dot{Z}_c) + \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} + \dot{U}_{NC} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= \dot{I}_A \cdot \dot{Z}_A + \dot{I}_B \cdot \dot{Z}_{AB} + \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_{AC} + \dot{U}_{AN} \\ \dot{E}_B &= \dot{I}_B \cdot \dot{Z}_B + \dot{I}_A \cdot \dot{Z}_{BA} + \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_{BC} + \dot{U}_{BN} \\ \dot{E}_C &= \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_A \cdot \dot{Z}_{CA} + \dot{I}_B \cdot \dot{Z}_{CB} + \dot{U}_{CN} \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

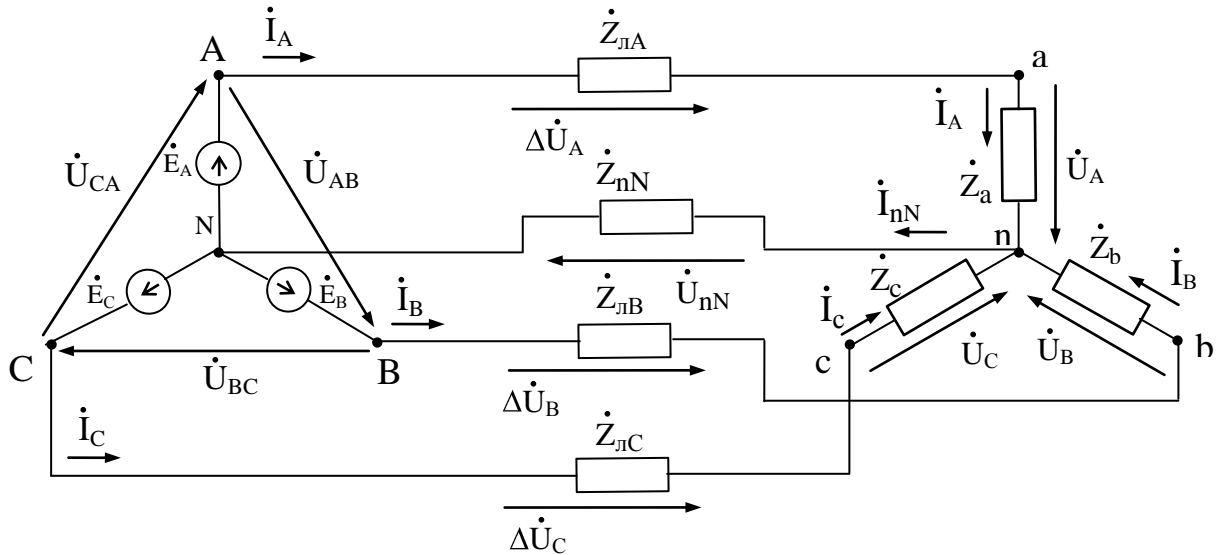


Рис. 23

Введем следующие допущения и соответствующие им обозначения

$$\begin{aligned} \dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = \dot{Z}; \quad \dot{Z}_{лА} = \dot{Z}_{лB} = \dot{Z}_{лC} = 0; \quad \dot{I}_A \cdot \dot{Z}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{I}_B \cdot \dot{Z}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{I}_C \cdot \dot{Z}_c = \dot{U}_C; \\ \dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_{CA} = \dot{Z}'; \quad \dot{Z}_{BA} = \dot{Z}_{CB} = \dot{Z}_{AC} = \dot{Z}'' \end{aligned}$$

С учетом введенных обозначений для системы уравнений (68) и (69) имеем

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{I}_A \cdot \dot{Z} - \dot{I}_B \cdot \dot{Z}' - \dot{I}_C \cdot \dot{Z}'' - \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} \quad (70)$$

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{I}_B \cdot \dot{Z} - \dot{I}_C \cdot \dot{Z}' - \dot{I}_A \cdot \dot{Z}'' - \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} \quad (71)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{I}_C \cdot \dot{Z} - \dot{I}_A \cdot \dot{Z}' - \dot{I}_B \cdot \dot{Z}'' - \dot{I}_{нN} \cdot \dot{Z}_{нN} \quad (72)$$

Для узла n на основании первого закона Кирхгофа имеем

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{nN} = 3\dot{I}_0 \quad (73)$$

Учитывая, что $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0$, а $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ найдем сумму уравнений (70) ÷ (72), получим

$$\dot{U}_0 + \dot{I}_0 \cdot (\dot{z} + \dot{z}' + \dot{z}'' + 3 \cdot \dot{z}_{nN}) = 0$$

или

$$\dot{U}_0 + \dot{I}_0 \cdot \dot{z}_0 = 0, \quad (74)$$

где

$$\dot{z}_0 = \dot{z} + \dot{z}' + \dot{z}'' + 3 \cdot \dot{z}_{nN} \quad (75)$$

\dot{z}_0 – сопротивление нулевой последовательности.

При выполнении последующих преобразований, с учетом формулы Эйлера для единичного вектора оператора a , воспользуемся соотношениями:

$$\dot{U}_A + a \cdot \dot{U}_B + a^2 \cdot \dot{U}_C = 3 \cdot \dot{U}_{A1} \quad (76)$$

$$\dot{E}_A + a \cdot \dot{E}_B + a^2 \cdot \dot{E}_C = \dot{E}_A + \dot{E}_A + \dot{E}_A = 3 \cdot \dot{E}_A \quad (77)$$

$$\dot{I}_A + a \cdot \dot{I}_B + a^2 \cdot \dot{I}_C = 3 \cdot \dot{I}_{A1} \quad (78)$$

$$\dot{I}_B + a \cdot \dot{I}_C + a^2 \cdot \dot{I}_A = a^2 \cdot (\dot{I}_A + a \cdot \dot{I}_B + a^2 \cdot \dot{I}_C) = 3 \cdot \dot{I}_{A1} \cdot a^2 \quad (79)$$

$$\dot{I}_C + a \cdot \dot{I}_A + a^2 \cdot \dot{I}_B = a \cdot (\dot{I}_A + a \cdot \dot{I}_B + a^2 \cdot \dot{I}_C) = 3 \cdot \dot{I}_{A1} \cdot a \quad (80)$$

$$\dot{z}_{nN} \cdot (1 + a + a^2) = 0 \quad (81)$$

$$\dot{U}_A + a^2 \cdot \dot{U}_B + a \cdot \dot{U}_C = 3 \cdot \dot{U}_{A2} \quad (82)$$

$$\dot{E}_A + a^2 \cdot \dot{E}_B + a \cdot \dot{E}_C = \dot{E}_A + \dot{E}_C + \dot{E}_B = 0 \quad (83)$$

$$\dot{I}_A + a^2 \cdot \dot{I}_B + a \cdot \dot{I}_C = 3 \cdot \dot{I}_{A2} \quad (84)$$

$$\dot{I}_B + a^2 \cdot \dot{I}_C + a \cdot \dot{I}_A = a \cdot (\dot{I}_A + a^2 \cdot \dot{I}_B + a \cdot \dot{I}_C) = 3 \cdot \dot{I}_{A2} \cdot a \quad (85)$$

$$\dot{I}_C + a^2 \cdot \dot{I}_A + a \cdot \dot{I}_B = a^2 \cdot (\dot{I}_A + a^2 \cdot \dot{I}_B + a \cdot \dot{I}_C) = 3 \cdot \dot{I}_{A2} \cdot a^2 \quad (86)$$

Умножим уравнение (71) на оператор a , а уравнение (72) на оператор a^2 и сложим с уравнение (70). После упрощений полученного тождества с учетом выражений (76) ÷ (81), окончательно имеем

$$\dot{U}_{A1} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A1} \cdot (\dot{z} + a^2 \cdot \dot{z}' + a \cdot \dot{z}'')$$

или

$$\dot{E}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{I}_{A1} \cdot \dot{z}_1 \quad (87)$$

где

$$\dot{z}_1 = \dot{z} + a^2 \cdot \dot{z}' + a \cdot \dot{z}'' \quad (88)$$

\dot{z}_1 – сопротивление прямой последовательности.

Умножим уравнение (71) на оператор a^2 , а уравнение (72) на оператор a и сложим с уравнение (70). После упрощений полученного тождества с учетом выражений (76) ÷ (86), окончательно имеем

$$\dot{U}_{A2} = -\dot{I}_{A2} \cdot (\dot{z} + a \cdot \dot{z}' + a^2 \cdot \dot{z}'')$$

или

$$\dot{U}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \dot{z}_2 = 0 \quad (89)$$

где

$$\dot{z}_2 = \dot{z} + a \cdot \dot{z}' + a^2 \cdot \dot{z}'' \quad (90)$$

\dot{z}_2 – сопротивление прямой последовательности.

Воспользуемся уравнениями (75), (88) и (90) и установим соответствие между коэффициентами линейных преобразований $\dot{z}, \dot{z}', \dot{z}''$ и $\dot{z}_0, \dot{z}_1, \dot{z}_2$.

Найдем сумму уравнений (75), (88) и (90)

$$\dot{z}_0 + \dot{z}_1 + \dot{z}_2 = 3 \cdot \dot{z} + \dot{z}' \cdot (1 + a^2 + a) + \dot{z}'' \cdot (1 + a + a^2) + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}$$

или

$$\dot{z} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{z}_0 + \dot{z}_1 + \dot{z}_2 - 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}) \quad (91)$$

Умножим уравнение (88) на оператор a , а уравнение (90) на оператор a^2 и сложим с уравнение (75)

$$\dot{z}_0 + a \cdot \dot{z}_1 + a^2 \cdot \dot{z}_2 = \dot{z} \cdot (1 + a^2 + a) + \dot{z}' \cdot (1 + a^3 + a^3) + \dot{z}'' \cdot (1 + a^2 + a^4) + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}$$

или

$$\dot{z}' = \frac{1}{3} \cdot (\dot{z}_0 + a \cdot \dot{z}_1 + a^2 \cdot \dot{z}_2 - 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}) \quad (92)$$

Умножим уравнение (88) на оператор a^2 , а уравнение (90) на оператор a и сложим с уравнение (75)

$$\dot{z}_0 + a \cdot \dot{z}_1 + a^2 \cdot \dot{z}_2 = \dot{z} \cdot (1 + a^2 + a) + \dot{z}' \cdot (1 + a^4 + a^2) + \dot{z}'' \cdot (1 + a^3 + a^3) + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}$$

или

$$\dot{z}'' = \frac{1}{3} \cdot (\dot{z}_0 + a^2 \cdot \dot{z}_1 + a \cdot \dot{z}_2 - 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}) \quad (93)$$

Уравнения (74), (75) и (87) ÷ (90) устанавливают однозначную связь между электрическими величинами и электрическими параметрами при переходе от фазных координат к симметричным составляющим – прямой, обратной и нулевой последовательностям (система координат 1–2–0).

Следует отметить, что три уравнения (74), (87) и (89) содержат шесть неизвестных величин: три составляющих напряжения ($\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$) и три составляющих тока ($\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$). Недостающие уравнения для определения

неизвестных величин получают из граничных условий, которыми характеризуется тот или иной вид несимметрии.

Если в качестве источника электрической энергии (рис. 23) используется трансформатор ($\dot{z}' = \dot{z}'' = \dot{z}_\mu$), то уравнения (75), (88) и (90) примут вид

$$\begin{aligned}\dot{z}_0 &= \dot{z} + \dot{z}' + \dot{z}'' + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}} = \dot{z} + 2 \cdot \dot{z}_\mu + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}} \\ \dot{z}_1 &= \dot{z} + a^2 \cdot \dot{z}' + a \cdot \dot{z}'' = \dot{z} + \dot{z}_\mu \cdot (a^2 + a) = \dot{z} - \dot{z}_\mu \\ \dot{z}_2 &= \dot{z} + a \cdot \dot{z}' + a^2 \cdot \dot{z}'' = \dot{z} + \dot{z}_\mu \cdot (a + a^2) = \dot{z} - \dot{z}_\mu \\ \dot{z}' &= \dot{z}'' = \dot{z}_\mu\end{aligned}$$

откуда следует, что

$$\begin{aligned}\dot{z}_\mu &= \frac{1}{3} \cdot (\dot{z}_0 - \dot{z}_1 - 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}}) \\ \dot{z} &= \frac{1}{3} \cdot (\dot{z}_0 + 2 \cdot \dot{z}_1 - 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}})\end{aligned}$$

Для частного случая, когда между элементами трёхфазной цепи нет индуктивной связи, имеем

$$\begin{aligned}\dot{z}_0 &= \dot{z} + \dot{z}' + \dot{z}'' + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}} = \dot{z} + 2 \cdot \dot{z}_\mu + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}} = \dot{z} + 3 \cdot \dot{z}_{\text{нн}} \\ \dot{z}_1 &= \dot{z} + a^2 \cdot \dot{z}' + a \cdot \dot{z}'' = \dot{z} + \dot{z}_\mu \cdot (a^2 + a) = \dot{z} - \dot{z}_\mu = \dot{z} \\ \dot{z}_2 &= \dot{z} + a \cdot \dot{z}' + a^2 \cdot \dot{z}'' = \dot{z} + \dot{z}_\mu \cdot (a + a^2) = \dot{z} - \dot{z}_\mu = \dot{z} \\ \dot{z}' &= \dot{z}'' = \dot{z}_\mu = 0\end{aligned}$$

При симметричном потребителе, например, асинхронном двигателе обмотки которого соединены звездой с заземленной нейтралью, для принятых на рис. 23 обозначений, уравнения электрического равновесия по второму закону Кирхгофа для независимых контуров включающих соответствующие фазы двигателя определяются выражениями

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A \cdot \dot{z}_d + \dot{I}_B \cdot \dot{z}'_d + \dot{I}_C \cdot \dot{z}''_d + \dot{I}_{\text{нн}} \cdot \dot{z}_{\text{нн}} \quad (94)$$

$$\dot{U}_B = \dot{I}_B \cdot \dot{z}_d + \dot{I}_C \cdot \dot{z}'_d + \dot{I}_A \cdot \dot{z}''_d + \dot{I}_{\text{нн}} \cdot \dot{z}_{\text{нн}} \quad (95)$$

$$\dot{U}_C = \dot{I}_C \cdot \dot{z}_d + \dot{I}_A \cdot \dot{z}'_d + \dot{I}_B \cdot \dot{z}''_d + \dot{I}_{\text{нн}} \cdot \dot{z}_{\text{нн}} \quad (96)$$

где, $\dot{z}_a = \dot{z}_b = \dot{z}_c = \dot{z}_d$; $\dot{z}_{ab} = \dot{z}_{bc} = \dot{z}_{ca} = \dot{z}'_d$; $\dot{z}_{ba} = \dot{z}_{cb} = \dot{z}_{ac} = \dot{z}''_d$.

Можно показать, что после преобразований уравнений (94) ÷ (96), аналогичных преобразованиям, проведенным для уравнений (70) ÷ (72), связь между симметричными составляющими в системе координат 1–2–0 имеет вид:

$$\dot{U}_{0d} + \dot{I}_{0d} \cdot \dot{z}_{0d} = 0; \quad \dot{U}_{A1d} + \dot{I}_{A1d} \cdot \dot{z}_{1d} = 0; \quad \dot{U}_{A2d} + \dot{I}_{A2d} \cdot \dot{z}_{2d} = 0.$$

6.1.1 РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ С ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ

Рассмотрим трехфазный потребитель состоящий из симметричной и несимметричной нагрузок (рис. 24). В качестве симметричной нагрузки возьмем асинхронный двигатель. Несимметричную нагрузку представим в виде трех неодинаковых сопротивлений \dot{Z}_a , \dot{Z}_b и \dot{Z}_c присоединенных к соответствующим фазам, как это показано на рис. 24. Положим, что симметричный источник электрической энергии (э.д.с. \dot{E}_A , \dot{E}_B и \dot{E}_C) относится к той ступени напряжения, где может возникнуть короткое замыкание, поэтому нейтраль источника предварительно заземлим (рис. 24).

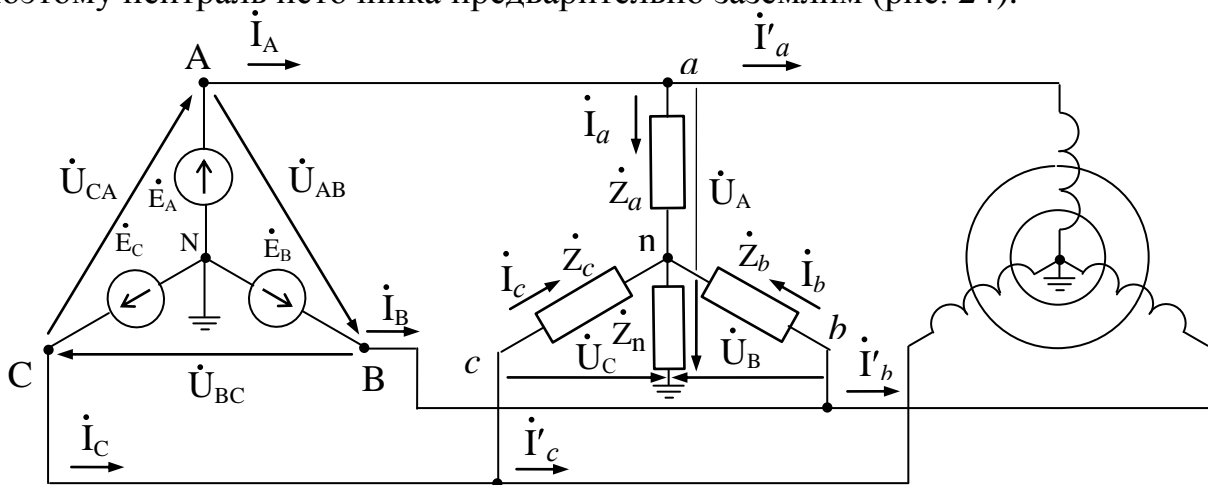


Рис. 24

Составим систему уравнений электрического равновесия по второму закону Кирхгофа для фаз несимметричной нагрузки:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_a \cdot \dot{Z}_a + (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \dot{Z}_n = \dot{I}_a \cdot \dot{Z}_a + \dot{I}_{a0} \cdot 3 \cdot \dot{Z}_n \quad (97)$$

$$\dot{U}_B = \dot{I}_b \cdot \dot{Z}_b + (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \dot{Z}_n = \dot{I}_b \cdot \dot{Z}_b + \dot{I}_{a0} \cdot 3 \cdot \dot{Z}_n \quad (98)$$

$$\dot{U}_C = \dot{I}_c \cdot \dot{Z}_c + (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \dot{Z}_n = \dot{I}_c \cdot \dot{Z}_c + \dot{I}_{a0} \cdot 3 \cdot \dot{Z}_n \quad (99)$$

Выразим напряжения \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C и токи \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c в выражениях (97) ÷ (98) через соответствующие фазам "А" и "а" симметричные составляющие. К полученные уравнения (99) ÷ (101) добавим уравнения симметричных составляющих связывающие напряжения источника (102) ÷ (104) и асинхронного двигателя (105) ÷ (107), а так же уравнения симметричных составляющих связывающие токи в узле "а", имеем:

$$\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = (\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}) \cdot \dot{Z}_a + 3 \cdot \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_{a0} \quad (99)$$

$$a^2 \cdot \dot{U}_{A1} + a \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = (a^2 \cdot \dot{I}_{a1} + a \cdot \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}) \cdot \dot{Z}_b + 3 \cdot \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_{a0} \quad (100)$$

$$\mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{U}}_{A1} + \mathbf{a}^2 \cdot \dot{\mathbf{U}}_{A2} + \dot{\mathbf{U}}_{A0} = (\mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{a1} + \mathbf{a}^2 \cdot \dot{\mathbf{i}}_{a2} + \dot{\mathbf{i}}_{a0}) \cdot \dot{\mathbf{z}}_c + 3 \cdot \dot{\mathbf{z}}_n \cdot \dot{\mathbf{i}}_{a0} \quad (101)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{A1} = \dot{\mathbf{E}}_A - \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{1И} \quad (102)$$

$$0 = \dot{\mathbf{U}}_{A2} + \dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{2И} \quad (103)$$

$$0 = \dot{\mathbf{U}}_{A0} + \dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{0И} \quad (104)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{A1} = \dot{\mathbf{i}}'_{a1} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{1Д} \quad (105)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{A2} = \dot{\mathbf{i}}'_{a2} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{2Д} \quad (106)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{A0} = \dot{\mathbf{i}}'_{a0} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{0Д} \quad (107)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{A1} = \dot{\mathbf{i}}_{a1} + \dot{\mathbf{i}}'_{a1} \quad (108)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{A2} = \dot{\mathbf{i}}_{a2} + \dot{\mathbf{i}}'_{a2} \quad (109)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{A0} = \dot{\mathbf{i}}_{a0} + \dot{\mathbf{i}}'_{a0} \quad (110)$$

Определим токи $\dot{\mathbf{i}}_{A1}$, $\dot{\mathbf{i}}_{A2}$ и $\dot{\mathbf{i}}_{A0}$ используя уравнения (99) ÷ (110).

Выразим токи $\dot{\mathbf{i}}_{a1}$, $\dot{\mathbf{i}}_{a2}$ и $\dot{\mathbf{i}}_{a0}$ из уравнений (108) ÷ (110) используя уравнения (102) ÷ (107), получим

$$\dot{\mathbf{i}}_{a1} = \dot{\mathbf{i}}_{A1} - \dot{\mathbf{i}}'_{a1} = \dot{\mathbf{i}}_{A1} - \frac{\dot{\mathbf{U}}_{A1}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A1} - \frac{\dot{\mathbf{E}}_A - \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{1И}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{1И}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}}\right) - \frac{\dot{\mathbf{E}}_A}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} \quad (111)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{a2} = \dot{\mathbf{i}}_{A2} - \dot{\mathbf{i}}'_{a2} = \dot{\mathbf{i}}_{A2} - \frac{\dot{\mathbf{U}}_{A2}}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A2} - \frac{(-\dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{2И})}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{2И}}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}}\right) \quad (112)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{a0} = \dot{\mathbf{i}}_{A0} - \dot{\mathbf{i}}'_{a0} = \dot{\mathbf{i}}_{A0} - \frac{\dot{\mathbf{U}}_{A0}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A0} - \frac{(-\dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{0И})}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}} = \dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right) \quad (113)$$

Подставим уравнения (6.37) ÷ (6.39) в левую часть выражений (99) ÷ (101), а уравнения (111) ÷ (113) в правую часть выражений (99) ÷ (101), после преобразований имеем

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_A \cdot \frac{\dot{\mathbf{z}}_a + \dot{\mathbf{z}}_{1Д}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} &= \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{1И} + \dot{\mathbf{z}}_a \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{1И}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}}\right)] + \dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{2И} + \dot{\mathbf{z}}_a \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{2И}}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}}\right)] + \\ &+ \dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{0И} + \dot{\mathbf{z}}_a \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right)] + 3 \cdot \dot{\mathbf{z}}_n \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right) \end{aligned} \quad (114)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^2 \cdot \dot{\mathbf{E}}_A \cdot \frac{\dot{\mathbf{z}}_b + \dot{\mathbf{z}}_{1Д}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} &= \mathbf{a}^2 \cdot \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{1И} + \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{1И}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}}\right)] + \mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{2И} + \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{2И}}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}}\right)] + \\ &+ \dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{0И} + \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right)] + 3 \cdot \dot{\mathbf{z}}_n \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right) \end{aligned} \quad (115)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{E}}_A \cdot \frac{\dot{\mathbf{z}}_c + \dot{\mathbf{z}}_{1Д}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}} &= \mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{i}}_{A1} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{1И} + \dot{\mathbf{z}}_c \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{1И}}{\dot{\mathbf{z}}_{1Д}}\right)] + \mathbf{a}^2 \cdot \dot{\mathbf{i}}_{A2} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{2И} + \dot{\mathbf{z}}_c \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{2И}}{\dot{\mathbf{z}}_{2Д}}\right)] + \\ &+ \dot{\mathbf{i}}_{A0} \cdot [\dot{\mathbf{z}}_{0И} + \dot{\mathbf{z}}_c \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right)] + 3 \cdot \dot{\mathbf{z}}_n \cdot \left(1 + \frac{\dot{\mathbf{z}}_{0И}}{\dot{\mathbf{z}}_{0Д}}\right) \end{aligned} \quad (116)$$

Уравнения (114) ÷ (116) позволяют определить токи $\dot{\mathbf{i}}_{A1}$, $\dot{\mathbf{i}}_{A2}$ и $\dot{\mathbf{i}}_{A0}$, а

далее фазные напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и токи $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ несимметричной нагрузки.

Рассмотрим простейший случай, когда несимметрия обусловлена прикосновением к одной из фаз, например фаза "с", человека с сопротивлением \dot{z}_h . Начальные условия соответствующие такого рода несимметрии, применительно к условным обозначениям принятым на рис. 24, запишутся в виде:

$$\dot{z}_a = \dot{z}_b = \infty, \dot{z}_c = \dot{z}_h, \dot{z}_{1д} = \dot{z}_{2д} = \dot{z}_{0д} = \dot{z}_n = \infty \quad (117)$$

Упростим уравнения (114) ÷ (116) с учетом выражения (117). Однако, для удобства вычислений полученные в результате упрощений уравнения (118) ÷ (120) оставим не преобразованными относительно \dot{z}_a, \dot{z}_b и $\dot{z}_c = \dot{z}_h$.

$$\dot{E}_A = \dot{I}_{A1} \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] + \dot{I}_{A2} \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] + \dot{I}_{A0} \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] \quad (118)$$

$$a^2 \cdot \dot{E}_A = a^2 \cdot \dot{I}_{A1} \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] + a \cdot \dot{I}_{A2} \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] + \dot{I}_{A0} \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] \quad (119)$$

$$a \cdot \dot{E}_A = a \cdot \dot{I}_{A1} \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] + a^2 \cdot \dot{I}_{A2} \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] + \dot{I}_{A0} \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] \quad (120)$$

Для определения токов $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}$ и \dot{I}_{A0} вычислим главный определитель Δ и алгебраические дополнения ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_0$) системы уравнений (118) ÷ (120).

$$\begin{aligned} \Delta = & [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] + a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] + \\ & + a \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - a \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] - \\ & - [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] \end{aligned} \quad (121)$$

$$\begin{aligned} \Delta_1 = & \dot{E}_A \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] + a^2 \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] + \\ & + a \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - a \cdot \dot{E}_A \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] - \\ & - a^2 \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - a^2 \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] \end{aligned} \quad (122)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & \dot{E}_A \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] + a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot a \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] + \\ & + \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot a \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - a \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot \dot{E}_A \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_a] - \\ & - a \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_b] - \dot{E}_A \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot [\dot{z}_{0и} + \dot{z}_h] \end{aligned} \quad (123)$$

$$\begin{aligned} \Delta_0 = & a \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] + \dot{E}_A \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] + \\ & + a^2 \cdot \dot{E}_A \cdot a \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] - \dot{E}_A \cdot a \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_h] \cdot a \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_b] - \\ & - a^2 \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_a] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_h] - a \cdot \dot{E}_A \cdot [\dot{z}_{1и} + \dot{z}_b] \cdot a^2 \cdot [\dot{z}_{2и} + \dot{z}_a] \end{aligned} \quad (124)$$

$$\dot{I}_{A1} = \lim_{\dot{z}_a, \dot{z}_b \rightarrow \infty} \left(\frac{\Delta}{\Delta_1} \right); \quad \dot{I}_{A2} = \lim_{\dot{z}_a, \dot{z}_b \rightarrow \infty} \left(\frac{\Delta}{\Delta_2} \right); \quad \dot{I}_{A0} = \lim_{\dot{z}_a, \dot{z}_b \rightarrow \infty} \left(\frac{\Delta}{\Delta_0} \right)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{A1} &= \frac{a \cdot \dot{E}_A - a^2 \cdot \dot{E}_A}{a \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h]} = \\
&= \frac{\dot{E}_A \cdot (a - a^2)}{(\dot{z}_{1И} + \dot{z}_{2И} + \dot{z}_{0И} + 3 \cdot \dot{z}_h) \cdot (a - a^2)} = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{I}_{A2} &= \frac{\dot{E}_A - a \cdot \dot{E}_A}{a \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h]} = \\
&= \frac{\dot{E}_A \cdot (1 - a)}{(\dot{z}_{1И} + \dot{z}_{2И} + \dot{z}_{0И} + 3 \cdot \dot{z}_h) \cdot (a - a^2)} = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) \cdot a} = \frac{\dot{E}_A \cdot a^2}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{I}_{A0} &= \frac{a^2 \cdot \dot{E}_A - \dot{E}_A}{a \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] + a \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{1И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{2И} + \dot{z}_h] - a^2 \cdot [\dot{z}_{0И} + \dot{z}_h]} = \\
&= \frac{\dot{E}_A \cdot (a^2 - 1)}{(\dot{z}_{1И} + \dot{z}_{2И} + \dot{z}_{0И} + 3 \cdot \dot{z}_h) \cdot (a - a^2)} = \frac{\dot{E}_A \cdot (a^2 - a^3)}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) \cdot (a - a^2)} = \frac{\dot{E}_A \cdot a \cdot (a - a^2)}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) \cdot (a - a^2)} = \frac{\dot{E}_A \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{I}_{A1} &= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \quad (125), \quad \dot{I}_{A2} = \frac{\dot{E}_A \cdot a^2}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \quad (126), \quad \dot{I}_{A0} = \frac{\dot{E}_A \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \quad (127)
\end{aligned}$$

Используя выражения (102) ÷ (104) и (125) ÷ (127) определим фазные напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и токи $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ при прикосновении человека с сопротивлением \dot{z}_h к фазе "с".

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{A1} &= \dot{E}_A - \dot{I}_{A1} \cdot \dot{z}_{1И} = \dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_{1И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{U}_{A2} &= -\dot{I}_{A2} \cdot \dot{z}_{2И} = -\frac{\dot{E}_A \cdot a^2 \cdot \dot{z}_{2И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{U}_{A0} &= -\dot{I}_{A0} \cdot \dot{z}_{0И} = -\frac{\dot{E}_A \cdot a \cdot \dot{z}_{0И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \\
\dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_{1И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} - \frac{\dot{E}_A \cdot a^2 \cdot \dot{z}_{2И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} - \frac{\dot{E}_A \cdot a \cdot \dot{z}_{0И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) - \dot{z}_{1И} - a^2 \cdot \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h + \dot{z}_{1И} + \dot{z}_{2И} + \dot{z}_{0И} - \dot{z}_{1И} - a^2 \cdot \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h + \dot{z}_{0И} \cdot (1 - a) + \dot{z}_{2И} \cdot (1 - a^2)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_B &= a^2 \cdot \dot{U}_{A1} + a \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = a^2 \cdot \left(\dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_{1И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \right) - a \cdot \frac{\dot{E}_A \cdot a^2 \cdot \dot{z}_{2И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} - \frac{\dot{E}_A \cdot a \cdot \dot{z}_{0И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [a^2 \cdot 3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) - a^2 \cdot \dot{z}_{1И} - a^3 \cdot \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h \cdot a^2 + a^2 \cdot \dot{z}_{1И} + a^2 \cdot \dot{z}_{2И} + a^2 \cdot \dot{z}_{0И} - a^2 \cdot \dot{z}_{1И} - \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h \cdot a^2 + \dot{z}_{0И} \cdot (a^2 - a) + \dot{z}_{2И} \cdot (a^2 - 1)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_C &= a \cdot \dot{U}_{A1} + a^2 \cdot \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = a \cdot \left(\dot{E}_A - \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_{1И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \right) - a^2 \cdot \frac{\dot{E}_A \cdot a^2 \cdot \dot{z}_{2И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} - \frac{\dot{E}_A \cdot a \cdot \dot{z}_{0И}}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [a \cdot 3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h) - a \cdot \dot{z}_{1И} - a^4 \cdot \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h \cdot a + a \cdot \dot{z}_{1И} + a \cdot \dot{z}_{2И} + a \cdot \dot{z}_{0И} - a \cdot \dot{z}_{1И} - a \cdot \dot{z}_{2И} - a \cdot \dot{z}_{0И}] = \\
&= \frac{\dot{E}_A \cdot 3 \cdot \dot{z}_h \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_h \cdot a}{(\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)}
\end{aligned}$$

$$\dot{U}_A = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h + \dot{z}_{0И} \cdot (1 - a) + \dot{z}_{2И} \cdot (1 - a^2)] \quad (128)$$

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot [3 \cdot \dot{z}_h \cdot a^2 + \dot{z}_{0И} \cdot (a^2 - a) + \dot{z}_{2И} \cdot (a^2 - 1)] \quad (129)$$

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{z}_h \cdot a}{(\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \quad (130)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + \frac{\dot{E}_A \cdot a^2}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + \frac{\dot{E}_A \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot (1 + a^2 + a) = 0
\end{aligned} \quad (131)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_B &= a^2 \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = a^2 \cdot \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + a \cdot \frac{\dot{E}_A \cdot a^2}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + \frac{\dot{E}_A \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot (a^2 + a^3 + a) = \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} \cdot (a^2 + 1 + a) = 0
\end{aligned} \quad (132)$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_C &= a \cdot \dot{I}_{A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = a \cdot \frac{\dot{E}_A}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + a^2 \cdot \frac{\dot{E}_A \cdot a^2}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} + \frac{\dot{E}_A \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \\
&= \frac{\dot{E}_A \cdot 3 \cdot a}{3 \cdot (\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)} = \frac{\dot{E}_A \cdot a}{(\dot{z}_{И} + \dot{z}_h)}
\end{aligned} \quad (133)$$

Как видно из уравнений (99) ÷ (110) для расчёта установившихся режимов работы трехфазных сетей с поперечной несимметрией необходимо предварительно определить сопротивления на фазу источников и

приемников электрической энергии входящих в данную сеть для прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз.

6.1.2 СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ФАЗ

У статичных элементов (трансформаторов, воздушных и кабельных ЛЭП, реакторов, т. е. элементов без вращающихся частей) изменение прямого следования фаз на обратное не вызывает изменения их сопротивлений. Следовательно, параметры этих элементов для прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми, т. е. $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$.

У токоограничивающих реакторов, фазы которых практически не связаны между собой магнитными потоками взаимоиндукции, сопротивления всех последовательностей одинаковы: $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_0$.

При наличии у статичных элементов магнитных связей между фазами, сопротивления нулевой последовательности будут отличаться от сопротивлений прямой и обратной последовательностей.

Например, для воздушных и кабельных ЛЭП различие в значениях индуктивности на фазу для прямой и нулевой последовательностей фаз объясняется двумя причинами.

Во-первых, индуктивность на фазу линии передачи для прямой и обратной последовательностей определяется только геометрическими размерами петель, образованных линейными проводами, тогда как индуктивность на фазу линии для нулевой последовательности зависит не только от геометрических размеров петель, образованных линейными проводами, но и от геометрических размеров петель, образованных линейными проводами и нулевым проводом.

Во-вторых, э.д.с., наводимые в проводах линии для прямой и обратной последовательностей, представляют собой геометрическую сумму э.д.с., вызванных сдвинутыми по фазе на 120° токами в линейных проводах, тогда как э.д.с., наводимые в проводах линии для нулевой последовательности, созданы совпадающими по фазе токами нулевой последовательности, что приводит к взаимному намагничиванию параллельных фазных проводов. Поэтому индуктивное сопротивление нулевой последовательности

оказывается больше собственного, а значит, и сопротивлений прямой и обратной последовательностей.

Следует отметить, что в трехфазных цепях с взаимной индуктивностью ток прямой (или обратной) последовательности в какой-то одной из фаз всегда имеет противоположное направление (знак) по отношению к токам в двух других фазах. Как следствие, происходит размагничивание одной из фаз двумя другими и наоборот. В результате сопротивления прямой и обратной последовательностей оказываются меньше собственного.

Трехфазный асинхронный двигатель к входным зажимам которого одновременно подведена система напряжений прямой, нулевой и обратной последовательностей фаз, характеризуется тем, что его входное сопротивление на фазу для прямой последовательности $\dot{z}_{1д}$ не будет равно входному сопротивлению на фазу для обратной последовательности $\dot{z}_{2д}$ и оба они будут отличны от входного сопротивления для нулевой последовательности $\dot{z}_{0д}$.

Указанное отличие обусловлено следующими факторами. Магнитные потоки прямой и обратной последовательности фаз создаваемые соответствующими магнитными полями статора замыкаются через ротор. При этом магнитное поле прямой последовательности создает в роторе токи частоты $f_1 \cdot s$, что составляет примерно от $0,02 \div 0,05 f_1$. В свою очередь, магнитное поле обратной последовательности создает в роторе токи частоты $f_1 \cdot (2-s) \approx 1,95 \div 1,98 f_1$. Так как частоты токов в роторе, создаваемые прямой и обратной последовательностями, различны, то различны и входные сопротивления на фазу для прямой $\dot{z}_{1д}$ и обратной $\dot{z}_{2д}$ последовательностей. Система напряжений нулевой последовательности вращающегося магнитного поля не создаёт. Однако, токи нулевой последовательности фаз статорной обмотки наводят совпадающие по времени и одинаковые по величине, но сдвинутые в пространстве на 120 град. эл. пульсирующие магнитные потоки нулевой последовательности, которые взаимно компенсируют друг друга в зазоре и в ротор не попадают. Незначительная нескомпенсированная часть этих потоков замыкается по путям рассеяния, обуславливая $\dot{z}_{0д}$. При этом значение $\dot{z}_{0д}$ сильно зависит от типа и конструкции статорной обмотки двигателя.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от двух факторов: конструктивного исполнения и схемы соединения

обмоток. По конструктивному исполнению трехфазные трансформаторы подразделяются на трех-, четырех-, пятистержневые и группу из трех однофазных. По типу соединения обмоток различают соединение в треугольник (Δ), звезду с изолированной нейтралью (Y), звезду с заземленной нейтралью (Y_0).

Магнитные потоки нулевой последовательности в трехфазном трехстержневом трансформаторе находятся в фазе и поэтому не могут замыкаться по соседним стержням магнитной системы и замыкаются по воздуху. Если обмотки трансформатора соединены треугольником, то э.д.с. наводимые потоками нулевой последовательности в обмотках создают такую разность потенциалов в каждой из фаз, при которой разность потенциалов между фазами равна нулю. Следовательно, ток нулевой последовательности по обмоткам трансформатора, соединенным в треугольник, протекать не будет. К аналогичному выводу можно прийти, если напряжение нулевой последовательности приложено к обмоткам трансформатора, соединенным в звезду без заземленной нейтрали. Для случая заземленной нейтрали и соединения обмоток трансформатора в звезду, для протекания токов нулевой последовательности необходимо присутствие дополнительного пути (обратного провода, земли), соединяющего начало и конец схемы и обеспечивающего наличие замкнутого контура. Как правило, концом схемы принято считать место повреждения (точка К), а началом – точку, в которой объединяются ветви с нулевым потенциалом (точка Н). Кроме того, условимся первичной обмоткой называть ту, которая электрически связана с местом к.з., и для нее использовать индекс «I». Для вторичных обмоток будем применять, соответственно, индексы «II» и «III».

Таким образом, дополнительный путь для протекания токов нулевой последовательности в трансформаторе обеспечивается в случае наличия заземленной нейтрали и однофазного или двухфазного металлического замыкания на землю.

В общем случае, для появления при коротком замыкании токов нулевой последовательности необходимо выполнение двух условий: возникновения замыкания (т. е. однофазного или двухфазного на землю к.з.) и наличия хотя бы одной заземленной нейтрали на той ступени напряжения, где произошло короткое замыкание.

Как отмечалось выше, в трехфазных трехстержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности Φ_0 всех трёх фаз находятся в фазе и поэтому не могут замыкаться по соседним стержням магнитной системы и замыкаются по воздуху и кожух трансформатора. Это приводит к увеличению тока намагничивания нулевой последовательности $I_{\mu 0}$ и соответственно к снижению $x_{\mu 0}$ ($x_{\mu 0}^* = 0,3 \div 1,0$). Но учитывая, что сопротивление рассеяния обмоток значительно меньше $x_{\mu 0}$, для мощных трансформаторов с напряжением 10 кВ и выше можно считать $x_{\mu 0} = \infty$, последнее означает, что в схеме замещения ветвь намагничивания дает разрыв. Только для маломощных трансформаторов такой конструкции напряжением 6(10) / 0,4 кВ значение $x_{\mu 0}$ учитывают как конечную величину.

В группе из трех однофазных трансформаторов и трехфазных трансформаторов с магнитопроводами, имеющими четыре и пять стержней наличие свободного от обмоток стержня магнитопровода обеспечивает замкнутый путь для соответствующего результирующего потока намагничивания нулевой последовательности $\Phi_{\mu 0}$. Это обеспечивает на пути потоков незначительное магнитное сопротивление и, соответственно, значительное $x_{\mu 0}$. Поэтому для указанных конструкций можно считать [7], что ток $I_{\mu 0}$ равен току намагничивания прямой последовательности $I_{\mu 1}$ ($I_{\mu 0} = I_{\mu 1} = 0,5 \div 2\%$), т.е. ($x_{\mu 0}^* = 50 \div 200$). Учитывая, что сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток ($x_{I\sigma}^* = x_{II\sigma}^* = 0,02 \div 0,15$) меньше сопротивления ($x_{\mu 0}^* = 50 \div 200$) в 1500 \div 2500 раз можно считать $x_{\mu 0} = \infty$.

В двухобмоточном трансформаторе со схемой соединения обмоток Y_0/Δ (рис. 25, а), при возникновении несимметричного к.з. на землю со стороны первичной обмотки обеспечивается прохождение токов нулевой последовательности \dot{I}_{0I} (рис. 25, а). Токи \dot{I}_{0I} будут индуцировать э.д.с. нулевой последовательности во вторичной обмотке, собранной по схеме треугольник. Под действием э.д.с. нулевой последовательности в соответствующих фазах начнут циркулировать токи \dot{I}_{0II} , которые подобно токам третьей гармоники циркулируют только в этих обмотках, не выходя за их пределы. Завершение пути тока нулевой последовательности на ветви $x_{II\sigma}$ на схеме замещения (рис. 25, а) отражается ее закорачиванием на обратный провод (землю). Поскольку относительно большое сопротивление $x_{\mu 0}$ шунтируется малым сопротивлением $x_{II\sigma}$, то независимо от конструкции трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ сопротивление x_0

представляется в виде одного индуктивного сопротивления $X_0 = X_{I\sigma} + X_{II\sigma}$ которое равно сопротивлению прямой последовательности X_1 .

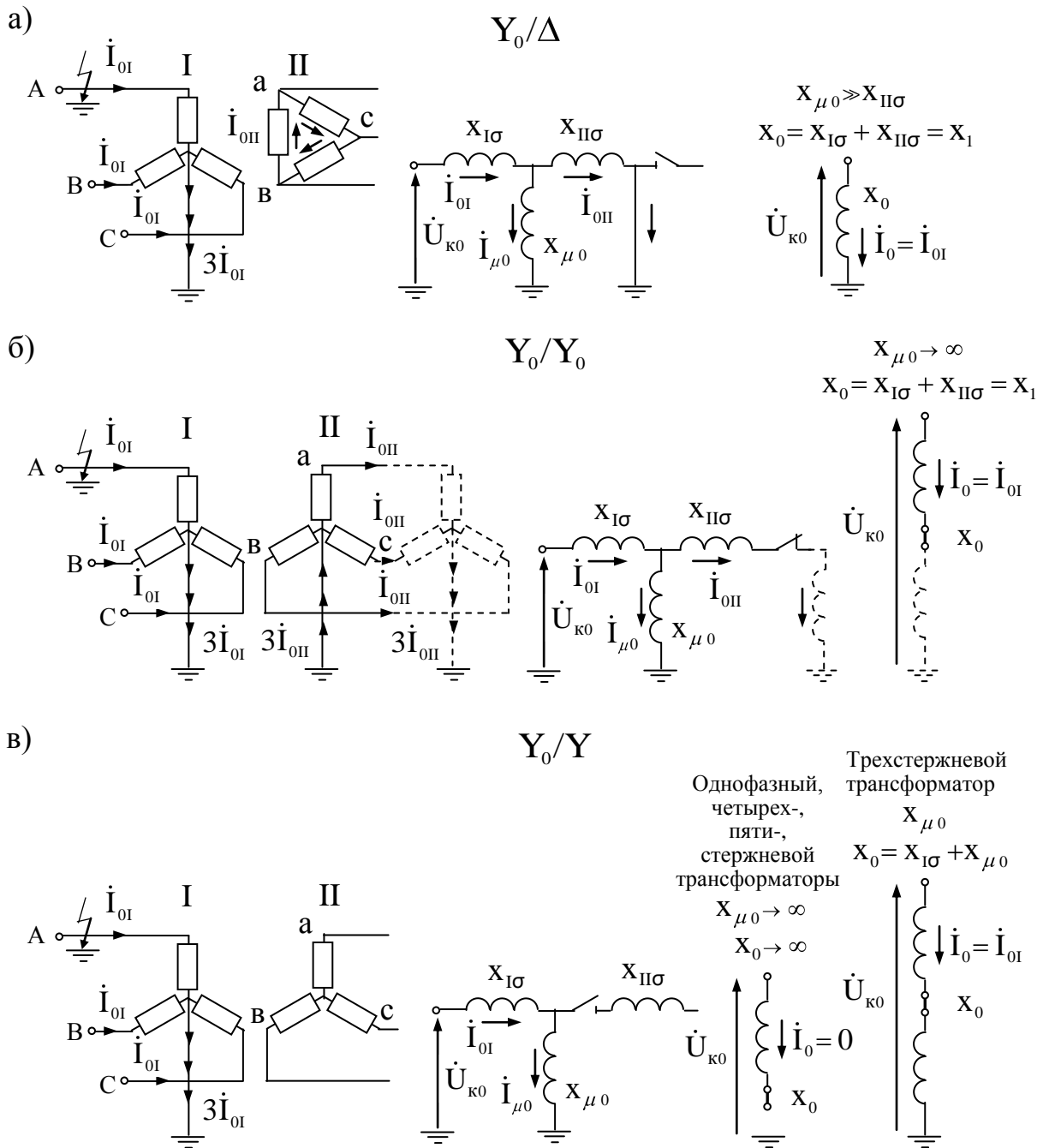


Рис. 25 Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток двухобмоточного трансформатора: а) $-Y_0/\Delta$; б) $-Y_0/Y_0$; в) $-Y_0/Y$.

Так как сопротивление x_0 (рис. 25, а) соединяется с точкой нулевого потенциала схемы замещения (с землей) с противоположной стороны от расчетной точки к.з., то если в исходной расчетной схеме за таким трансформатором имеются какие-либо элементы (трансформаторы,

генераторы, воздушные или кабельные линии и т.д.), то независимо от их вида и схемы соединения их обмоток эти элементы в схему замещения нулевой последовательности не вводятся. Это объясняется тем, что при соединении обмоток трансформатора по схеме Y_0/Δ э.д.с. нулевой последовательности, наводимая в соединенной треугольником обмотке, полностью компенсируется падением напряжения от тока нулевой последовательности в индуктивном сопротивлении рассеяния этой обмотки, вследствие чего напряжение нулевой последовательности на выводах этой обмотки равно нулю.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Y_0 , представлена на рис. 25, б. Очевидно, трансформатор необходимо вводить в исходную схему замещения нулевой последовательности только в том случае, если на стороне вторичной обмотки II имеется контур для циркуляции токов нулевой последовательности, т.е. наличием, по крайней мере, еще одной заземленной нейтрали (штриховая линия на рис. 25, б). Имеются в виду электроустановки напряжением свыше 1 кВ, когда $x_{\mu 0} \gg x_{I\sigma} + x_{II\sigma}$, тогда в схеме замещения можно не учитывать цепь намагничивания и сопротивление нулевой последовательности определится выражением $x_0 = x_{I\sigma} + x_{II\sigma} = x_1$.

В случае соединения обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y и коротком замыкании на землю со стороны обмотки I, токи нулевой последовательности могут протекать только по этой обмотке, замыкаясь через цепь намагничивания (рис. 25, в). Циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке II, соединенной в звезду, невозможна (рис. 25, в). Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ, а также трехфазных трансформаторов с четырех- и пятистержневыми магнитопроводами сопротивление $x_{\mu 0} = \infty$, тогда $x_0 = x_{I\sigma} + x_{\mu 0} = \infty$, что соответствует работе трансформатора в режиме холостого хода и, как следствие, в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят ($\dot{I}_0 = 0$, на рис. 25, в).

Противоположный результат с точки зрения учета сопротивления нулевой последовательности получается для случая, когда в схеме Y_0/Y одна из обмоток трансформатора имеет напряжение ниже 1 кВ. Например, у трансформаторов мощностью 25...1600 кВ·А обмотка высшего напряжения 35, 10 или 6 кВ, собрана по схеме Y, а обмотки низшего напряжения 0,4 кВ,

соединены по схеме Y_0 . При к.з. на землю (или на нулевой провод) в сети 0,4 кВ по фазам обмотки I с заземленной нейтралью протекают токи нулевой последовательности \dot{I}_{0I} , замыкаясь, как и в предыдущем случае, через цепь намагничивания (см. рис. 25, в). При этом потоки намагничивания, наводимые в каждом из стержней магнитопровода, имеют одинаковое направление, что приводит к их взаимному вытеснению из ярма на пути рассеяния. В результате, у трансформаторов данной конструкции $x_{\mu 0}$ оказывается относительно небольшим. Поэтому такие трансформаторы необходимо учитывать введением в схему замещения нулевой последовательности при расчете токов однофазного или двухфазного на землю к.з. в сети 0,4 кВ, сопротивления прямой последовательности $x_0 = x_{I\sigma} + x_{\mu 0}$ ($\dot{I}_0 = \dot{I}_{0I}$, на рис. 25, в). Поскольку в таких сетях существенно влияние активных сопротивлений, то трансформаторы (как и другие элементы) учитываются в схеме замещения полными сопротивлениями.

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, зависит от схемы соединения двух других обмоток. Обычно одна из них соединена треугольником, сопротивление рассеяния этой обмотки с малой реактивностью шунтирует ветвь $x_{\mu 0}$, что позволяет независимо от конструкции принимать $x_{\mu 0} = \infty$. По этой причине в схемах замещения эта ветвь не приводится. Третья обмотка может быть соединена или треугольником, или в звезду с изолированной нейтралью, или в звезду с заземленной нейтралью (рис. 26, а, б, в). В первом случае компенсация тока нулевой последовательности обмотки, обращенной к расчетной точке к.з., осуществляется токами обеих обмоток, соединенных треугольником, и схема замещения нулевой последовательности такого трансформатора имеет вид, как показано на рис. 26, а. При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора:

$$x_0 = x_{I\sigma} + \frac{x_{II\sigma} \cdot x_{III\sigma}}{x_{II\sigma} + x_{III\sigma}} \quad (134)$$

Во втором случае по обмотке III, соединенной в звезду с изолированной нейтралью, протекание тока нулевой последовательности невозможно (см. рис. 26, б), схема замещения представляется I и II обмотками, а сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора $x_0 = x_{I\sigma} + x_{II\sigma}$.

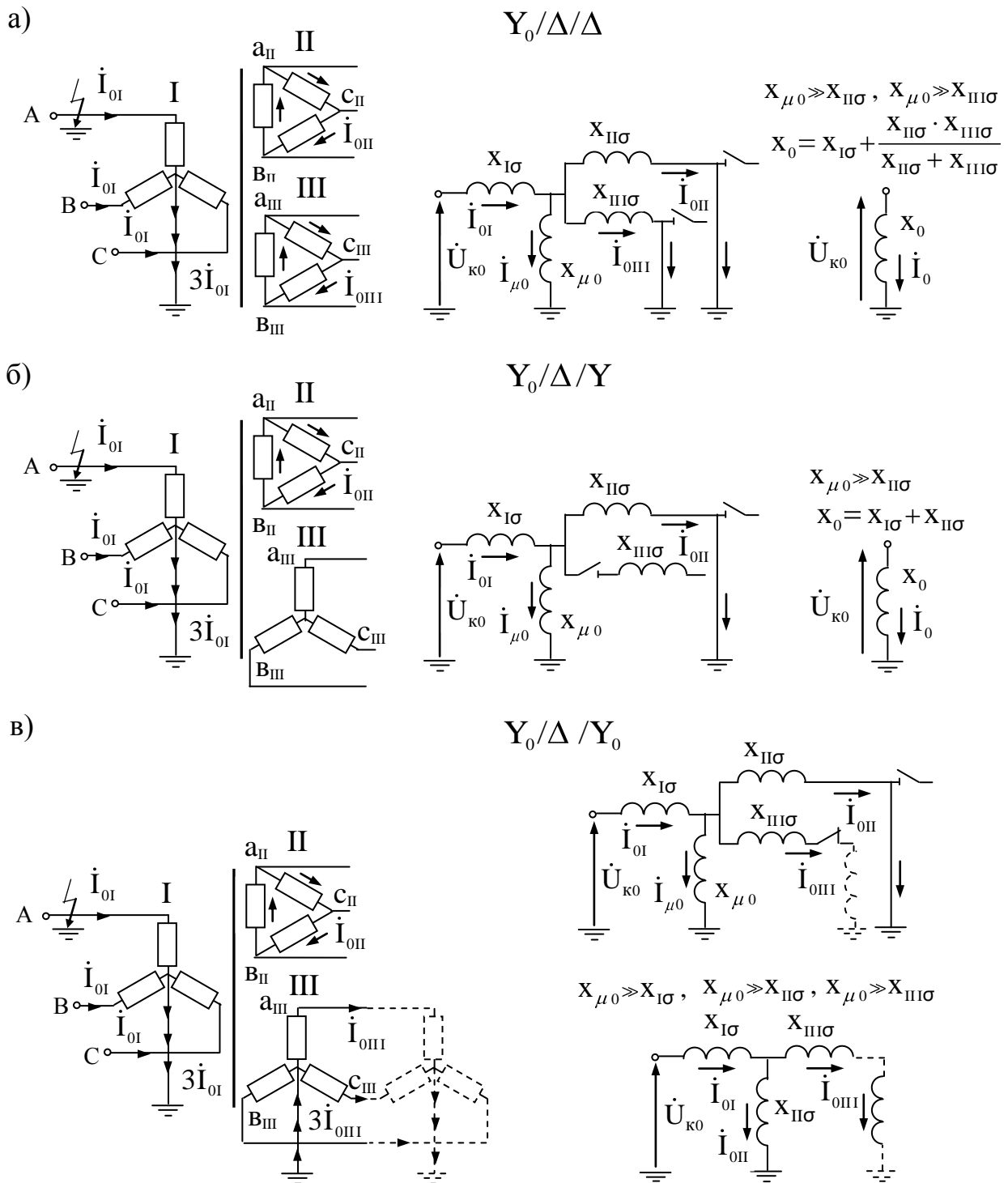


Рис. 26 Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток трехобмоточного трансформатора: а) – $Y_0/\Delta/\Delta$; б) – $Y_0/\Delta/Y$; в) – $Y_0/\Delta/Y_0$.

В третьем случае (см. рис. 26, в) на стороне обмотки II предполагается наличие еще одной заземленной нейтрали, что обеспечивает контур для токов нулевой последовательности. Как следствие, циркуляция тока нулевой последовательности возможна и в обмотке III. Таким образом, все три

обмотки обтекаются током и трансформатор представляется полной схемой замещения.

Обмотки автотрансформатора имеют между собой не только магнитную связь, но и электрическую, как следствие, здесь другие условия для протекания токов нулевой последовательности, которые должны быть отражены в схеме замещения нулевой последовательности автотрансформатора. При определенных условиях, даже при изолированной нейтрали автотрансформатора в его обмотках возможна циркуляция токов нулевой последовательности.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме соответствующего трансформатора. Так, если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во, вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой последовательности, его схема замещения (при пренебрежении намагничивающим током и активными сопротивлениями) представляется суммарной реактивностью рассеяния $x_{I\sigma-II\sigma}$ (рис. 27, а). При наличии третьей обмотки, соединенной треугольником, схема замещения имеет тот же вид, что и у трёхобмоточного трансформатора при соответственном соединении его обмоток (рис. 27, б).

Необходимо отметить, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на (рис. 27, а, б) направлениях токов искомый ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной обмоток, т. е. $I_n = 3(\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})$, причем каждый из них должен быть отнесен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

Особый случай представляет схема замещения автотрансформатора с заземленной нейтралью через реактивность x_n (рис. 27, в). Ток I_n через реактивность x_n совпадает с током через вторичную обмотку автотрансформатора и равен $I_n = 3(\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})$. Используя уравнение баланса мощностей перенесем реактивность x_n из ветви с током $(\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})$ в ветвь с током \dot{I}_{0I} , т.е. в первичную обмотку автотрансформатора, имеем:

$$\dot{I}_{0I}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})^2 \cdot (x_{II\sigma} + 3x_n) = \dot{I}_{0I}^2 \cdot (x_{I\sigma} + x) + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})^2 \cdot x_{II\sigma}, \quad (135)$$

где x – дополнительное сопротивление в ветви с током \dot{I}_{0I} .

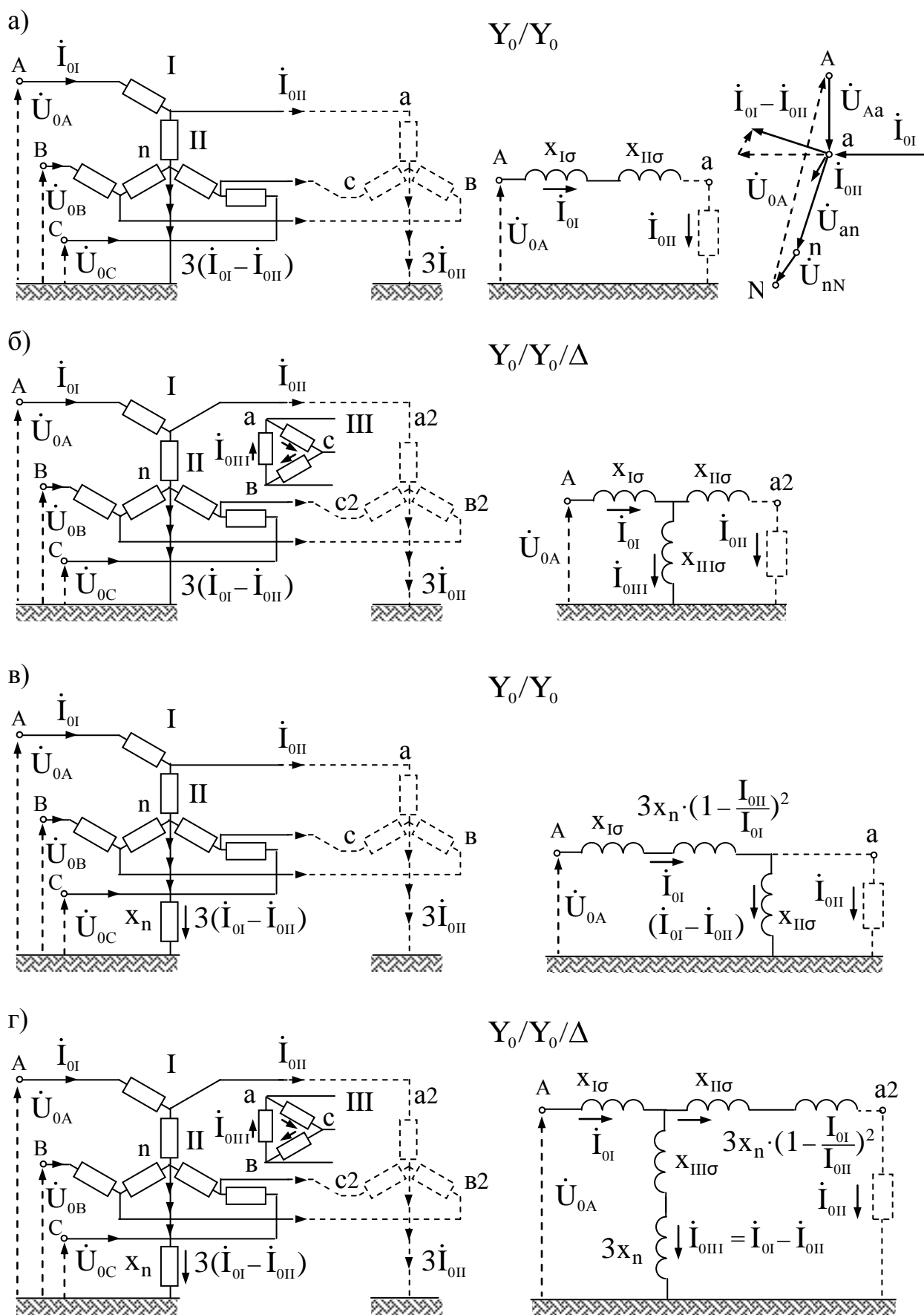


Рис. 27 Схемы соединения обмоток автотрансформатора и их схемы замещения для токов нулевой последовательности: а) и в) – Y_0/Y_0 ; б) и г) – $Y_0/Y_0/\Delta$.

После соответствующих преобразований выражения (135) получим

$$x = 3x_n \cdot \left(1 - \frac{\dot{I}_{0II}}{\dot{I}_{0I}}\right)^2 \quad (136)$$

Введение дополнительного сопротивления x в ветвь с током \dot{I}_{0I} (рис. 27, в), эквивалентно приведению реактивности x_n к базисному напряжению первичной (ступень I) обмотки автотрансформатора.

При наличии у автотрансформатора третьей обмотки (рис. 27, г) необходимо определить результирующие реактивности нулевой последовательности между выводами ступеней I – II и I – III, приведенные к ступени I. Для пары обмоток I – II дополнительное сопротивление x_{II} , которое необходимо включить в ветвь с током \dot{I}_{0II} определится из уравнения баланса мощностей вида:

$$\dot{I}_{0I}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})^2 \cdot (x_{III\sigma} + 3x_n) + \dot{I}_{0II}^2 \cdot x_{II\sigma} = \dot{I}_{0I}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0II})^2 \cdot x_{III\sigma} + \dot{I}_{0II}^2 \cdot (x_{II\sigma} + x_{II})$$

откуда

$$x_{II} = 3x_n \cdot \left(1 - \frac{\dot{I}_{0II}}{\dot{I}_{0I}}\right)^2 \quad (137)$$

Аналогичным образом, для пары обмоток I – III дополнительное сопротивление x_{III} в ветви с током \dot{I}_{0III} может быть определено из уравнения

$$\dot{I}_{0I}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0III})^2 \cdot (x_{II\sigma} + 3x_n) + \dot{I}_{0III}^2 \cdot x_{III\sigma} = \dot{I}_{0I}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{0I} - \dot{I}_{0III})^2 \cdot x_{II\sigma} + \dot{I}_{0III}^2 \cdot (x_{III\sigma} + x_{III})$$

откуда

$$x_{III} = 3x_n \quad (138)$$

Сопротивления x_{II} и x_{III} , определяемые выражениями (137) и (138) необходимо внести в соответствующие ветви на трехлучевой схеме замещения трехобмоточного автотрансформатора (рис. 27, г).

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы электрических сетей в симметричном режиме, в частности, трехфазном коротком замыкании, по существу, являются сопротивлениями прямой последовательности.

6.2 РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ В СХЕМАХ С ОДНОКРАТНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ

Различают два вида несимметрии: поперечную и продольную.

Продольная несимметрия возникает в том случае, когда в рассечку фаз линии включаются неравные сопротивления. Основными и наиболее

простыми видами продольной несимметрии являются разрывы одной или двух фаз участка сети (рис. 28, а, б).

Поперечная несимметрия возникает в тех случаях, когда между фазами и нейтралью (землей), или между отдельными фазами включаются неравные сопротивления. Поперечная несимметрия чаще всего обуславливается однофазным к.з. – $K^{(1)}$ (рис. 28, в), междуфазным к.з. – $K^{(2)}$ (рис. 28, г) либо двухфазным на землю к.з. – $K^{(1,1)}$ (рис. 28, д). Необходимо отметить, что междуфазным к.з. возникают в сетях, как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Однофазные к.з. могут происходить только в сетях с заземленной нейтралью.

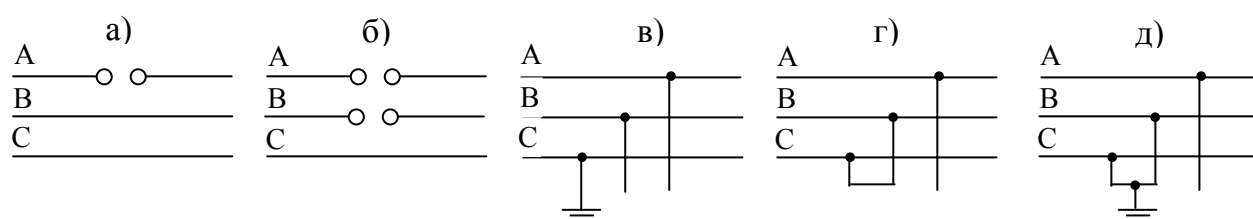


Рис. 28 Виды продольной и поперечной несимметрии

Алгоритм расчета фазных токов и фазных напряжений для рассматриваемой сети с заданным видом продольной или поперечной несимметрии при использовании метода симметричных составляющих будет включать следующие этапы:

- в расчетной точки сети в фазных координатах записываются граничные условия для соответствующей несимметрии;

- на основании выражения (67) записывается связь между симметричными составляющими токов и напряжений и их фазными значениями, в результате, с учетом граничных условий в фазных координатах получаются соотношения в координатах 1-2-0;

- поскольку граничные условия определяют взаимосвязь всех последовательностей, для расчета симметричных составляющих токов и напряжений составляется три схемы замещения;

- в соответствии с правилами топологии схемы замещения последовательностей соединяются таким образом, чтобы обеспечить выполнение всех граничных условий;

- с учетом определенных из предшествующего нормального симметричного режима значениям комплексных э.д.с. или напряжений прямой последовательности в опорных узлах, где включены генераторы и

электродвигатели, с использованием узловых и контурных уравнений электрического равновесия для соответствующих схем замещения последовательностей определяются токи $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ в месте несимметрии;

– воспользовавшись преобразованием к фазной системе [с помощью матрицы преобразований $\|C\|$ (67)] определяются значения фазных токов и напряжений.

При составлении схем замещения для соответствующих последовательностей необходимо пользоваться руководящими указаниями приведенными в РД 153-34.0-20.527-98 [8]. В соответствии с методическими указаниям приведенными в [8] необходимо учитывать следующие положения и общие правила при составлении схем замещения:

– сопротивления всех элементов схемы и э.д.с. источников энергии могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах;

– при выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в именованных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов приведенные значения э.д.с. источников энергии и сопротивления различных элементов схемы следует определять по формулам п. 3.2.3 указаний;

– при выражении параметров элементов эквивалентной схемы замещения в относительных единицах с приведением параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов необходимо пользоваться формулами п. 3.2.4;

– независимо от принятого способа составления схемы замещения прямой последовательности (в именованных или относительных единицах, с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов или при приближенном учете этих коэффициентов) в этой схеме должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы, причем источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы, а также электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от расчетной точки несимметричного режима токоограничивающим реактором или трансформатором) и обобщенные нагрузки узлов должны быть введены в схему э.д.с. и индуктивными сопротивлениями, соответствующими

рассматриваемому моменту времени. Все остальные элементы исходной расчетной схемы должны быть представлены в схеме замещения сопротивлениями прямой последовательности. Трехобмоточные трансформаторы, автотрансформаторы, трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также сдвоенные реакторы должны быть представлены своими схемами замещения ([2], табл. 4.1.);

– схема замещения обратной последовательности по конфигурации аналогична схеме замещения прямой последовательности, т.е. в ней должны быть представлены все элементы исходной расчетной схемы. При этом электрические машины с вращающимся ротором и обобщенные нагрузки узлов должны быть учтены соответствующим сопротивлением обратной последовательности, а э.д.с. приняты равными нулю;

– индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных и асинхронных электродвигателей допустимо принимать численно равным индуктивной составляющей их сопротивления короткого замыкания. Сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки какого-либо узла в относительных единицах, отнесенное к полной мощности нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени напряжения сети, где эта нагрузка присоединена, следует принимать равным: при напряжении сети 35 кВ и более $x_{2(\text{ном})}^* = 0,45$ и при напряжении сети менее 35 кВ $x_{2(\text{ном})}^* = 0,35$.

– схема замещения нулевой последовательности, как правило, существенно отличается от схем прямой и обратной последовательностей. Ее конфигурация определяется в основном положением расчетной точки несимметрии и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов исходной расчетной схемы. Чтобы составить схему замещения нулевой последовательности, следует допустить, что в точкепоперечной несимметрии все фазы соединены между собой накоротко и между этой точкой и землей приложено напряжение нулевой последовательности. Затем, идя от точки к.з. поочередно в разные стороны, необходимо на каждой ступени напряжения исходной расчетной схемы выявить возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности (циркуляция этих токов возможна только в тех ветвях, которые образуют контуры для замыкания токов через землю и параллельные ей цепи) и

соответственно определить элементы этой схемы, которые должны быть введены в схему замещения. При этом следует иметь в виду, что сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду с незаземленной нейтралью, бесконечно велико, поэтому трансформаторы с указанными схемами соединения и все находящиеся за ними элементы исходной расчетной схемы в схему замещения нулевой последовательности не входят. Циркуляция токов нулевой последовательности возможна только в том случае, если обмотка трансформатора, обращенная в сторону расчетной точки к.з., соединена в звезду с заземленной нейтралью.

6.2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от двух факторов: конструктивного исполнения и схемы соединения обмоток. По конструктивному исполнению трехфазные трансформаторы подразделяются на трех-, четырех-, пятистержневые и группу из трех однофазных. По типу соединения обмоток различают соединение в треугольник (Δ), звезду с изолированной нейтралью (Y), звезду с заземленной нейтралью (Y_0).

В трехфазных трехстержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности Φ_0 всех трёх фаз находятся в фазе и поэтому не могут замыкаться по соседним стержням магнитной системы и замыкаются по воздуху и кожух трансформатора. Это приводит к увеличению тока намагничивания нулевой последовательности $I_{\mu 0}$ и соответственно к снижению $x_{\mu 0}$ ($x_{\mu 0}^* = 0,3 \div 1,0$). Но учитывая, что сопротивление рассеяния обмоток значительно меньше $x_{\mu 0}$, для мощных трансформаторов с напряжением 10 кВ и выше можно считать $x_{\mu 0} = \infty$, и только для маломощных трансформаторов такой конструкции напряжением 6(10)/0,4 кВ значение $x_{\mu 0}$ учитывают как конечную величину.

В группе из трех однофазных трансформаторов, четырех – и пятистержневых трансформаторах наличие свободного от обмоток стержня магнитопровода обеспечивает замкнутый путь для соответствующего результирующего потока намагничивания нулевой последовательности $\Phi_{\mu 0}$.

Поэтому для указанных конструкций можно считать, что ток $I_{\mu 0}$ равен току намагничивания прямой последовательности $I_{\mu 1}$ ($I_{\mu 0}=I_{\mu 1}=0,5\div 2\%$), т.е. ($x_{\mu 0}^*=50\div 200$). Учитывая, что сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток ($x_{I\sigma}^*=x_{II\sigma}^*=0,02\div 0,15$) меньше сопротивления ($x_{\mu 0}^*=50\div 200$) в $1500\div 2500$ раз можно считать $x_{\mu 0}=\infty$.

В двухобмоточном трансформаторе со схемой обмоток Y_0/Δ (рис. 29, а) э.д.с. нулевой последовательности вторичных обмоток будут вызывать токи, которые подобно токам третьей гармоники циркулируют только в этих обмотках, не выходя за их пределы. Завершение пути тока нулевой последовательности на ветви $x_{II\sigma}$ на схеме замещения (рис. 29, а) отражается ее закорачиванием на обратный провод (землю). Поскольку относительно большое сопротивление $x_{\mu 0}$ шунтируется малым сопротивлением $x_{II\sigma}$, то независимо от конструкции трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ сопротивление x_0 представляется в виде одного индуктивного сопротивления $x_0=x_{I\sigma}+x_{II\sigma}$ которое равно сопротивлению прямой последовательности x_1 .

Так как сопротивление x_0 (рис. 29, а) соединяется с точкой нулевого потенциала схемы замещения (с землей) с противоположной стороны от расчетной точки к.з., то если в исходной расчетной схеме за таким трансформатором имеются какие-либо элементы (трансформаторы, генераторы, воздушные или кабельные линии и т.д.), то независимо от их вида и схемы соединения их обмоток эти элементы в схему замещения нулевой последовательности не вводятся. Это объясняется тем, что при соединении обмоток трансформатора по схеме Y_0/Δ э.д.с. нулевой последовательности, наводимая в соединенной треугольником обмотке, полностью компенсируется падением напряжения от тока нулевой последовательности в индуктивном сопротивлении рассеяния этой обмотки, вследствие чего напряжение нулевой последовательности на выводах этой обмотки равно нулю.

Схема замещения нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y_0/Y_0 , представлена на рис. 29, б. Очевидно, трансформатор необходимо вводить в исходную схему замещения нулевой последовательности только в том случае, если на стороне вторичной обмотки II имеется контур для циркуляции токов нулевой последовательности, т.е. наличием, по крайней мере, еще одной заземленной

нейтрали (штриховая линия на рис. 29, б). Имеются в виду электроустановки напряжением свыше 1 кВ, когда $x_{\mu 0} \gg x_{I\sigma} + x_{II\sigma}$, тогда $x_0 = x_{I\sigma} + x_{II\sigma} = x_1$.

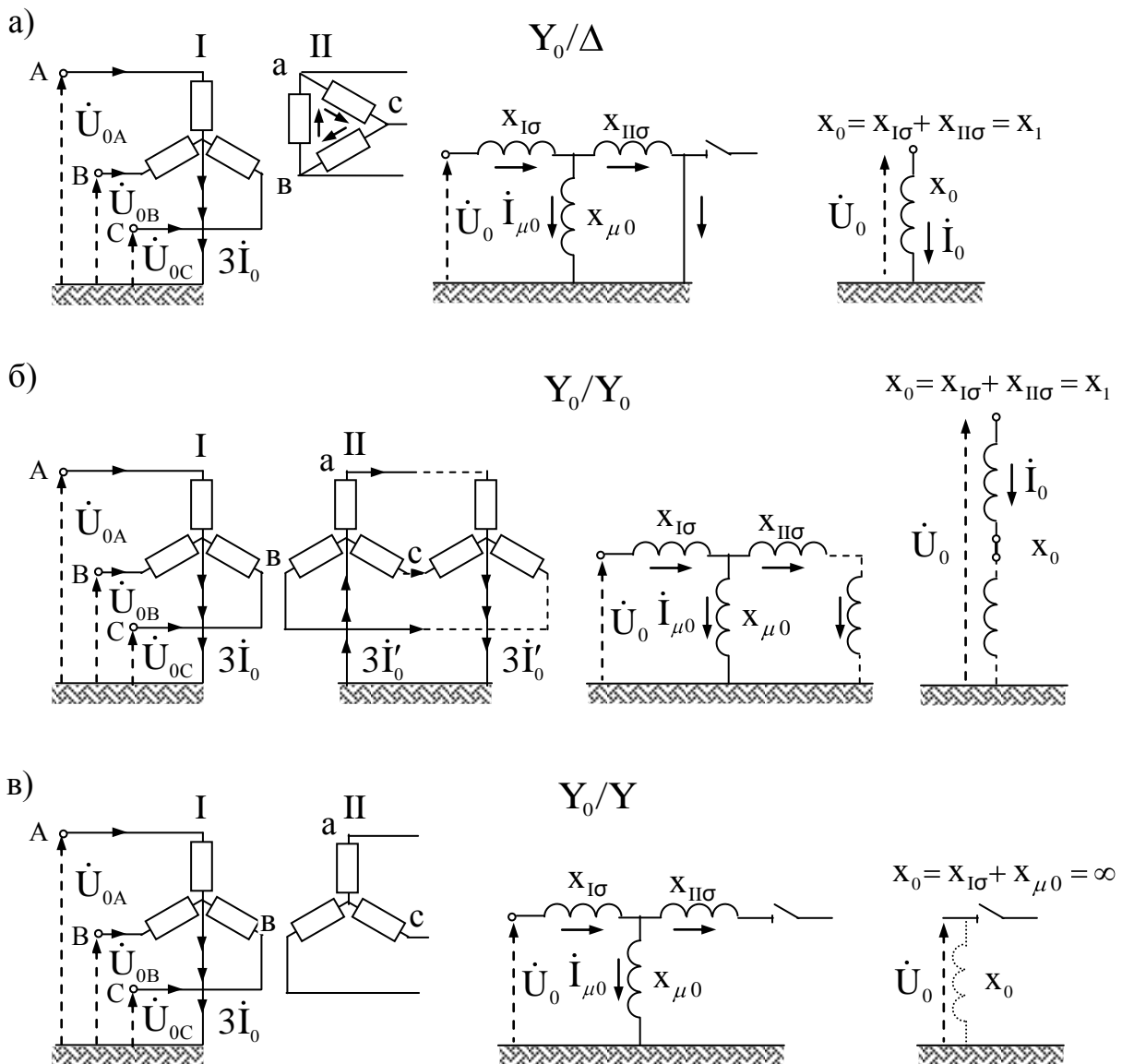


Рис. 29 Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток двухобмоточного трансформатора: а) – Y_0/Δ ; б) – Y_0/Y_0 ; в) – Y_0/Y .

В случае соединения обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке, соединенной в звезду, невозможна (рис. 29, в). Поскольку у трансформаторов с номинальным напряжением обмоток свыше 1 кВ сопротивление $x_{\mu 0} = \infty$, тогда $x_0 = x_{I\sigma} + x_{\mu 0} = \infty$, что соответствует работе трансформатора в режиме холостого хода и, как следствие, в схему замещения нулевой последовательности такие трансформаторы не вводят.

Сопротивление нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора со стороны обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, зависит от схемы соединения двух других обмоток. Обычно одна из них соединена треугольником, сопротивление рассеяния этой обмотки с малой реактивностью шунтирует ветвь $x_{\mu 0}$, что позволяет независимо от конструкции принимать $x_{\mu 0} = \infty$. По этой причине в схемах замещения эта ветвь не приводится. Третья обмотка может быть соединена или треугольником, или в звезду с изолированной нейтралью, или в звезду с заземленной нейтралью (рис. 30, а, б, в). В первом случае компенсация тока нулевой последовательности обмотки, обращенной к расчетной точке к.з., осуществляется токами обеих обмоток, соединенных треугольником, и схема замещения нулевой последовательности такого трансформатора имеет вид, как показано на рис. 30, а. При этом сопротивление нулевой последовательности трансформатора:

$$x_0 = x_{I\sigma} + \frac{x_{II\sigma} \cdot x_{III\sigma}}{x_{II\sigma} + x_{III\sigma}} \quad (139)$$

Во втором случае по обмотке III, соединенной в звезду с изолированной нейтралью, протекание тока нулевой последовательности невозможно (см. рис. 30, б), схема замещения представляется I и II обмотками, а сопротивление нулевой последовательности такого трансформатора $x_0 = x_{I\sigma} + x_{II\sigma}$.

В третьем случае (см. рис. 30, в) на стороне обмотки III предполагается наличие еще одной заземленной нейтрали, что обеспечивает контур для токов нулевой последовательности. Как следствие, циркуляция тока нулевой последовательности возможна и в обмотке II. Таким образом, все три обмотки обтекаются током и трансформатор представляется полной схемой замещения.

Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически, как следствие, здесь другие условия для протекания токов нулевой последовательности, которые должны быть отражены в схеме замещения нулевой последовательности автотрансформатора. При определенных условиях, даже при изолированной нейтрали автотрансформатора в его обмотках возможна циркуляция токов нулевой последовательности.

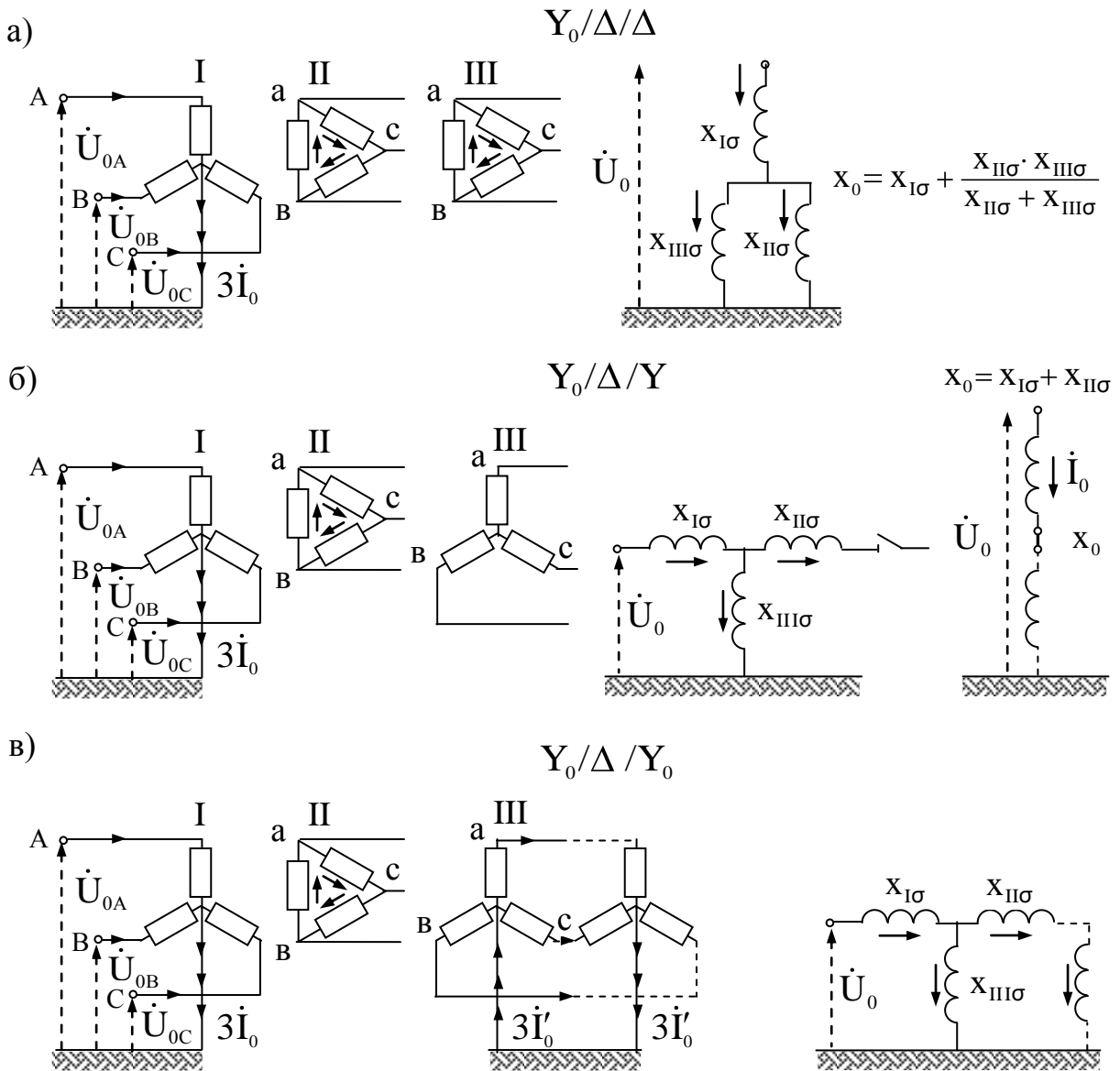


Рис. 30 Схемы замещения нулевой последовательности для различных вариантов соединения обмоток трехобмоточного трансформатора: а) $-Y_0/\Delta/\Delta$; б) $-Y_0/\Delta/Y$; в) $-Y_0/\Delta/Y_0$.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме соответствующего трансформатора. Так, если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой последовательности, его схема замещения (при пренебрежении намагничивающим током и активными сопротивлениями) представляется суммарной реактивностью рассеяния $x_{I\sigma-II\sigma}$ (рис. 31, а). При наличии третьей обмотки, соединенной треугольником, схема замещения имеет тот же вид, что и у трёхобмоточного трансформатора при соответственном соединении его обмоток (рис. 31, б).

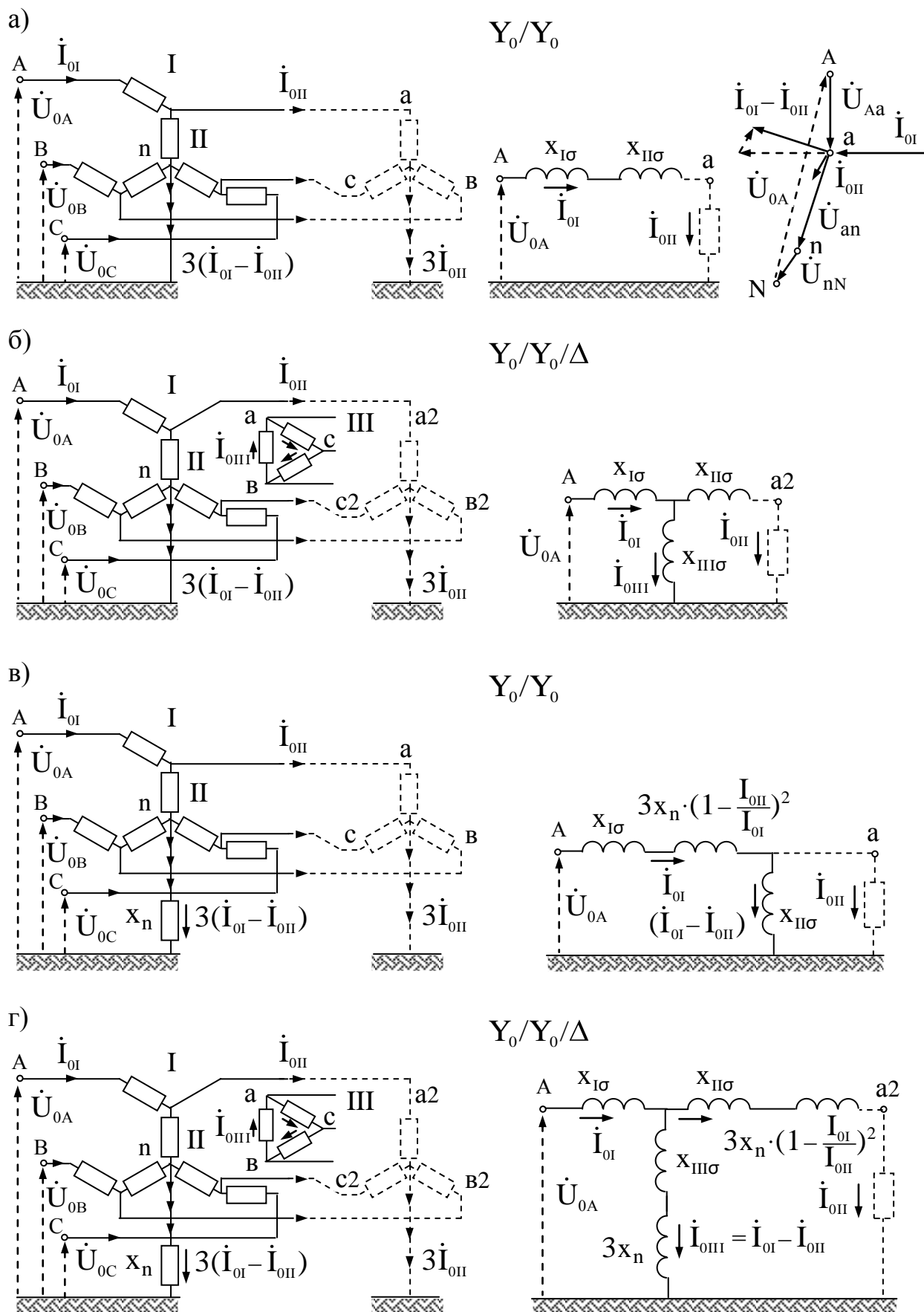


Рис. 31 Схемы соединения обмоток автотрансформатора и их схемы замещения для токов нулевой последовательности: а) и в) – Y_0/Y_0 ; б) и г) – $Y_0/Y_0/\Delta$.

Необходимо отметить, что непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в его нейтрали. При указанных на (рис. 31, а, б) направлениях токов искомый ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной обмоток, т. е. $I_n=3(\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})$, причем каждый из них должен быть отнесен к своей ступени напряжения, а не к какой-либо одной, для которой составлена схема замещения.

Особый случай представляет схема замещения автотрансформатора с заземленной нейтралью через реактивность x_n (рис. 31, в). Ток I_n через реактивность x_n совпадает с током через вторичную обмотку автотрансформатора и равен $I_n=3(\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})$. Используя уравнение баланса мощностей перенесем реактивность x_n из ветви с током $(\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})$ в ветвь с током \dot{I}_{01} , т.е. в первичную обмотку автотрансформатора, имеем:

$$\dot{I}_{01}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot (x_{II\sigma} + 3x_n) = \dot{I}_{01}^2 \cdot (x_{I\sigma} + x) + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot x_{II\sigma}, \quad (140)$$

где x – дополнительное сопротивление в ветви с током \dot{I}_{01} .

После соответствующих преобразований выражения (140) получим

$$x = 3x_n \cdot \left(1 - \frac{\dot{I}_{0II}}{\dot{I}_{01}}\right)^2 \quad (141)$$

Введение дополнительного сопротивления x в ветвь с током \dot{I}_{01} (рис. 31, в), эквивалентно приведению реактивности x_n к базисному напряжению первичной (ступень I) обмотки автотрансформатора.

При наличии у автотрансформатора третьей обмотки (рис. 31, г) необходимо определить результирующие реактивности нулевой последовательности между выводами ступеней I – II и I – III, приведенные к ступени I. Для пары обмоток I – II дополнительное сопротивление x_{II} , которое необходимо включить в ветвь с током \dot{I}_{0II} определится из уравнения баланса мощностей вида:

$$\dot{I}_{01}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot (x_{III\sigma} + 3x_n) + \dot{I}_{0II}^2 \cdot x_{II\sigma} = \dot{I}_{01}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot x_{III\sigma} + \dot{I}_{0II}^2 \cdot (x_{II\sigma} + x_{II})$$

откуда

$$x_{II} = 3x_n \cdot \left(1 - \frac{\dot{I}_{01}}{\dot{I}_{0II}}\right)^2 \quad (142)$$

Аналогичным образом, для пары обмоток I – III дополнительное сопротивление x_{III} в ветви с током \dot{I}_{0III} может быть определено из уравнения

$$\dot{I}_{01}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot (x_{II\sigma} + 3x_n) + \dot{I}_{0III}^2 \cdot x_{III\sigma} = \dot{I}_{01}^2 \cdot x_{I\sigma} + (\dot{I}_{01}-\dot{I}_{0II})^2 \cdot x_{II\sigma} + \dot{I}_{0III}^2 \cdot (x_{III\sigma} + x_{III})$$

откуда

$$X_{III} = 3X_n \quad (143)$$

Сопротивления X_{II} и X_{III} , определяемые выражениями (142) и (143) необходимо внести в соответствующие ветви на трехлучевой схеме замещения трехобмоточного автотрансформатора (рис. 31, г).

7. ТРЕХФАЗНЫЕ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫЕ СЕТИ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ЗАНУЛЕНИЕМ

Наибольшее распространение в практике эксплуатации систем электроснабжения получили сети с глухозаземленной нейтралью. Их преимущество (наряду с существенными недостатками) перед трехпроводными сетями с изолированной нейтралью заключается в том, что при заземленной нейтрали с занулением можно получить без трансформации две ступени стандартного напряжения, например, 660 и 1000 В, т.е. напряжение второй ступени в $\sqrt{3}$ раз больше, чем напряжение первой ступени и $U_{л} = \sqrt{3} U_{ф}$. Наличие двух стандартных напряжений в одной сети позволяет применить большее разнообразие электроустановок потребителей. В данной сети упрощается защита от однофазных (однополюсных) коротких замыканий.

Вместе с тем, данная сеть обладает рядом существенных недостатков, главным из них являются большие токи однофазного короткого замыкания (десятки, сотни и тысячи ампер), что влечет за собой появление мощной электрической дуги, вызывающей разрушение оборудования, пожары, взрывы в атмосфере окружающей среды, разрушение коммутационной аппаратуры, возгорание электропроводок и кабелей, переход на двух и трехполюсные короткие замыкания и т.д.

Зануление применяется в соответствии с [1] (1.7.2., 1.7.38.) в сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 220 ÷ 1000 В. Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (трансформаторы тока, реакторы и т.п.).

Занулением в электроустановках до 1000 В в сетях трехфазного тока называется преднамеренное соединение частей электроустановок с нулевым

многократно заземленным проводом (с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора).

Зануление предназначено:

1. Для обеспечения безопасности персонала (как и при защитном заземлении в сетях с изолированной нейтралью) от поражения электрическим током в случае появления напряжения на частях электрооборудования или электромеханических преобразователей (электрических машинах), не имеющих при нормальной работе гальванической связи токоведущими элементами. Если произойдет однополюсное короткое замыкание одной из фаз на корпус электроустановки, то цепь зануления создает параллельный путь току, и через человека будет проходить ток во много раз меньше, чем через цепь зануления. Это защитное свойство зануления аналогично, что и при защитном заземлении в сетях с изолированной нейтралью.

2. Для создания цепи однофазного короткого замыкания с малым сопротивлением в случае пробоя изоляции одной из фаз сети и возникновения короткого замыкания на корпус (на землю) и обеспечение тем самым срабатывания максимально-токовой защиты (МТЗ). Цель создания такой цепи заключается в том, чтобы сработала МТЗ, которая отключит поврежденный участок сети. МТЗ в практике эксплуатации сетей выполняется с помощью плавких вставок предохранителей, максимально-токовых расцепителей автоматических выключателей, максимально-токовых реле.

Расцепители тепловых реле в автоматических выключателях или пускателях, в силу их инерционности (время срабатывания $60 \div 80$ с), не являются элементами для отключения токов короткого замыкания. И в случае несрабатывания МТЗ при затянувшемся коротком замыкании удар тока к.з. приходится на тепловой расцепитель, который разрушается, что приводит, в конечном итоге, к тяжелым повреждениям и разрушениям автоматического выключателя или пускателя.

Практика эксплуатации электрических сетей свидетельствует о том, что не отключенные автоматически участки сети, где произошло однополюсное короткое замыкание на землю (на корпус, на сеть зануления), часто являются причинами тяжелых последствий (пожары, разрушения электроустановок и кабелей, взрывы, поражения людей и т.п.). В целях

надежности срабатывания МТЗ Правила устройства электроустановок регламентируют обязательную проверку МТЗ на надежность срабатывания (перегорание плавких вставок, отключение выключателей, срабатывание максимально-токовых реле).

Для обеспечения надежности перегорания плавкой вставки предохранителя согласно [1] необходимо, чтобы ток однофазного к.з. $I_{кз}^{(1)}$ превосходил номинальный ток плавкой вставки в 3 или больше раза, т.е. необходимо выполнить следующее условие [1] 1.7.79.

$$I_{кз}^{(1)} / I_{ном.пл.вст} \geq 3.$$

При защите сети автоматическими выключателями или максимально-токовыми реле необходимо, чтобы ток однофазного к.з. также был больше тока уставки в регламентируемое число раз в зависимости от вида, места установки и от условий окружающей среды. Часто принимают кратность тока к.з. к току уставки автомата или реле, равной 1,5, т.е.

$$I_{кз}^{(1)} / I_y \geq 1,5.$$

При проверке величины кратности $I_{кз}^{(1)}$ по отношению к току плавкой вставки или уставке автомата или реле рекомендуется руководствоваться [1] 1.7.79, 3.1.9, 3.1.11, 3.2.21, 7.3.139.

Такая проверка особенно важна в случае питания потребителей, удаленных от трансформатора, когда ток к.з. может не достигать необходимого значения для срабатывания МТЗ, а плавкие вставки предохранителей или уставки автоматов и реле выбраны по мощности или по току нагрузки. В таких случаях при однофазном к.з. защита не срабатывает и не отключает аварийный участок сети, что особенно опасно (пожар, разрушение электроустановки, возгорание проводки и т.п.).

Для проверки работоспособности МТЗ необходимо определить величину $I_{кз}^{(1)}$, для чего требуется знать сопротивление петли «фаза-нуль» $Z_{ф.0}$. Это сопротивление обычно определяют прибором М-417, МЗС-200, методом амперметра-вольтметра или расчетом.

Метод амперметра-вольтметра для определения сопротивления петли «фаза-нуль» заключается в том, что через петлю пропускают переменный ток, измеряют напряжение и ток, а по их значениям расчетом определяют сопротивление петли. Недостатком этого метода является то, что на период измерения необходимо отключать сеть, шунтировать коммутационные

аппараты, накладывая перемычки, имитирующие короткие замыкания. Однако такие измерения не часты, а точность их велика (можно использовать приборы высокого класса точности), применение рассматриваемого метода вполне оправдано.

3. Для выравнивания напряжения на фазах потребителя при несимметричной нагрузке. Выравнивание напряжения требуется в тех случаях, когда к фазам источника подключаются неравномерно одно- и двухфазные нагрузки. При этом на перегруженной фазе напряжение будет меньше номинального, а на недогруженной фазе может значительно превосходить номинальное значение. В том и других случаях потребители работают ненормально и могут выйти из строя.

Термины «неравномерная нагрузка» и «несимметричная нагрузка» несколько отличаются друг от друга. Равномерная нагрузка – это такая нагрузка, при которой модули проводимостей (или сопротивлений) фаз нагрузки равны. Симметричная нагрузка – это такая нагрузка, при которой комплексы проводимостей (или сопротивлений) фаз нагрузки равны между собой. При симметричной нагрузке равны не только модули проводимостей фаз нагрузки, но и должно быть равенство углов сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке. В этом существенное различие двух понятий. При несимметричной нагрузке, хотя и равномерной, существенно различаются потери мощности по фазам, имеет место неравномерный нагрев обмоток нагрузки и т.п. Более правильным и объемным термином является «несимметричная нагрузка» по сравнению с термином «равномерная нагрузка». В практике эксплуатации электрических сетей под термином «неравномерная нагрузка», вероятно, понимается «несимметричная нагрузка».

Напряжение на фазах нагрузки можно выравнивать также уменьшением сопротивления нулевого провода. В этом случае напряжение смещения нейтрали стремится к нулю, т.е. напряжения на нагрузке выравниваются. В практике эксплуатации электрических сетей стремятся (что очень важно!) к снижению сопротивления нулевого провода, для этого используется земля – многократное заземление нулевого провода.

В трехфазных четырехпроводных сетях с глухозаземленной нейтралью присоединение корпусов электроприемников к нулевому проводу обязательно. Нулевой провод в таких сетях выполняет две функции, поэтому

его называют защитным или рабочим проводником. Нулевым защитным проводником в электроустановках называют проводник, применяемый для защиты от поражения людей и животных электрическим током и соединяющий с глухозаземленной нейтралью трансформатора или генератора зануляемые части оборудования в сетях трехфазного тока. Нулевым рабочим проводником в электроустановках до 1000 В называется проводник, используемый для питания электроприемников, соединенный с глухозаземленной нейтралью трансформатора или генератора в сетях трехфазного тока, который предназначен и рассчитывается для прохождения по нему рабочего тока электроприемников. В электроустановках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью нулевой рабочий проводник может выполнять и функции нулевого защитного проводника, тогда он называется совмещенным нулевым защитным и нулевым рабочим проводником.

Прикосновение к фазе сети с глухозаземленной нейтралью с занулением практически всегда приводит к тяжелым последствиям. В данном случае изоляция сети не выполняет свои защитные функции, нет и аппарата защитного отключения. Прикосновение к фазе сети с глухозаземленной нейтралью или к корпусу незануленного оборудования, случайно оказавшегося под напряжением, например, в результате пробоя одной из фаз на корпус, человек попадает под действие фазного напряжения, ток через тело человека определяется выражением:

$$I_h = U_{\phi} / R_h ,$$

где R_h – сопротивление тела человека.

Статистика электротравматизма свидетельствует о том, что преобладающее число травм приходится именно на сети с глухим заземлением нейтрали. Отказ от глухого заземления нейтрали и зануления в трехфазных сетях до 1000 В позволит значительно повысить уровень электробезопасности в электроустановках, однако ПУЭ регламентируют применение этой системы электроснабжения. При прикосновении к корпусу зануленной электроустановки, случайно оказавшейся под напряжением, напряжение прикосновения при действии тока более 1 с не должно превышать 36 В, т.е.

$$U_{\text{ндоп}} \leq I_{\text{кз}}^{(1)} \cdot Z_0 \leq 36 \text{ В},$$

где Z_0 – сопротивление цепи нулевого провода (собственно нулевого провода и земли, проводимость которой параллельна проводимости нулевого провода) от электроустановки до питающего трансформатора или генератора.

Фазное напряжение источника U_ϕ распределяется на сопротивлении Z_ϕ фазного проводника до корпуса электроустановки и на сопротивлении цепи нулевого проводника Z_0 , т.е. можно записать

$$U_\phi = I_{кз}^{(1)} \cdot Z_\phi + I_{кз}^{(1)} \cdot Z_0.$$

Отсюда

$$Z_0 = U_\phi / I_{кз}^{(1)} - Z_\phi.$$

Падение напряжения на фазном проводе: $U_\phi - 36 = I_{кз}^{(1)} \cdot Z_\phi$.

Падение напряжения на нулевом проводе: $36 = I_{кз}^{(1)} \cdot Z_0$.

Поделив эти последние два равенства друг на друга, найдем:

$$Z_\phi \geq (U_\phi - 36) Z_0 / 36 \text{ В.}$$

При напряжении сети 380/220 В

$$Z_\phi \geq (220 - 36) Z_0 / 36 \geq 5,1 \cdot Z_0.$$

Таким образом, для обеспечения безопасности прикосновения к корпусу, случайно оказавшегося под напряжением, в сети с напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью с занулением необходимо, чтобы сопротивление цепи нулевого провода было в 5,1 раза меньше, чем сопротивление фазного провода. Аналогично, в сети напряжением 220/380 В – в 2,6 раза, а в сети 660/380 – в 9,6 раза меньше.

Обеспечить такие уровни проводимости нулевого провода в практике эксплуатации сетей удается не всегда. Поэтому эксплуатационному персоналу следует с особой тщательностью осуществлять проверку работоспособности МТЗ и добиваться снижения времени отключения электроустановки при однофазном замыкании на корпус (ниже 1 с).

Допустимые величины токов и напряжений прикосновения с частотой 50 Гц для человека при аварийных ситуациях приведены в табл. 7.

Таблица 7

t_b , сек	$U_{\text{доп}}$, В	$I_{\text{доп}}$, мА
0,1	500	500
0,2	250	250
0,3	165	165
0,4	125	125

Продолжение таблицы 7

0,5	100	100
0,6	85	85
0,7	70	70
0,8	65	65
0,9	55	55
1,0	50	50
Более 1,0	36	6

где t_b , – время воздействия тока.

7.1 СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ, КОНСТРУКЦИИ И ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Отключение защитное – электрозащитная мера, основанная на применении быстродействующих коммутационных аппаратов, отключающих питание электроустановки при возникновении в ней утечки тока на землю, или на защитный проводник, которое могло быть вызвано непреднамеренным включением человека в электрическую цепь.

Устройства, реализующие отключение защитное, согласно действующему ГОСТ Р 50538-93 называются устройствами защитного отключения – УЗО.

В основе действия защитного отключения как электрозащитного средства лежит принцип ограничения (за счет быстрого отключения) продолжительности протекания тока через тело человека при непреднамеренном прикосновении его к элементам электроустановки, находящимся под напряжением.

На рис. 32 представлены граничные кривые переменного тока промышленной частоты (сообщение Международной энергетической комиссии (МЭК) 479 , глава 2, 3 - е издание 1994 года), характеризующие воздействие электрического тока на человека в зависимости от продолжительности времени его протекания. Необходимые пояснения к рис . 32 приведены в табл. 8.

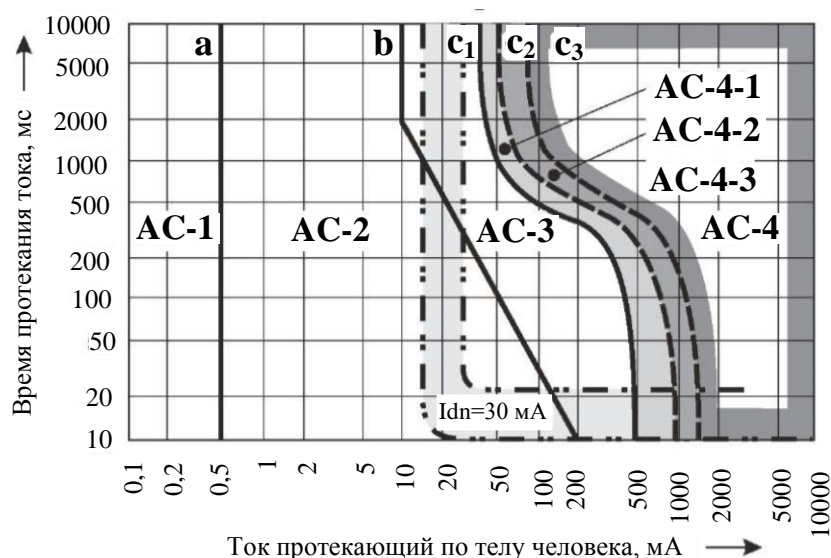


Рис. 32 Граничные кривые переменного тока

Таблица 8

Обозначение интервала (АС - переменного тока)	Предельное значение тока в интервале	Физиологическое воздействие
АС-1	до 0,5 мА (прямая <i>a</i>)	Обычно без ощутимого воздействия
АС-2	от 0,5 мА до ломаной линии <i>b</i>	Обычно без вредного физиологического воздействия
АС-3	от ломаной линии <i>b</i> до кривой <i>c1</i>	Обычно без органического повреждения. Возможна судорога мышц и проблемы с дыханием, если ток протекает дольше 2с. Нарушение сердечной деятельности без фибрилляции сердечной мышцы наблюдается только при более продолжительном времени протекания и при более высоких значениях тока
АС-4	выше кривой <i>c1</i>	Увеличивается вероятность возникновения таких опасных патологических явлений, как остановка дыхания и тяжелые ожоги
АС-4-1	<i>c1</i> - <i>c2</i>	Вероятность возникновения фибрилляции сердечной мышцы 5%
АС-4-2	<i>c2</i> - <i>c3</i>	Вероятность возникновения фибрилляции сердечной мышцы приблизительно 50%
АС-4-3	выше кривой <i>c3</i>	Вероятность возникновения фибрилляции сердечной мышцы выше 50%

Главным фактором, обуславливающим отсутствие смертельного исхода при поражении человека электрическим током, является малое время протекания электрического тока.

В специальной литературе приводится значение предельно допустимого произведения тока, протекающего по телу человека, и времени его протекания, равного $70 \text{ мА}\cdot\text{с}$. При значениях сопротивления тела человека 2000 Ом и напряжения прикосновения 230 В величина тока, протекающего по телу, составит $230/2000 = 0,115 \text{ А}$. Время протекания тока в этом случае не должно превышать значения $0,6 \text{ с}$. В случае использования УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током, равным $I_{\text{дн}}=30 \text{ мА}$ (рис. 32), значение времени отключения при касании человеком токоведущего проводника обычно находится в пределах от 10 до 30 мс , что гарантирует высокую степень безопасности.

7.1.1 МЕРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОСВЕННОГО ПРИКОСНОВЕНИЯ

Стандарт МЭК 60 364-4-41 устанавливает требования по обеспечению защиты от поражения электрическим током при эксплуатации зданий. Эта защита осуществляется применением мер, которые должны:

а) предотвратить возможность протекания тока через тело человека (изоляция токоведущих частей, уравнение потенциалов и другие);

б) ограничить величину тока, протекающего через тело человека, до безопасного значения, путем использования систем безопасного сверхнизкого напряжения;

в) быстро отключить неисправное электрооборудование от источника питания (предохранители, автоматические выключатели, УЗО).

В соответствии с 413-м разделом МЭК 60 364-4-41 мерами для обеспечения защиты от косвенного прикосновения являются:

– автоматическое отключение питания за определенное время (наибольшее время, в течение которого должно произойти автоматическое отключение источника питания, нормируется исходя из данных о воздействии электрического тока на организм человека (рис. 32));

– применение электрооборудования класса II или с равноценной изоляцией;

– применение изолирующих (непроводящих) помещений, зон, площадок;

- использование незаземленной системы местного уравнивания потенциалов;
- электрическое разделение цепей (с помощью разделяющего трансформатора или источника питания, равноценного ему по степени обеспечения электробезопасности).

7.1.2 ТИПЫ СИСТЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Защита посредством автоматического отключения питания в установленном время может быть использована в системах заземления типов TN, TT и IT.

В соответствии с ГОСТ Р50571.2.94 (МЭК 364-3-93) в обозначении системы заземляющего устройства первая буква I или T характеризует режим нейтрали трансформатора (генератора). Буква I означает, что сеть с изолированной нейтралью (нейтраль трансформатора изолирована от земли или связана с землей через очень большое сопротивление или разрядник). Буква T означает, что нейтраль трансформатора имеет глухое заземление.

Вторая буква в обозначении системы характеризует тип соединения с землей нетоковедущих частей (корпуса) электроустановки, доступных прикосновению, которые могут оказаться случайно под напряжением. Буква T означает прямое соединение открытых проводящих частей (корпусов) электроустановки с землей без связи их с нулевым многократно заземленным проводом, без связи их с нейтралью трансформатора.

Буква N указывает на присоединение нетоковедущих частей (корпусов) электроустановки с заземленной нейтралью (с нулевым многократно заземленным проводом) посредством PEN- или PE- проводников.

Последующие буквы характеризуют устройство нулевого защитного и нулевого рабочего проводников. Буква S означает, что функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном проводнике (PEN- проводнике), буква S – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника обеспечиваются отдельными проводниками.

Условные графические изображения на электрических схемах нулевых рабочих и нулевых защитных проводников приведены в табл. 9.

Таблица 9

Графическое изображение	Наименование проводника
	нулевой рабочий проводник (N)
	нулевой защитный проводник (PE)
	совмещенный нулевой рабочий и нулевой защитный проводник (PEN)

Система заземления и зануления TN-S имеет N- проводник и PE-проводник, которые работают отдельно по всей системе. В этой системе устройство защитного отключения может устанавливаться в любой точке сети. Однако при этом в трехфазных сетях переменного тока для реализации системы TN-S требуется во всей сети с глухозаземленной нейтралью с занулением от трансформатора (генератора) до электроприемника применять пятипроводные линии (рис. 33). Это делает систему TN-S более дорогой и сложной.

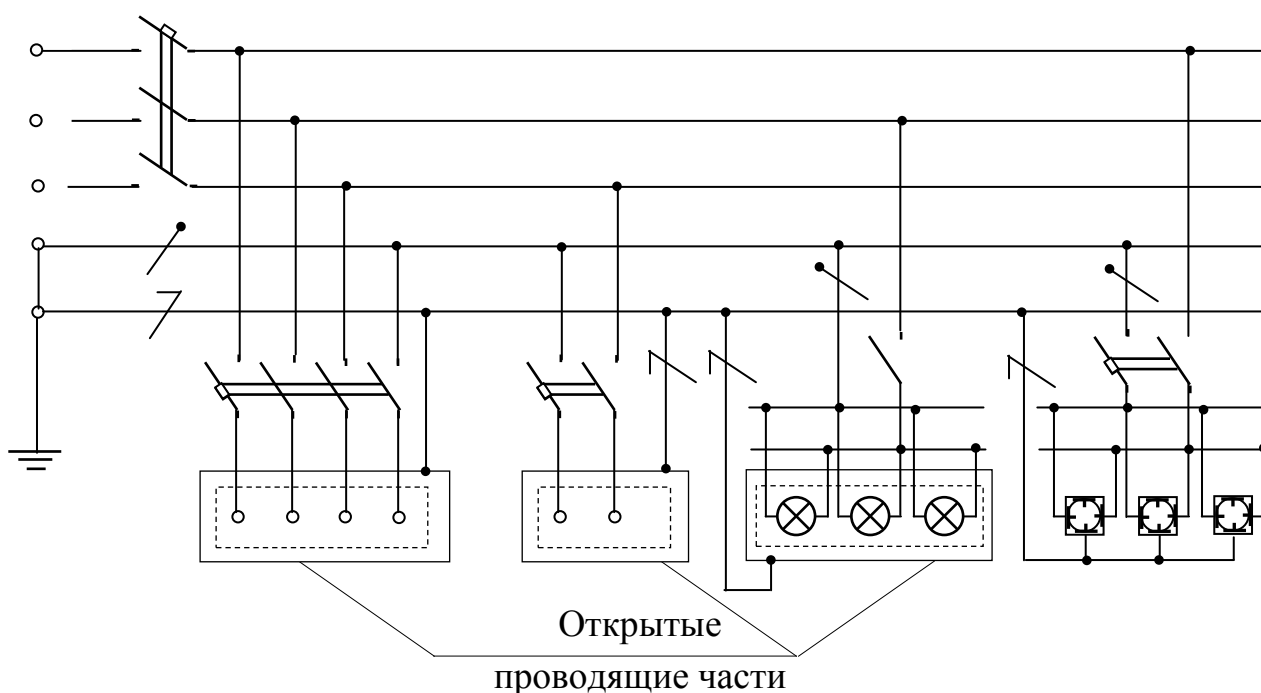


Рис. 33 Система заземления TN-S в трехфазных сетях переменного тока

Проводник N вводимый вовнутрь электроустановки, подключается к нейтральной точке нагрузки с целью выравнивания напряжения на фазах нагрузки и для канализации рабочего тока в нулевом проводе. PE-проводник подключается к корпусу нагрузки и является нулевым защитным проводником.

Система заземления и зануления TN-C-S является комбинацией систем заземления TN-C и TN-S, в которой PEN- проводник используется только в сети общего пользования. В какой-то точке сети PEN- проводник разделяется на два проводника PE- проводник и N- проводник. После точки разделения PE- и N- проводники соединять (объединять) запрещается, N- проводник изолируется от корпуса, при этом предусматриваются отдельные зажимы или шины для PE- проводника и N- проводника. Разделение PEN-проводника в системе TN-C-S обычно осуществляется на вводе в электроустановку. В точке разделения PEN-проводник заземляется на повторный контур заземления (рис. 34).

К PEN- проводнику предъявляются следующие требования в системе TN-C-S:

- сечение медного проводника должно быть не менее 10 мм^2 ;
- сечение алюминиевого проводника должно быть не менее 16 мм^2 ;
- электроустановки с PEN-проводником не должны быть оснащены УЗО, реагирующими на дифференциальный ток. Устройства защитного отключения могут быть установлены только после разделения PEN-проводника со стороны электроприемников.

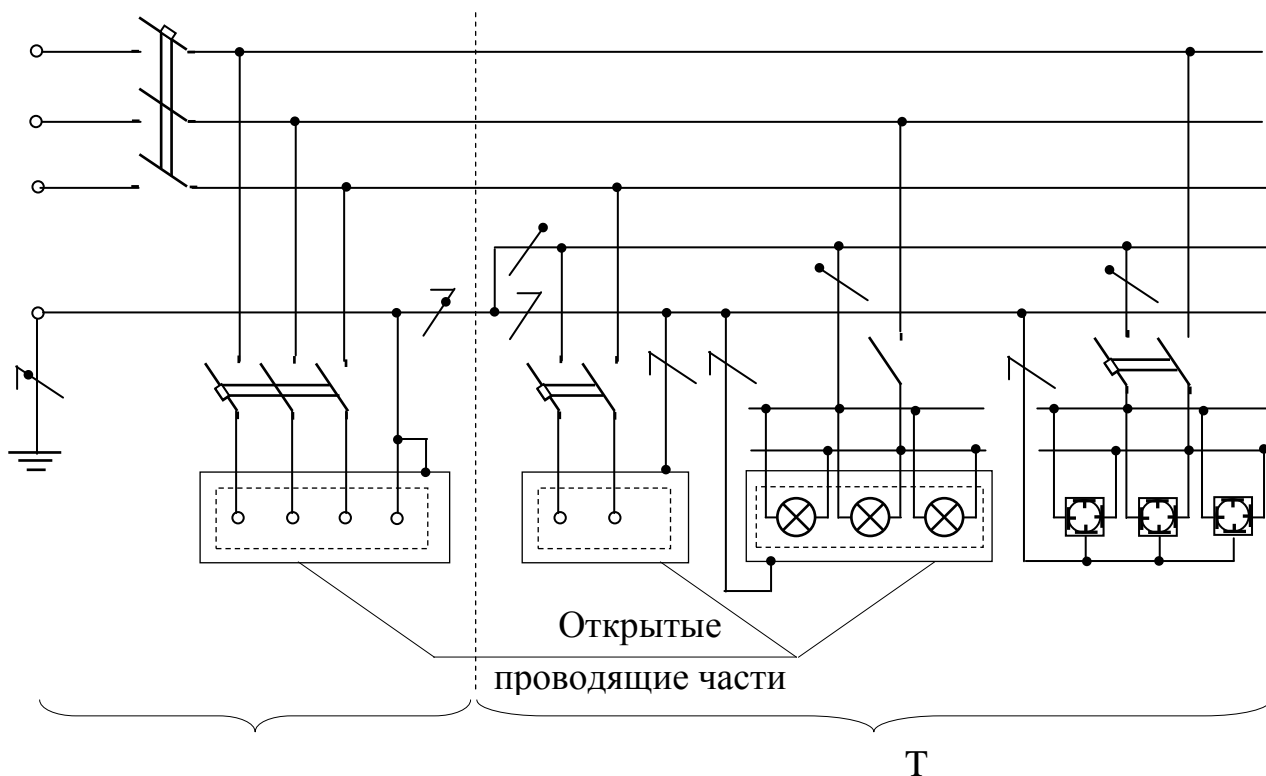


Рис. 34 Система заземления TN-C и TN-C-S в трехфазных сетях переменного тока

Следует отметить, что система TN-C-S является наиболее перспективной для практического применения, так как она позволяет применить УЗО при использовании отдельных РЕ- и N-проводников, что дает возможность обеспечить более высокий уровень электробезопасности по сравнению с системой TN-C, а в существующих электрических сетях не требуется реконструкция.

В системе заземления ТТ нейтраль трансформатора или генератора глухо заземлена, а открытые токопроводящие части корпуса оборудования присоединены к заземлителю, независимому от заземлителя нейтрали источника питания (рис. 35). В данной системе заземляющие устройства выполняются без связи между собой, таких устройств может быть несколько. Эта система применяется в электросетях напряжением 110 кВ и выше, когда электроэнергия передается на большие расстояния по трехпроводной трехфазной линии, а заземляющие устройства выполняются «собственные» на каждой повышающей или понижающей подстанции.

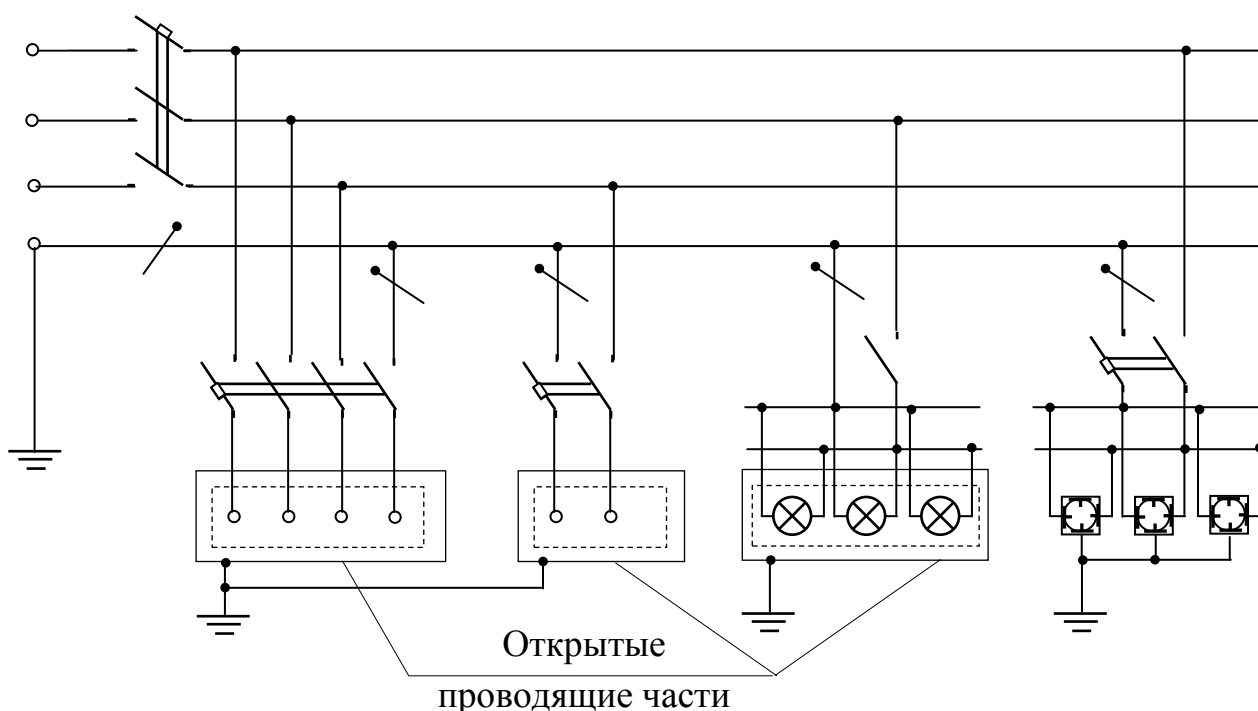


Рис. 35 Система заземления ТТ в трехфазных сетях переменного тока

В некоторых случаях по ГОСТ Р50669 рекомендуется использовать эту систему при проектировании, монтаже и эксплуатации электроустановок зданий и помещений из металла (киоски, павильоны и т.п.), где существует металлическая связь между источником и электроприемником. Это правило

распространяется и на электроприемники передвижных установок от передвижных автономных источников питания, где имеется металлическая связь корпусов электрооборудования.

Защита от сверхтоков, используемая в сетях системы ТТ, TN и IT, в части обеспечения электробезопасности имеет ряд технических недостатков, например:

а) в ряде случаев приходится ограничивать мощность потребления электроприемников для того, чтобы обеспечить нужное сопротивление заземляющего устройства R_A или полного сопротивления цепи замыкания Z_A

б) если значения Z_A или R_A вместе повреждения недостаточно малы, то на открытых проводящих частях может появиться опасное напряжение прикосновения. При небольшом значении тока повреждения время отключения велико. В течение этого времени на открытой проводящей части присутствует опасное напряжение прикосновения, а защитный проводник осуществляет вынос потенциала на другие открытые проводящие части;

в) в сетях системы TN-C на открытых проводящих частях появляется фазное напряжение в случаях:

- замены проводника PEN на фазный;
- обрыва проводника PEN;

г) при замене аппарата защиты на аппарат с большим номинальным током, выполненной неквалифицированным персоналом, время отключения поврежденного участка может превышать допустимое, либо отключение может вообще не произойти;

д) защита от непосредственного прикосновения к токоведущим частям не обеспечивается.

Кроме того, выполнение требований, обеспечивающих электробезопасность в сети системы ТТ посредством предохранителей или автоматических выключателей, практически не реализуемо. Поэтому в таких сетях должны использоваться УЗО. В свою очередь, в сетях систем TN и IT с введением в действие стандарта МЭК 60 364 - 4 - 41 ужесточаются требования ко времени отключения защитными аппаратами поврежденного участка сети. Для случаев, когда реализация увеличения сечений проводников затруднена, стандарт четко определяет альтернативное решение – использование УЗО.

Устройство защитного отключения является превентивным электротехническим мероприятием и в сочетании с современными системами заземления (TN-S, TN-C-S, TT) обеспечивает высокий уровень электробезопасности при эксплуатации электроустановок.

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

7.1.3 КЛАССИФИКАЦИЯ УЗО

Все УЗО по виду входного сигнала классифицируют на несколько типов (рис. 35).



Рис. 35 Классификация УЗО по виду входного сигнала

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

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

7.1.4 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЗО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА

Принцип действия УЗО дифференциального типа основан на применении электромагнитного векторного сумматора токов – дифференциального трансформатора тока. Сравнение текущих значений двух и более (в четырехполюсных УЗО – четырех) токов по амплитуде и фазе наиболее эффективно, т.е. с минимальной погрешностью, осуществляется электромагнитным путем – с помощью дифференциального трансформатора тока (рис. 36) [9].

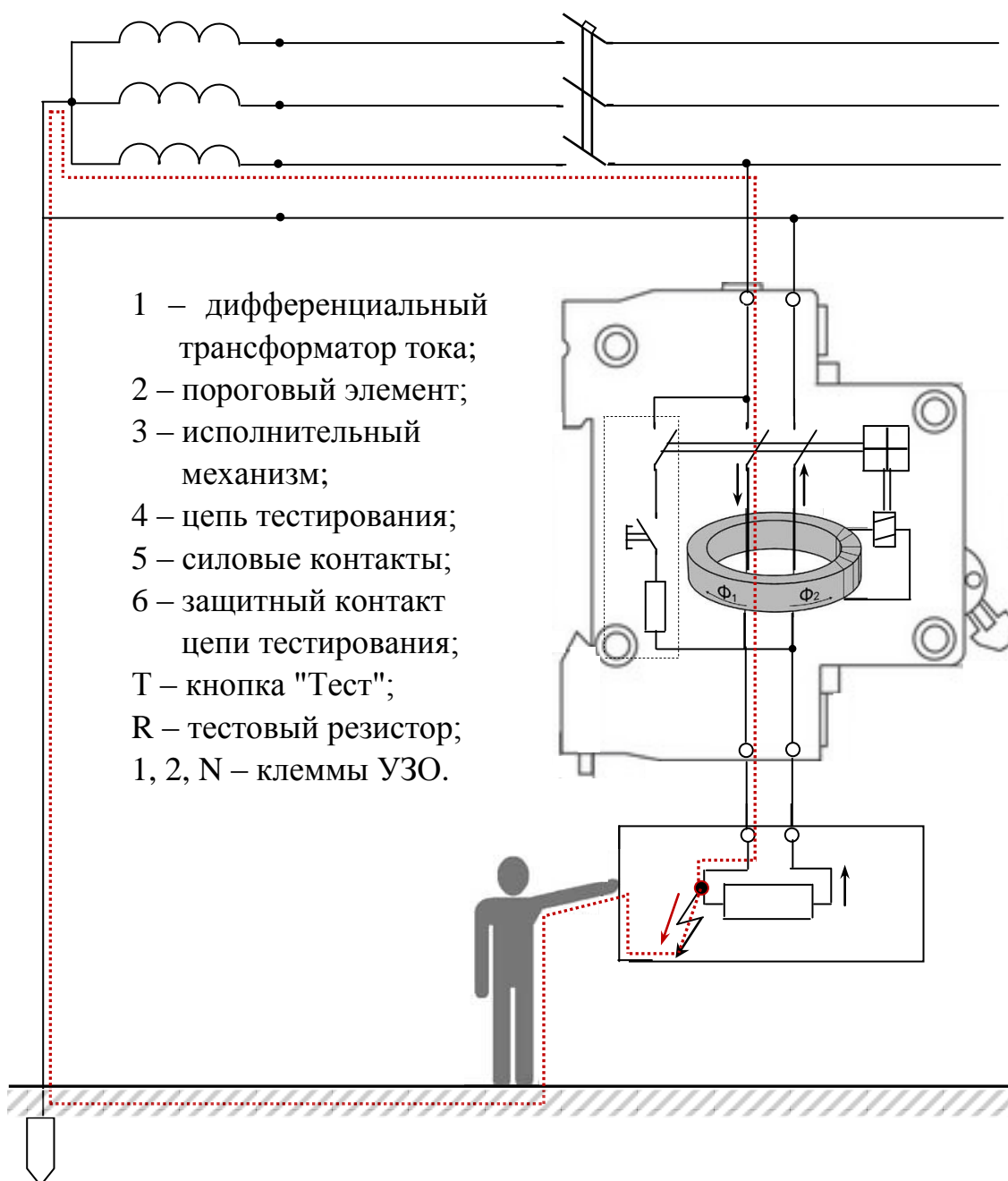


Рис. 36 Структурная схема и принцип действия УЗО

Конструктивно дифференциальные УЗО разделяются на два типа:

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

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

Применение устройств, функционально зависящих от напряжения питания, более ограничено в силу их меньшей надежности и подверженности воздействию внешних факторов. Однако основной причиной меньшего распространения таких устройств является их неработоспособность при часто встречающейся и наиболее опасной по условиям вероятности электропоражения неисправности электроустановки, а именно – при обрыве нулевого проводника в цепи до УЗО по направлению к источнику питания. В этом случае электронное УЗО, не имея питания, не функционирует, а на электроустановку по фазному проводнику выносится опасный для жизни человека потенциал.

К магнитопроводу трансформатора тока электромеханического УЗО предъявляются чрезвычайно высокие требования по качеству: высокая чувствительность, линейность характеристики намагничивания, температурная и временная стабильность и т.д. По этой причине для изготовления магнитопроводов трансформаторов тока, применяемых при производстве УЗО, используется специальное высококачественное аморфное (некристаллическое) железо.

Важнейшим функциональным блоком УЗО (рис. 36) является дифференциальный трансформатор тока 1. В абсолютном большинстве УЗО, производимых и эксплуатируемых в настоящее время во всем мире, в качестве датчика дифференциального тока используется именно трансформатор тока. В литературе по вопросам конструирования и применения УЗО этот трансформатор иногда называют трансформатором тока нулевой последовательности (ТТНП), хотя понятие "нулевая

последовательность" применимо только к трехфазным цепям и используется при расчетах несимметричных режимов многофазных цепей.

Пусковой орган (пороговый элемент) 2 выполняется, как правило, на чувствительных магнитоэлектрических реле прямого действия или электронных компонентах. Исполнительный механизм 3 включает в себя силовую контактную группу с пружинным механизмом привода.

В нормальном режиме, при отсутствии дифференциального тока – тока утечки, в силовой цепи по проводникам, проходящим сквозь окно магнитопровода и образующим встречно включенные первичные обмотки дифференциального трансформатора тока 1, протекает рабочий ток нагрузки $I_1 = I_2$. Ток I_1 протекает по направлению к нагрузке, I_2 – от нагрузки.

Равные токи во встречно включенных обмотках наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока, равные по значению, но противоположно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . Результирующий магнитный поток оказывается равным нулю, следовательно, ток во вторичной обмотке дифференциального трансформатора также будет отсутствовать. При этом пусковой орган 2 находится в состоянии покоя.

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 I_1 , потечет дополнительный ток ΔI (ток утечки), являющийся для трансформатора тока дифференциальным (разностным). Неравенство токов в первичных обмотках – $I_1 + \Delta I$ в фазном проводнике и $I_2 = I_1$ 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 2, последний срабатывает и воздействует на исполнительный механизм 3. 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.

7.1.5 ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УЗО

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

Номинальное напряжение (U_n) – значение напряжения, установленное изготовителем УЗО, при котором устройство работоспособно. Обычно 220 или 380 В. Равенство напряжения в сети и номинального напряжения УЗО очень важно для электронных УЗО. От этого сильно зависит его работоспособность.

Номинальный ток (I_n) – максимальный ток, при котором УЗО сохраняет свою работоспособность продолжительное время. Номинальный ток УЗО выбирается из ряда: 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 63, 80, 100, 125 А. Поскольку УЗО должно быть защищено последовательным защитным устройством (ПЗУ), номинальный ток нагрузки УЗО должен быть скоординирован с номинальным током ПЗУ. Номинальный ток нагрузки УЗО должен быть равен или на ступень выше номинального тока последовательного защитного устройства. Это означает, что, например, в цепь, защищаемую автоматическим выключателем с номинальным током нагрузки 25А, должно быть установлено УЗО с номинальным током 40А (см. табл. 3).

Таблица 10

Устройство	Номинальный ток нагрузки, А						
	10	16	25	40	63	80	100
ПЗУ	10	16	25	40	63	80	100
УЗО	16	25	40	63	80	100	125

Целесообразность такого требования можно объяснить простым примером. Если УЗО и автоматический выключатель имеют равные номинальные токи, то при протекании тока, превышающего номинальный, например, на 45%, т.е. тока перегрузки, этот ток будет отключен автоматическим выключателем за время до одного часа. Это означает, что этот период времени УЗО будет перегружено. Номинальный не

отключающий дифференциальный ток УЗО равен половине значения тока уставки. Это означает, что реальное значение дифференциального тока, при котором УЗО срабатывает, находится в диапазоне от половины до целого значения номинального отключающего тока. При этом каждое конкретное устройство имеет, как правило, определенное стабильное значение отключающего тока, находящееся в указанном диапазоне. Проектировщики и пользователи УЗО должны во избежание ложных отключений учитывать данное обстоятельство и сопоставлять реальное значение отключающего тока с "фоновым" током утечки в электроустановке,

Номинальный отключающий дифференциальный ток (I_{dn}) – ток утечки. Основная характеристика УЗО. Данное значение показывает величину дифференциального тока, указанное при котором УЗО должно срабатывать при заданных условиях. Номинальный отключающий дифференциальный ток УЗО выбирается из следующего ряда: 6, 10, 30, 100, 300, 500 мА. Уставку УЗО для каждого конкретного случая применения выбирают с учетом следующих факторов:

- значения существующего в данной электроустановке суммарного (с учетом присоединяемых стационарных и переносных электроприемников) тока утечки на землю – так называемого "фонового тока утечки";

- значения допустимого тока через человека на основе критериев электробезопасности;

- реального значения отключающего дифференциального тока УЗО, которое в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50807-94 находится в диапазоне $(0,5 \div 1)I_{dn}$. Согласно требованиям ПУЭ ([1] п.7.1.83), номинальный дифференциальный отключающий ток УЗО должен быть не менее чем в три раза больше суммарного тока утечки защищаемой цепи электроустановки (I_d), т.е. $I_{dn} \geq 3 \cdot I_d$.

Суммарный ток утечки электроустановки замеряется специальными приборами либо определяется расчетным путем. Рекомендуемые значения на основе критериев электробезопасности номинального отключающего дифференциального тока – I_{dn} (уставки) УЗО для диапазона номинальных токов $(16 \div 80)A$ приведены в табл. 11.

Таблица 11

Номинальный ток нагрузки в зоне защиты, мА	16	25	40	63	80
Idn при работе в зоне защиты одиночного потребителя, мА	10	30	30	30	100
Idn при работе в зоне защиты группы потребителей, мА	30	30	30(100)	100	300
Idn УЗО противопожарного назначения на ВРУ, ВРЩ, мА	300	300	300	300	300

При отсутствии фактических (замеренных) значений тока утечки в электроустановке ПУЭ ([1] п.7.1.83) предписывают принимать ток утечки электроприемников из расчета 0,4мА на 1А тока нагрузки, а ток утечки цепи из расчета 10 мкА на 1м длины фазного проводника.

В некоторых случаях для определенных потребителей значение уставки задается нормативными документами. В ГОСТ Р 50669-94 применительно к зданиям из металла или с металлическим каркасом задается значение уставки УЗО не выше 30 мА. Временные указания предписывают: для сантехнических кабин, ванных и душевых устанавливать УЗО с током срабатывания: 10 мА, если на них выделена отдельная линия. В остальных случаях (например, при использовании одной линии для сантехнической кабины, кухни и коридора) допускается использовать УЗО с уставкой 30 мА. В индивидуальных жилых домах для групповых цепей, питающих штепсельные розетки внутри дома, включая подвалы, встроенные и пристроенные гаражи, а также в групповых сетях, питающих ванные комнаты, душевые и сауны УЗО с уставкой 30 мА.

ПУЭ ([1] п. 7.1.84) рекомендуется для повышения уровня защиты от возгорания при замыканиях на заземленные части на вводе в квартиру, индивидуальный дом и тому подобное установка УЗО с током срабатывания до 300 мА.

В соответствии с ПУЭ ([1] п.1.7.177) в животноводческих помещениях, в которых отсутствуют условия, требующие выполнения выравнивания потенциалов, должна быть выполнена защита при помощи УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не менее 100 мА, устанавливаемых на вводном щитке.

Номинальный условный ток короткого замыкания (I_{nc}) – характеристика, определяющая надежность и прочность устройства, качество исполнения его механизма и электрических соединений при протекании сверхтока (тока короткого замыкания в сети), значение этого параметра проверяется при сертификационных испытаниях. Еще этот параметр называют "стойкость к току короткого замыкания". Автомат, который защищает цепь, сработает на отключение, но это произойдет через 10 мс. За это время УЗО будет находиться под воздействием сверхтока, если оно сохраняет работоспособность, то его качество считается высоким. Значения номинального тока короткого замыкания стандартизованы и равны: 3000, 4500, 6000 и 10000 А. Минимально допустимое значение – 3000 А. Для УЗО типов S и G (с задержкой срабатывания) предъявляются повышенные требования к току короткого замыкания. Их устанавливают на вводе, и они находятся под воздействием сверхтока более продолжительное время.

Номинальная коммутационная способность (I_m) – согласно требованиям, должна быть не менее чем в 10 раз больше номинального тока или равна 500 А. Качественные устройства имеют, как правило, гораздо более высокую коммутационную способность – 1000, 1500 А. Такие устройства надежнее, и в аварийной ситуации, например, при коротком замыкании на землю, УЗО, опережая автомат защиты, гарантированно произведут отключение электроустановки.

Номинальное время отключения (t_n) – промежуток времени между моментом внезапного возникновения отключающего дифференциального тока и моментом гашения дуги на всех полюсах. Стандартами установлено предельно допустимое время отключения УЗО – 0,3с. В действительности современные качественные УЗО имеют быстроедействие порядка 20÷30 мс. Это означает, что УЗО "быстрый" выключатель, поэтому на практике возможны ситуации, когда УЗО срабатывает раньше аппарата защиты и отключает как токи нагрузки, так и сверхтоки.

Дополнительные, возможно важные, технические характеристики УЗО:

Показатель качества изготовления. Номинальный ток короткого замыкания (I_{nc}) – один из основных параметров УЗО, характеризующий, прежде всего, качество изделия. Указанное заводом-изготовителем значение этого параметра проверяется при сертификационных испытаниях устройства. Смысл испытания заключается в определении термической и

электродинамической стойкости изделия при протекании сверхтоков. При испытании на специальном стенде создается цепь из мощного источника и нагрузки, обеспечивающая протекание заданного сверхтока из ряда: 3; 4,5; 6; 10 кА. Испытательный ток не достигает заданного значения, поскольку отключается ранее последовательно включенным защитным аппаратом с нормированной уставкой. Как правило, для этой цели применяются плавкие вставки в виде серебряных проводников калиброванного сечения. Значение I_{nc} , как важнейшего параметра УЗО, должно обязательно быть приведено на лицевой панели устройства, или в сопроводительной технической документации на УЗО. Для УЗО типов S и G предъявляются повышенные требования по данному параметру, поскольку предполагается, что, во-первых, УЗО этого типа устанавливаются на головном участке сети, где токи короткого замыкания, естественно, выше, во-вторых, такие устройства, имея задержку по срабатыванию, могут находиться под воздействием аварийных токов более продолжительное время.

Показатель качества изготовления. Номинальный дифференциальный ток короткого замыкания (I_{Dc}) – Параметр аналогичен рассмотренному в I_{nc} . Главным отличием является то, что сверхток протекает по одному проводнику УЗО и испытания проводятся при включении испытательного тока поочередно по отдельным полюсам УЗО.

Предельное значение неотключающего сверхтока (I_{nm}) – Данный параметр характеризует способность УЗО не реагировать на симметричные токи короткого замыкания и перегрузки и также является важным показателем качества устройства. Неправильно считать, что это ток, при котором УЗО должно производить отключение. Нормативы определяют минимальное значение неотключающего тока, равное шестикратному значению номинального тока нагрузки, т.е. $I_{nm} = 6 \cdot I_n$. Максимальное значение неотключающего сверхтока не нормируется и может иметь значения, намного превышающие $6I_n$.

Номинальная включающая и отключающая способность (коммутационная способность) – (I_m) – Коммутационная способность зависит от уровня технического исполнения устройства – качества силовых контактов, мощности пружинного привода, материала (пластмассовых или металлических деталей) и качества механизма, наличия дугогасящей камеры и др. Этот параметр в значительной степени определяет надежность УЗО. В

некоторых аварийных режимах УЗО должно осуществить отключение сверхтоков, опережая автоматический выключатель, при этом оно должно сохранить свою работоспособность.

Номинальная включающая и отключающая способность по дифференциальному току (I_{Dm}) – Данная характеристика аналогична рассмотренной выше I_m с той разницей, что предполагается протекание дифференциального сверхтока, например, при коротком замыкании на корпус электроприемника в системе TN-C-S.

7.1.6 ТИПЫ УЗО ПО УСЛОВИЯМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

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

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

УЗО данного типа применяются в системах, где возможен синусоидальный ток утечки на землю. Они не чувствительны к импульсным дифференциальным токам с пиковым значением до 250А (форма волны 8/20 μ S), которые могут возникнуть, например, при наложении импульсов перенапряжения при включении люминесцентных ламп, рентгеновского оборудования, систем обработки информации, тиристорных преобразователей.

Стандартные значения максимально допустимого времени отключения УЗО типа AC при любом номинальном токе нагрузки и заданных нормами значениях дифференциального тока не должны превышать приведенных в табл. 12.

Максимальное время отключения, установленное в табл. 12, распространяется также на УЗО типа A. При этом испытания УЗО типа A проводят при значениях токов I_{dn} , $2 I_{dn}$, $5 I_{dn}$ и 500 А с коэффициентом 1,4 (при $I_{dn} > 0,01$ А) и с коэффициентом 2 (при $I_{dn} \leq 0,01$ А).

Таблица 12

Номинальный отключающий дифференциальный ток	I_{dn}	$2 \cdot I_{dn}$	$5 \cdot I_{dn}$	500 А
Номинальное время отключения t_n , с	<0,3	<0,15	<0,04	<0,04

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

УЗО данного типа нечувствительны к импульсным утечкам с пиковым значением тока до 250 А (форма волны 8/20 μ S). Они предназначены для использования в установках, где имеются электронные выпрямители и фазоимпульсные регуляторы физической величины (скорости, температуры, интенсивности освещения) класса изоляции I, получающие питание непосредственно из электросети без использования трансформатора (класс изоляции II, по своему определению, не допускает утечки на землю). УЗО типа А способны распознавать пульсирующие токи замыкания на землю с постоянной составляющей, которые могут возникать в подобных схемах.

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

УЗО данного типа пригодны для защиты установок от пульсирующего постоянного или синусоидального тока утечки, а так же постоянного тока утечки. Способны распознавать постоянный ток утечки с небольшой пульсацией. Их рекомендуется использовать для защиты электродвигателей и инверторных приводов насосов, лифтов, текстильных и обрабатывающих станков.

УЗО типа G – устройство защитного отключения с кратковременной выдержкой времени.

Для электрических потребителей, вызывающих при включении кратковременные высокие дифференциальные токи (например, переходные токи, протекающие через конденсатор помехоподавления между фазным проводом и проводом PE), могут происходить нежелательные срабатывания УЗО без выдержки времени, если дифференциальный ток превышает расчетный отключающий дифференциальный ток I_{dn} УЗО.

Для таких случаев, когда устранение подобных источников помех невозможно или возможно лишь отчасти, могут применяться УЗО с кратковременной выдержкой срабатывания.

Эти устройства имеют время срабатывания более 10 мс, т. е. они не должны срабатывать при импульсе тока длительностью 10 мс. При этом выдерживаются условия срабатывания согласно DIN VDE 0664 часть 1.

Устройства обладают импульсной устойчивостью 3 кА, превосходящей требования DIN VDE 0664. Устройства защитного отключения с кратковременной выдержкой срабатывания обозначаются маркировкой G.

Предельные значения времени отключения УЗО типа G в зависимости от величины тока I_{dn} приведены в табл. 13.

Таблица 13

Номинальный отключающий дифференциальный ток	I_{dn}	$2 \cdot I_{dn}$	$5 \cdot I_{dn}$	500 А
Максимальное время отключения, с	0,3	0,15	0,15	0,04
Минимальное время не отключения, с	0,01	0,01	0,01	0,01

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

Селективность УЗО означает, что из последовательно включенных в цепь устройств, срабатывает только то, которое расположено ближе к месту повреждения. Цель селективности – исключение нежелательных отключений последующих УЗО.

Для всех приведенных выше типов УЗО их селективная работа невозможна. Для того чтобы добиться селективности при последовательном включении УЗО, эти устройства должны различаться как по выдержке времени срабатывания, так и по расчетному отключающему дифференциальному току. Для селективных УЗО предусмотрена маркировка S. Стандартные значения допустимого времени отключения и не отключения для УЗО типа S при любом номинальном токе нагрузки свыше 25 А и значениях номинального отключающего дифференциального тока свыше 0,03 А не должны превышать приведенных в табл. 14.

Таблица 14

Номинальный отключающий дифференциальный ток	I_{dn}	$2 \cdot I_{dn}$	$5 \cdot I_{dn}$	500 А
Максимальное время отключения, с	0,5	0,2	0,15	0,15
Минимальное время не отключения, с	0,13	0,06	0,05	0,04

Из табл. 12÷14 следует:

– УЗО для общего применения без задержки срабатывания и УЗО типа G имеют одинаковые верхние предельные значения времени отключения. УЗО этих типов должны отключиться не позже 0,3 с после возникновения

отключающего дифференциального тока I_{dn} , а устройства селективного типа - не позже 0,5 с;

– у УЗО для общего применения отсутствует нижняя граница времени срабатывания;

– УЗО с задержкой срабатывания имеет определенное время не отключения, когда устройство находится в состоянии ожидания. Очевидно, что УЗО с задержкой срабатывания можно использовать для исключения ложных срабатываний под влиянием кратковременных внешних воздействий (перенапряжений, различных помех, коммутаций электроприемников).

К УЗО также предъявляется требование, заключающееся в том, что рабочий диапазон срабатывания устройства должен находиться в пределах от 50÷100% тока I_{dn} .

Параметр, называемый „устойчивость к импульсному току“, определяет наибольшую величину максимального мгновенного значения тока (ударный ток) в рабочих проводниках, при котором УЗО не должно сработать. Например, если у УЗО общего применения без задержки отключения устойчивость к импульсному току составляет 250 А, то в случае наличия ударного тока при коммутации электропотребителя, превышающего указанное значение, может произойти ложное отключение УЗО. Срабатывание произойдет из-за несимметричного расположения проводов в окне суммирующего трансформатора тока. Очевидно, что УЗО с задержкой срабатывания отличается повышенной устойчивостью к ударному току в рабочих проводниках.

7.1.7 СЕЛЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ УЗО

Для обеспечения селективности двух последовательно включенных в цепь УЗО их графически изображенные время токовые характеристики срабатывания не должны иметь общих точек. Время токовые характеристики УЗО различных типов (G, S и общего применения) представлены на рис. 37. Из рис. 37 видно, что расположение УЗО типа S с указанными на рисунке параметрами ближе к источнику питания обеспечит селективную работу устройств, включенных в радиальную схему сети на участках, расположенных дальше от источника питания.

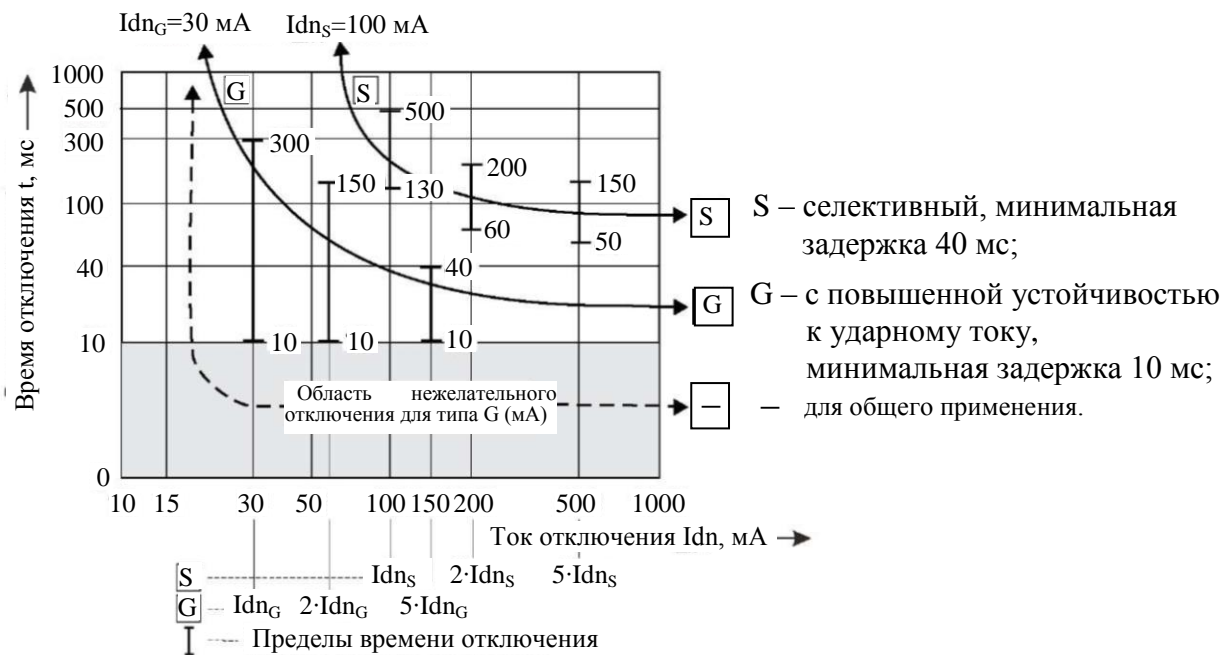


Рис. 37 Время токовые характеристики УЗО типа G, S и общего применения

Для обеспечения селективной работы последовательно включенных в цепь УЗО во всех случаях (независимо от значений дифференциальных токов при повреждениях в сети) требуется выполнение двух условий:

1. УЗО, расположенное ближе к источнику питания, должно быть типа S. При этом достигается селективность по времени.
2. Значение номинального отключающего дифференциального тока УЗО типа S должно быть не менее утроенного значения номинального отключающего дифференциального тока УЗО типа G или общего применения, расположенных дальше от источника питания, то есть:

$$I_{dnS} \geq 3 \cdot I_{dnG}$$

Необходимо отметить, что УЗО предназначены, прежде всего для защиты электрических цепей от утечек токов на "землю" и никак не могут быть использованы в качестве "автоматов" — для защиты от коротких замыканий. Более того, УЗО само должно быть обеспечено защитой от сверхтоков и токовых перегрузок.

В настоящее время отечественной и зарубежной промышленностью выпускается целый ряд УЗО различного назначения. Из отечественных фирм потребителям известны ставропольский завод "СИГНАЛ" (выпускает электронное "УЗО-20"), НИИ "ПРОЕКТЭЛЕКТРОМОНТАЖ" (производит электронное "УЗО-2000"), фирма "АСТРО-УЗО" (предлагает

электромеханическое устройство "Астро*УЗО"). Кроме того, широко используются УЗО известных зарубежных фирм, таких как Siemens, ABB, Schneider Electric, GE Power, Hager, AEG, Legrand, Circutor и др.

7.2 УЗО СЕРИИ MULTI 9 ТИП ID

Французский концерн Schneider Electric предлагает российским покупателям сразу две гаммы устройств данного класса – многофункциональную серию Multi 9 марки Merlin Gerin и серию устройств, специально предназначенных для оборудования жилых зданий – "Домовой".

Свое название гамма получила исходя из следующей логики: 9 мм – стандартная ширина дополнительного контакта или половина ширины автоматического выключателя, а слово "мульти" говорит о большой номенклатуре выпускаемых изделий, устанавливаемых на DIN-рейку.

УЗО серии Multi 9 мгновенного действия (тип ID) на токи 16...125 А предназначены для отключения цепи (вручную и автоматически) в случае повреждения изоляции между фазой и землей, когда ток утечки более или равен 10, 30, 300, 500мА.

УЗО типа ID мгновенного действия применяются в распределительных сетях административных и промышленных зданий. Отстраивается от кратковременных, неустойчивых, случайных перенапряжений (пробой из-за пыли, коммутационные перенапряжения, грозовые разряды и т.д.) и работы высокочастотного оборудования.

Большинство промышленных электрических установок создают или передают помехи. Кроме того, питающие их воздушные сети, как правило, подвергаются действию атмосферных возмущений, а сами устройство УЗО могут быть чувствительны к грозовым разрядам. В действительности, в зависимости от удаленности источника помех, сеть низкого напряжения может испытывать воздействие:

- перенапряжения, которое возникает между токоведущими проводами и землей, когда помеха уходит на землю значительно выше устройства УЗО (рис. 38, а);
- тока перегрузки, часть которого попадает в сеть ниже УЗО, например, через паразитные емкости (рис. 38, б);
- тока перегрузки, определяемого устройством УЗО, возникающего в результате пробоя ниже УЗО (рис 38, в).

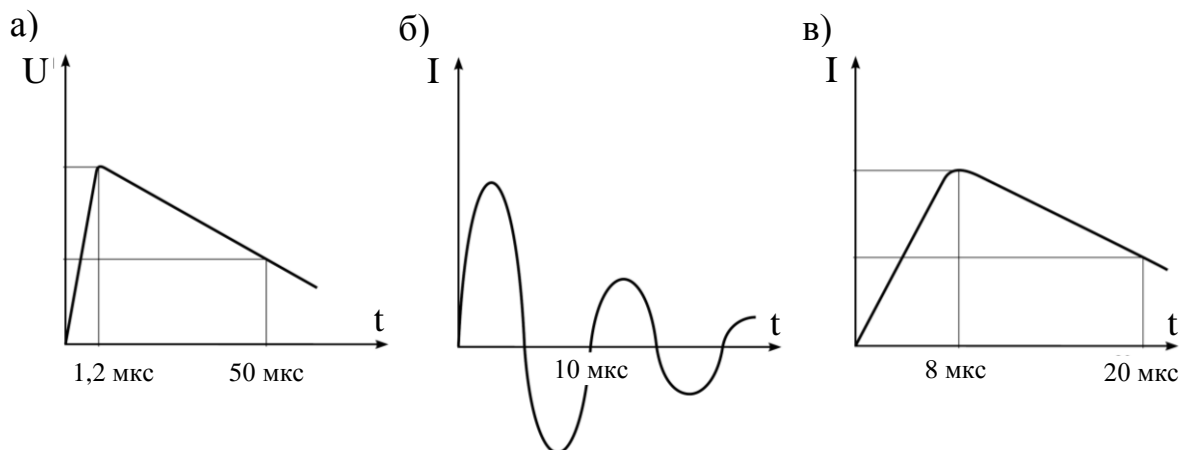


Рис. 38 Стандартные волны напряжения и тока, характерные для грозового разряда

В номенклатуре изделий УЗО серии Multi 9, кроме УЗО мгновенного действия (рис. 39, а, б), предусмотрены устройства УЗО, устойчивые к указанным выше паразитным токам; это УЗО типа «S» с током отключения ($I_{dn} \geq 100 \text{ мА}$). Кроме того, в изделия данной серии входят устройства с высокой чувствительностью и повышенной стойкостью; это УЗО типа «Si» (рис. 39, в) с током отключения ($I_{dn} \leq 30 \text{ мА}$) марки Merlin Gerin.

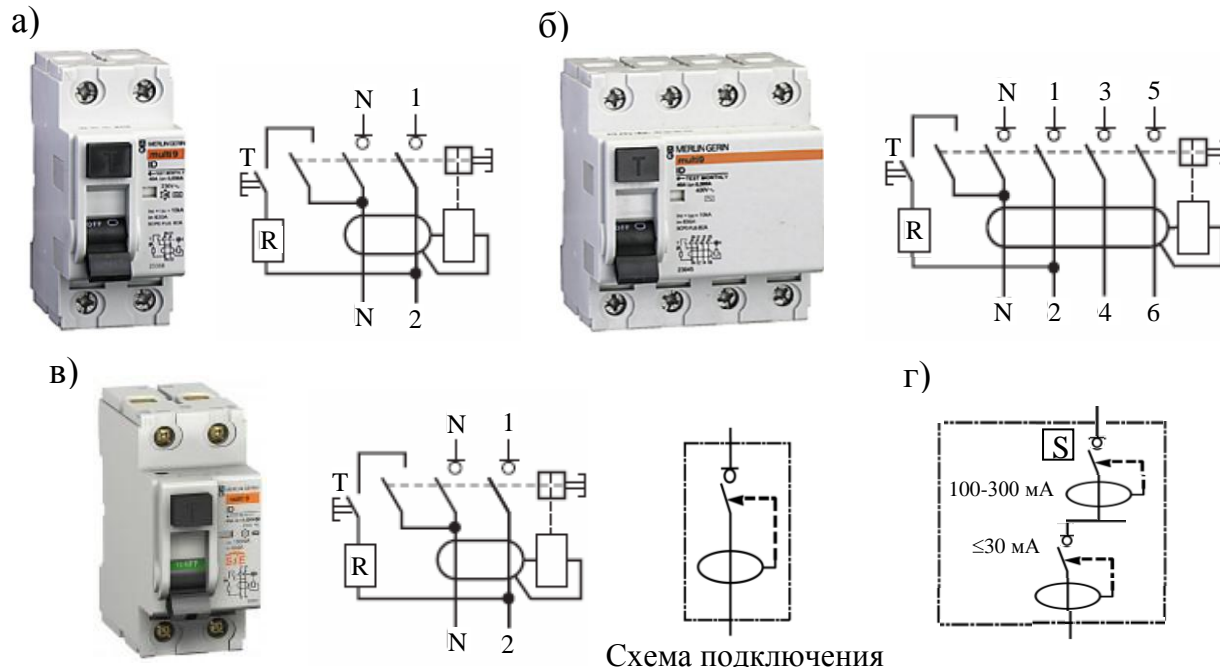


Рис. 39 УЗО серии Multi 9 марки Merlin Gerin: а – двухполюсное типа ID; б – четырехполюсное типа ID; в – двухполюсное типа Si; г – схема подключения селективного УЗО типа S.

Необходимо отметить, что УЗО типа «S» позволяет выполнить селективную цепь с отходящими линиями с дифференциальными выключателями нагрузки на 10 и 30 мА (рис. 39, г).

Применение в сети УЗО типа «S» и «Si» позволяет обеспечить ее устойчивость к воздействию на цепи защиты: токов утечки частотой 50-60 Гц (микрокомпьютеры и другие электронные устройства); переходных токов утечки (подключение цепи с емкостным небалансом); высокочастотных токов утечки (тиристорные выпрямители с фильтрами, имеющими конденсаторы); токов, возникающих в результате грозового разряда. В результате применения данных типов УЗО, минимизируется число случаев ложных срабатываний защищаемых участков сети.

В зависимости от назначения и условий применения УЗО серии Multi 9 комплектуются различного типа вспомогательными электрическими устройствами. Вспомогательные электрические устройства позволяют осуществлять дистанционное отключение и сигнализацию состояния УЗО. Они монтируются с левой стороны от УЗО (рис. 40).



Рис. 40 Вспомогательные электрические устройства для УЗО серии Multi 9

УЗО со встроенной максимальной токовой защитой являются комбинацией двух защитных устройств – УЗО и автоматического выключателя (АВ). Обозначения таких устройств, используемые в зарубежной литературе – RSBO (английское обозначение), FI/LS или DI/LS (немецкое обозначение).

Встроенная максимальная токовая защита осуществляет защиту от сверхтоков как контактов УЗО, так и электрической цепи. Механизм отключения встроенного АВ, обеспечивающего защиту от сверхтоков, используется так же для отключений, производимых УЗО. Технические данные УЗО представляют собой комбинацию параметров УЗО (номинальный отключающий дифференциальный ток и другие) и АВ (номинальный ток, отключающая способность и т. д.). Характеристики отключения встроенного защитного АВ и УЗО ($I_{dn} = 30 \text{ мА}$) представлены на рис. 41.

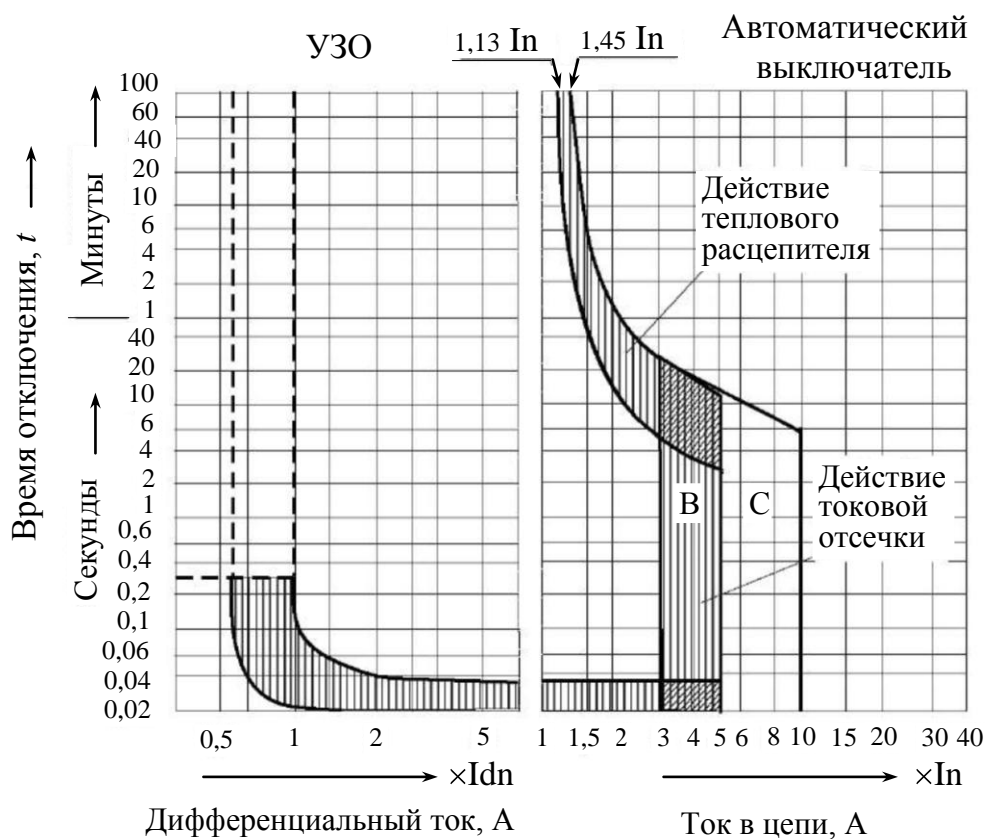


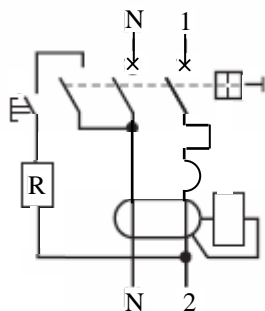
Рис. 41 Время токовые характеристики УЗО ($I_{dn} = 30 \text{ мА}$) со встроенным автоматическим выключателем

7.3 АВТОМАТИЧЕСКИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ-МОНОБЛОК DPN N VIGI СЕРИИ MULTI 9

Автоматический, дифференциальный выключатель-моноблок DPN N Vigi серии Multi 9 (рис. 42) является комбинацией двух защитных устройств УЗО и АВ позволяет реализовать:

- комплексную защиту цепей от коротких замыканий, перегрузок и повреждений изоляции;

- защиту людей от поражения электрическим током при прямых (30 мА) контактах с токопроводящими частями;
- защиту электроустановки от риска возникновения пожара;
- селективность защит при каскадном соединении аппаратов на токи утечки 30 мА и 300 мА.



Характеристики

- количество полюсов: 1+N;
- номинальный ток : 6÷30 А при 30°С;
- номинальное напряжение: ~ 230 В;
- ток отключения: 6000 А;
- мгновенное замыкание;
- кривая отключения: С и В.

Рис. 42 Дифференциальный автоматический выключатель DPN N Vigi ток утечки 30 мА мгновенного действия

В Европейском экономическом сообществе в соответствии с европейским стандартом EN 61008-1 на дифференциальные выключатели нагрузки применительно к нормативным документам и технической литературе общеприняты следующие сокращения: ID – Франция, RCCD's – Англия.

На территории РФ определения, технические требования и методы испытаний на аналогичного рода устройства общего типа содержатся в ГОСТ Р 51326.1-99 (МЭК 61008-1-96). В настоящем стандарте принято сокращенное обозначение АВ, управляемых дифференциальным током бытового и аналогичного назначения без встроенной защиты от сверхтоков – ВДТ.

ВДТ предназначены для защиты людей при косвенном контакте с открытыми проводящими частями электроустановок, соединенными с соответствующим заземляющим устройством электроустановок зданий, и аналогичного применения. Они могут быть использованы для обеспечения защиты от пожаров, возникающих вследствие длительного протекания тока повреждения.

ВДТ, имеющий номинальный отключающий дифференциальный ток не более 30 мА, могут быть также использованы в качестве средства дополнительной защиты в случае отказа защитных устройств, предназначенных для защиты от поражения электрическим током.

Стандарт распространяется на ВДТ с номинальными напряжениями, не превышающими 440 В переменного тока, и номинальными токами, не превышающими 125 А, выполняющие одновременно функцию обнаружения дифференциального тока, сравнения его со значением дифференциального тока срабатывания и отключения защищаемой цепи в случае, когда дифференциальный ток превосходит это значение.

В отличие от ВДТ, управляемый дифференциальным током АВ, предназначенный для выполнения функций защиты от сверхтоков, определен в 3.3.3. ГОСТ Р 51326.1-99 как автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтоков (АВДТ).

Отечественной промышленностью под торговой маркой ИЭК (ИЭК–производитель ИНТЕРЭЛЕКТРОКОМПЛЕКТ) выпускаются: выключатели дифференциальные ВД1-63; дифференциальные автоматы АД12, АД14, АД12М; автоматические выключатели дифференциального тока серии АВДТ-32.

7.4 ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ВД1-63



Рис. 43

Выключатель дифференциальный ВД1-63 (рис. 43) – предназначен для защиты человека от поражения электрическим током при случайном непреднамеренном прикосновении к токоведущим частям электроустановок при повреждениях изоляции (уставка – 10 мА, 30 мА, 100 мА). Единственная защита от поражения электрическим током при прямом однофазном прикосновении к токоведущим частям электроустановки. ВД1-63 с уставкой срабатывания 300 мА и 500 мА предназначены для предотвращения возгорания и пожаров вследствие протекания токов утечки на землю.

При использовании ВД1-63 необходимо последовательно с ним включать автоматический выключатель ВА 47-29 или ВА 47-100 (аналогичного или меньшего номинала), так как функционально ВД1-63 не предусматривает защиты от сверхтока короткого замыкания и перегрузки.

Преимущества:

- электромеханическая схема без электронных компонентов;
- наиболее надёжная защита человека при прямом прикосновении к токоведущим частям;

- независимый индикатор положения контактов;
- не имеет собственного потребления электроэнергии и сохраняет работоспособность при обрыве нулевого проводника;
- модульное исполнение экономит пространство в распределительном щите и значительно облегчает процедуру монтажа;
- тестирующая цепь сохраняет работоспособность в широком диапазоне напряжений от 110 до 265 В (двухполюсный), от 200 до 460 В (четырёхполюсный);
- насечки на контактных зажимах снижают тепловые потери и увеличивают механическую устойчивость соединения;
- высокая механическая износостойкость;
- варианты исполнения на восемь номинальных токов;
- широкий диапазон рабочих температур от -25°C до +50°C.

В табл. 15 приведены технические характеристики ВД1-63.

Таблица 15

Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51326.1-99, ТУ 3421-033-18461115-02
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400
Номинальный ток I_n , А	16, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100
Номинальный отключающий дифференциальный ток I_{Dn} , мА	10, 30, 100, 300, 500
Номинальный условный дифференциальный ток короткого замыкания I_{Dc} , А	3000
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤ 40
Число полюсов	2, 4
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Электрическая износостойкость, циклов В-О, не менее	4000
Механическая износостойкость, циклов В-О, не менее	10000
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм ²	35

7.5 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ АВТОМАТ АД-12/14



Рис. 44

Дифференциальный автомат АД-12/14 – быстродействующий защитный выключатель (рис. 44). Благодаря высокому быстродействию, дифференциальные автоматы с уставкой срабатывания 10 мА и 30 мА обеспечивают эффективную защиту человека от поражения электрическим током в случае его прикосновения к токоведущим частям или к элементам электрооборудования, оказавшегося под напряжением в результате повреждения изоляции токоведущих частей.

Кроме того, АД-12/14 обеспечивают эффективную защиту электрооборудования от сверхтока (короткого замыкания и перегрузки), а в ряде исполнений АД-12 и АД-14 предусмотрена защита от импульсных перенапряжений в сети.

Конструкция АД-12/14 представляет собой соединение двух функциональных узлов: электронный модуль дифференциальной защиты и автоматический выключатель. Электронный модуль состоит из дифференциального трансформатора тока, электронного усилителя с пороговым устройством, исполнительного электромагнита сброса и источника питания.

При установке рукоятки управления автоматического выключателя в положение "ВКЛ" на электронный модуль поступает напряжение питания. В нормальном режиме работы, ток во вторичной обмотке дифференциального трансформатора равен нулю.

При прикосновении человека к открытым токопроводящим частям или к корпусу электроприемника, на который произошел пробой изоляции, по фазному проводнику, кроме тока нагрузки, протекает дополнительный ток – ток утечки, являющийся для трансформатора тока дифференциальным (разностным).

Если этот ток превышает значение уставки порогового устройства, последнее подает ток от источника питания на катушку электромагнита сброса, который сдергивает защелку механизма независимого расцепления АВ и электрическая цепь размыкается.

При этом кнопка "Возврат" выступает из лицевой панели.

Для повторного включения необходимо нажать эту кнопку до фиксации и взвести рукоятку АВ.

Для осуществления периодического контроля исправности АД-12/14 в электронный модуль встроена цепь тестирования. При нажатии кнопки "Тест" искусственно создается отключающий дифференциальный ток. Немедленное срабатывание АД означает исправность всех его элементов.

Монтаж АД-12/14 производят на 35 мм монтажную DIN-рейку.

Преимущества:

- четыре вида защит: от перегрузки, короткого замыкания, дифференциального тока и импульсных (грозовых перенапряжений);
- улучшенная конструкция электронного модуля;
- высокое быстродействие;
- индикация срабатывания от дифференциального тока;
- свыше 40 типоразмеров;
- широкий диапазон рабочих температур от -25°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Особенности конструкции:



– наплавка из серебросодержащего композита повышает износостойкость контактной группы и снижает переходное сопротивление.



– тест для проверки работоспособности устройства и правильности подключения.



– кнопка ВОЗВРАТ для индикации срабатывания от дифференциального тока.



– возможность простой самостоятельной установки контактов состояния КС47 и КСВ47.



– увеличенный размер головки винта с универсальным шлицом (+ , -) облегчает монтаж и предотвращает выпадение винтов при установке.

В табл. 16 приведены технические характеристики АД-12/14.

Таблица 16

Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51327.1-99, ТУ 99 АГИЕ.641243.039
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400
Номинальный ток I_n , А	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63
Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta n}$, мА	10, 30, 100, 300
Номинальная отключающая способность, А	4500
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤ 40
Число полюсов	2, 4
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10000
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм ²	вход – 25; выход – 16/25*

* Размер для устройств с номинальными токами свыше 40А.

7.6 АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТОКА АВДТ-32

Автоматические выключатели дифференциального тока АВДТ-32 (рис. 45) предназначены для защиты человека от поражения электрическим током при повреждении изоляции электроустановок, для предотвращения пожаров вследствие протекания токов утечки на землю и для защиты от перегрузки и короткого замыкания. Рекомендуются для защиты групповых линий, питающих розетки наружной установки, розеток и освещения подвалов и гаражей.



Рис. 45

Преимущества:

- комбинированная схема с электронным модулем дифференциальной защиты и встроенным выключателем серии ВА47-29;
- наиболее надёжная защита человека при прямом прикосновении к токоведущим частям;
- независимый индикатор положения контактов;
- широкий диапазон рабочих температур от -25°C до $+50^{\circ}\text{C}$;
- насечки на контактных зажимах снижают тепловые потери и увеличивают механическую устойчивость соединения;
- наличие кнопки "Тест" для проверки работоспособности устройства и правильности подключения;
- габариты АВДТ соответствуют 2- модульному исполнению за счёт размещения элементов конструкции.

Особенности конструкции:



Индикатор состояния главной цепи предоставляет точную информацию о состоянии контактов независимо от положения рукоятки.



Комбинированная схема с электронным модулем дифференциальной защиты, варистором класса D и встроенным выключателем серии ВА47-29 обеспечивает 4 вида защиты: от дифференциального тока (тока утечки); от короткого замыкания; от перегрузки; от импульсных (грозовых перенапряжений).



Наплавка из серебросодержащего композита повышает износостойкость контактной группы и снижает переходное сопротивление.



Тест для проверки работоспособности устройства и правильности подключения.

В табл. 17 приведены технические характеристики АВДТ-32.

Таблица 17

Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51327.1-99, ТУ 99 АГИЕ.641243.039
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230
Номинальный ток I_n , А	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63
Характеристики срабатывания электромагнитного расцепителя	В, С
Число полюсов	1+N
Номинальный отключающий дифференциальный ток I_{Dn} , мА	10, 30, 100
Номинальная отключающая способность, А	6000
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤ 40
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10000
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Мощность рассеивания, Вт не более	6,5
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм ²	вход – 25; выход – 16/25*

* Размер для устройств с номинальными токами свыше 40А.

Некоторые виды УЗО отечественных производителей и их параметры представлены в табл. 18.

Таблица 18

Параметры	Тип устройства защитного отключения			
	УЗО-22	ВАД-11	Д-АС	Астро* УЗО
Номинальное напряжение, В	220		220/380	
Частота, Гц	50	50; 60	50	50
Номинальный ток нагрузки, А	6,3; 10; 16; 25; 32; 40	6; 40	6; 10; 16; 25; 32	16; 25; 40; 63
Номинальное значение дифференциального отключающего тока, мА	10; 30	10; 30; 100	10, 30, 100, 300	

Максимальное время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	40	10	40	30
Рабочая температура, °С	От –10 до +40	От –5 до +40	От –5 до +40	От –20 до +45
Зависимость от колебаний напряжения сети	Не зависит			
Потребность в источнике питания	Требуется		Не требуется	
Тип расцепителя	Электронно-магнитный		Электромеханический	

* Для 4-х полюсных УЗО.

7.7 ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ УЗО

Рекомендуется ежемесячно проверять работоспособность УЗО. Наиболее простой способ проверки – нажатие кнопки «тест». Если УЗО исправно и подключено к электрической сети, то оно при нажатии кнопки «тест» должно сразу же сработать (то есть отключить нагрузку). Если после нажатия кнопки нагрузка осталась под напряжением, то УЗО неисправно и должно быть заменено.

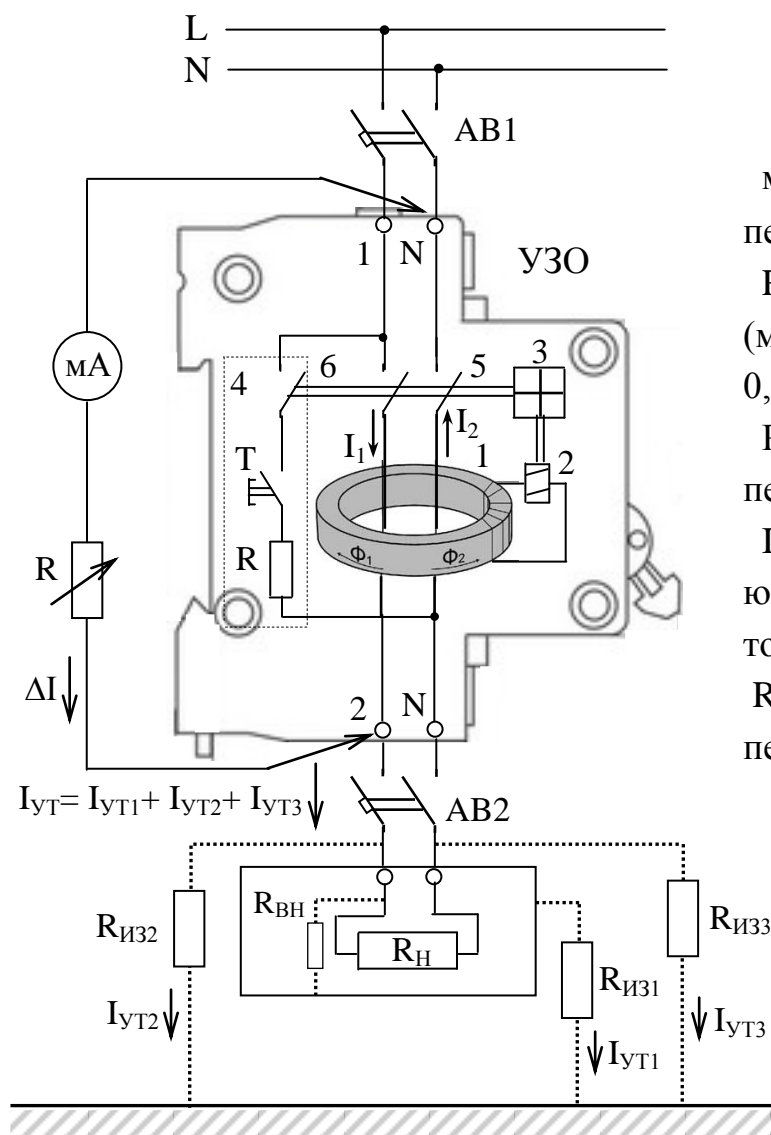
Тест нажатием кнопки не является полной проверкой УЗО. Оно может срабатывать от кнопки, но не пройти полный лабораторный тест, включающий измерение отключающего дифференциального тока и времени срабатывания. Поэтому более надежной проверкой является имитация утечки непосредственно в цепи, которая является нагрузкой УЗО.

С этой целью, для проведения проверки, как правило, применяют тестовые схемы (рис. 46) или специализированные приборы.

Определение порога срабатывания (дифференциального отключающего тока I_{dn}) УЗО:

1. Отключить от установленного в электроустановке УЗО цепь нагрузки R_H с помощью двухполюсного автоматического выключателя АВ2 (рис. 16). В том случае, если в электроустановке применен однополюсный автоматический выключатель, при выполнении данного измерения для

достижения необходимой точности необходимо отсоединить и нулевой рабочий проводник [9].



мА – миллиамперметр переменного тока (0÷300 мА).

R – переменный резистор (магазин сопротивлений) от 0,75 до 43 кОм.

$P = I_{дн}^2 \cdot R_{МАХ}$ – мощность переменного резистора;

$I_{дн}$ – номинальный отключающий дифференциальный ток испытуемого УЗО;

$R_{МАХ}$ – максимальное значение переменного резистора.

Рис. 46 Схема измерения

2. С помощью гибких проводников подключить к указанным на схеме клеммам (2, N) УЗО измерительную цепь с переменным резистором R и миллиамперметром – мА. Переменный резистор первоначально должен находиться в положении максимального сопротивления.

3. Плавно снижать сопротивление резистора.

4. Зафиксировать показание миллиамперметра в момент срабатывания УЗО.

5. Зафиксированное значение тока является отключающим дифференциальным током I_d данного экземпляра УЗО, которое согласно требованиям стандартов должно находиться в диапазоне $0,5 I_{дн} \div 1 I_{дн}$.

В том случае, если значение I_d выходит за границы данного диапазона, УЗО подлежит замене.

УЗО должно соответствовать требованиям подключения. Особое внимание следует обращать при использовании проводов и кабелей с алюминиевыми жилами (многие импортные УЗО допускают подключение только медных проводов).

При установке УЗО последовательно должны выполняться требования селективности. При двух- и многоступенчатой схемах УЗО, расположенное ближе к источнику питания, должно иметь уставку и время срабатывания не менее чем в три раза большую, чем у УЗО, расположенную ближе к потребителю. В зоне действия УЗО нулевой рабочий проводник не должен иметь соединений с заземленными элементами и нулевым защитным проводником.

Чтобы безопасность была гарантированной даже при значительной величине тока, установлены нормы по времени срабатывания УЗО: оно не должно превышать 0,3 секунды; обычно оно меньше 0,1 секунды.

Схему подключения УЗО поясняет рис. 47. В качестве УЗО здесь используется дифференциальный автоматический выключатель, установленный на входе линии питания. Для нормального функционирования УЗО необходимо обеспечить формирование дифференциального тока при возникновении утечки тока на землю.

Дифференциальный ток появится только в случае утечки через заземленный проводник, не подключенный к УЗО. Поскольку нейтраль N проходит через УЗО, необходимо до места подключения УЗО разделить проводник PEN на проводники N и PE (точка 1 на рис. 47). При этом проводник PE должен быть подключен к электрооборудованию непосредственно. Не допускается его размыкание или исполнение в виде временного проводника.

В свою очередь, использование системы TN-C-S подразумевает заземление металлических корпусов электрооборудования и подключение розеток трехпроводными проводами. Схема, поясняющая подключение УЗО для двухпроводной сети, показана на рис. 48. УЗО в этом случае должно осуществлять защиту максимального числа линий и оборудования.

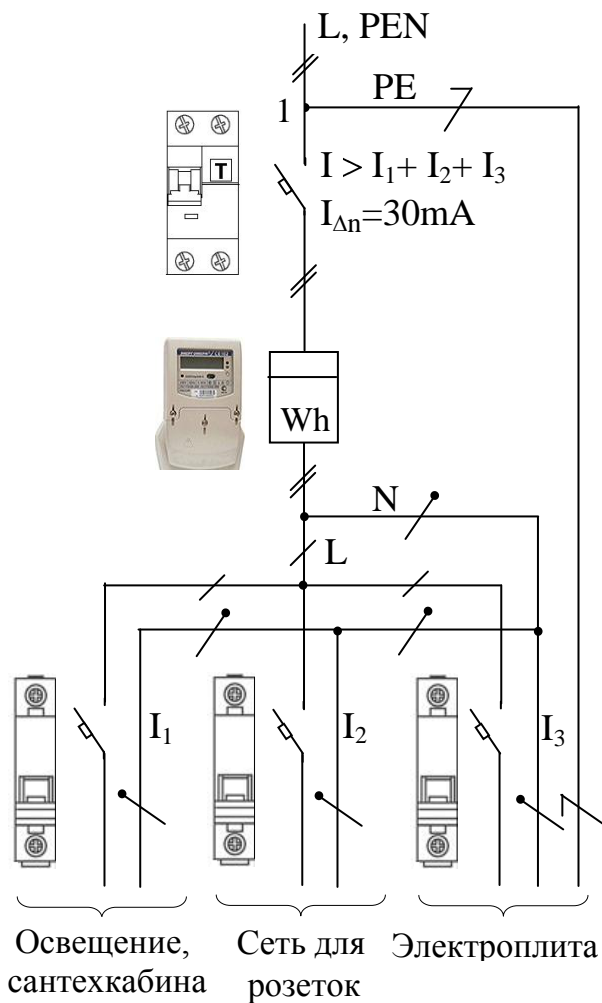


Рис. 47 Схема электроснабжения в двухпроводной сети при отсутствии защитного проводника PE в розеточной цепи и цепи освещения.

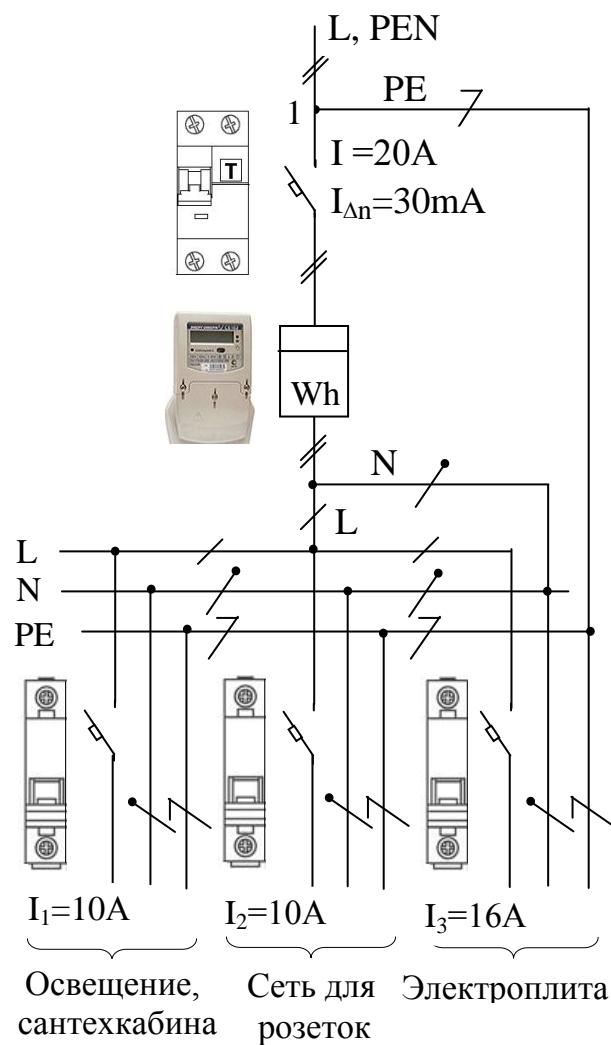


Рис. 48 Схема электроснабжения в двухпроводной сети с системой заземления TN-C-S.

На рис. 49 и рис. 50 приведены примеры схем электроснабжения квартир повышенной комфортности.

В схеме, приведенной на рис. 49, на вводной линии установлен дифференциальный автоматический выключатель с током срабатывания 300 мА.

Этот дифференциальный автомат обеспечивает защиту электропроводки и оборудования при возникновении утечки на корпус, а также повышает пожарную безопасность цепи электропитания квартиры. Кроме того, он обеспечивает некоторую задержку отключения. Из двухпроводной линии формируется система TN-C-S. Для непосредственной защиты людей в групповые цепи питания потребителей установлены дополнительные дифференциальные автоматические выключатели. В цепи

питания розеток и стационарного электрооборудования включены устройства с дифференциальным током срабатывания 30 мА, а для помещений с повышенной опасностью используется более чувствительное устройство с током срабатывания 10 мА.

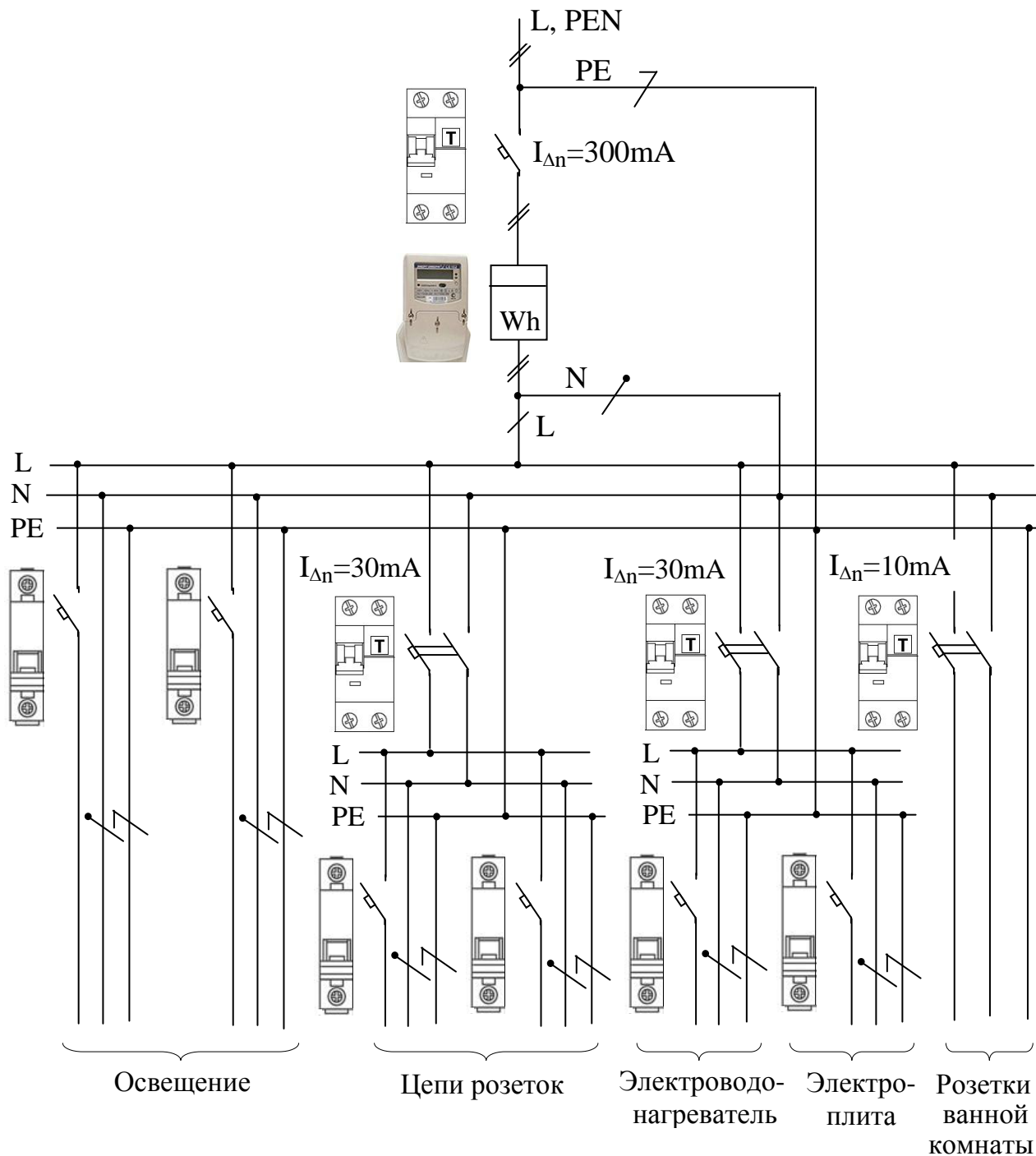


Рис. 49 Схема электроснабжения квартиры повышенной комфортности (вариант 1)

На рис. 50 приведена схема электроснабжения квартиры повышенной комфортности с трехфазным вводом.

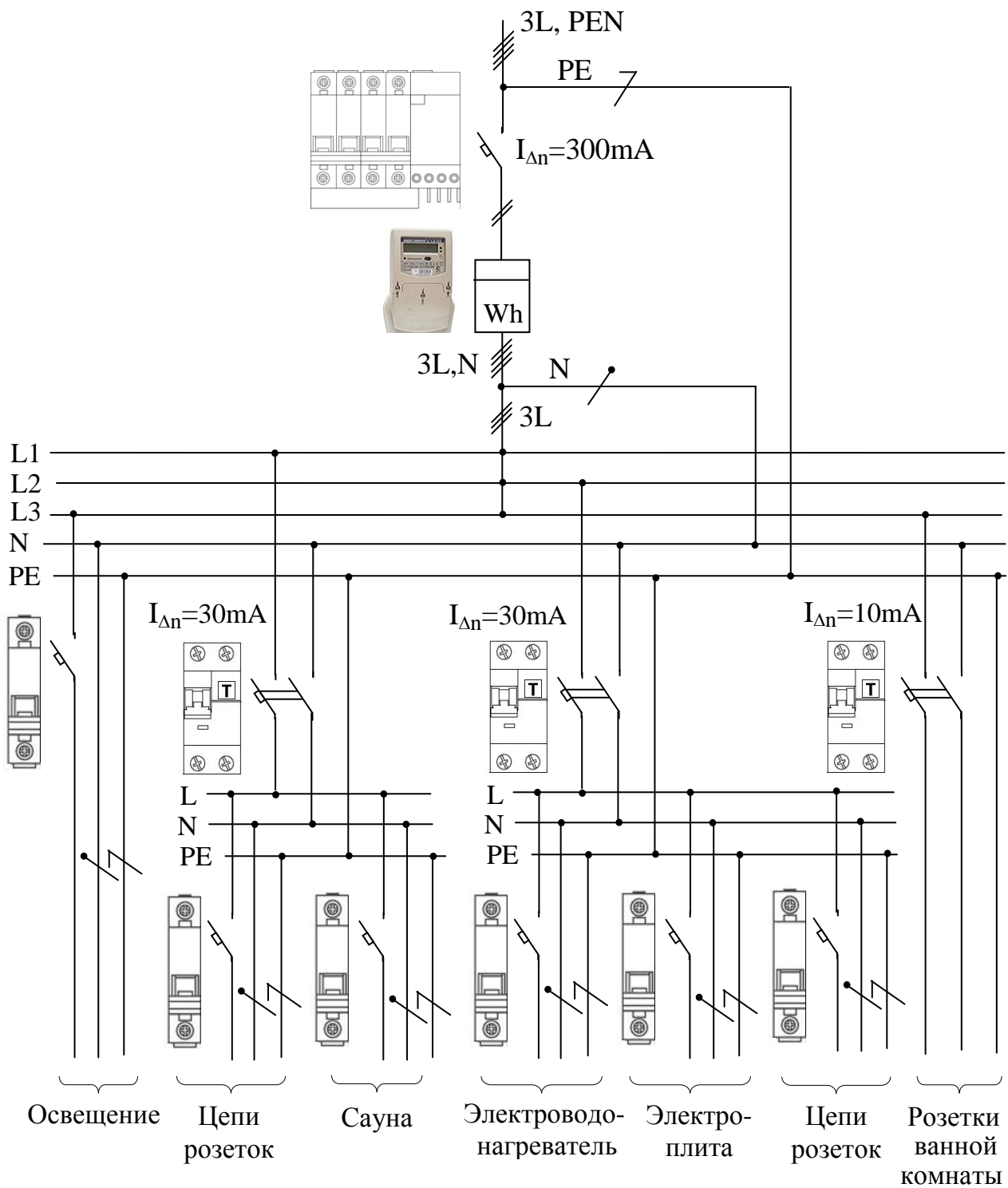


Рис. 50 Схема электроснабжения квартиры повышенной комфортности (вариант 2)

На вводе установлен четырехполюсный дифференциальный автоматический выключатель с током отключения 300 мА и временной задержкой отключения. Для учета расхода электроэнергии используется трехфазный электросчетчик. Потребители электроэнергии подключаются ко всем трем фазам с учетом оптимальной нагрузки на все линии.

Применительно к схемам электроснабжения, изображенным на рис. 49 и рис. 50, действуют общие для таких случаев правила: при объединении групповых линий для защиты одним УЗО следует учитывать возможность их одновременного отключения; кроме того, в многоступенчатых схемах необходимо выполнять условия селективности, то есть функции отключения с задержкой.

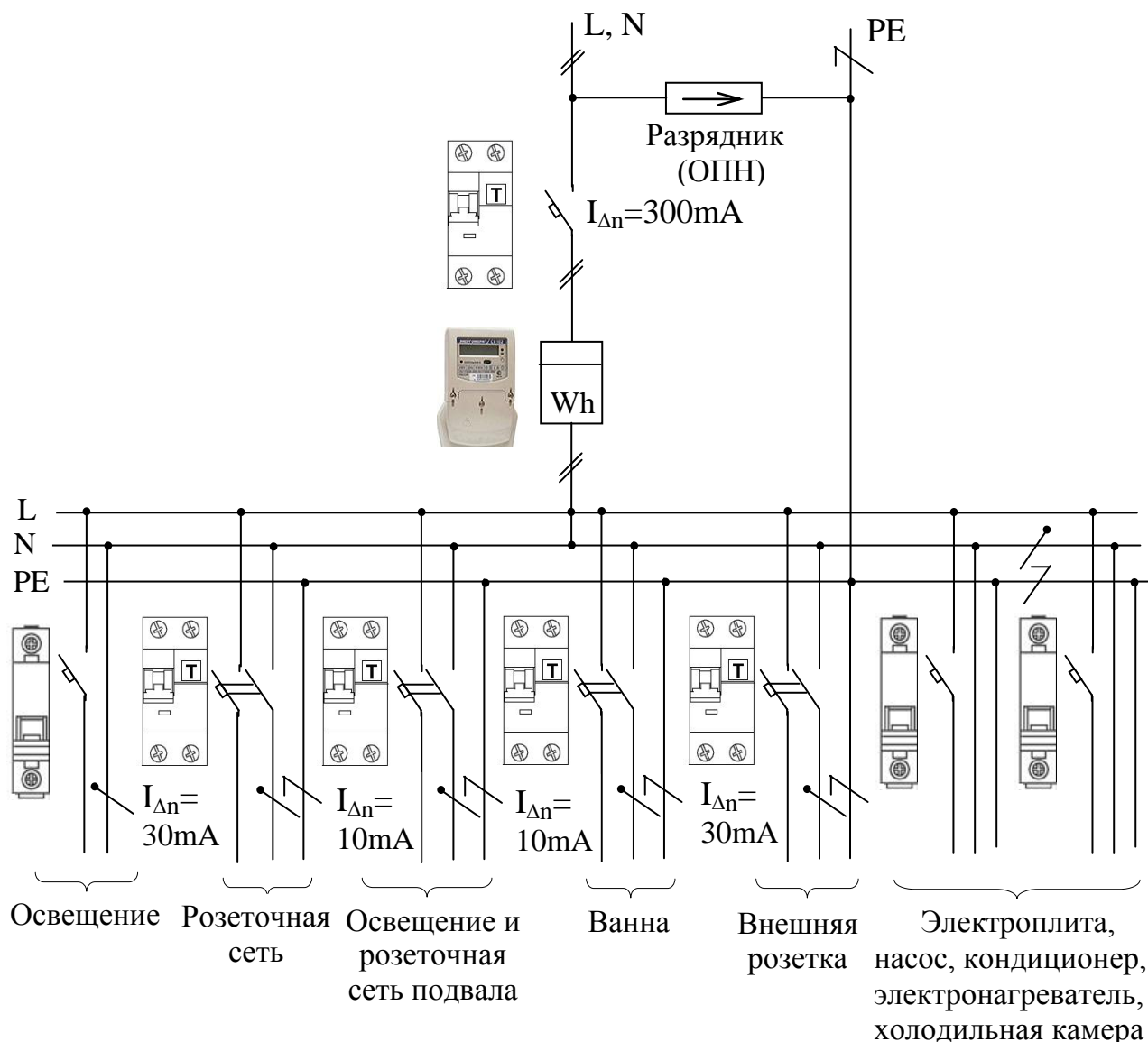


Рис. 51 Схема электроснабжения коттеджа с системой заземления TN-C-S

На современных объектах индивидуального строительства (коттеджи, дачные, садовые дома и т. д.) требуется применение повышенных мер электробезопасности. Это связано с высокой энергонасыщенностью, разветвленностью электрических сетей и спецификой эксплуатации как самих объектов, так и электрооборудования. При выборе схемы электроснабжения типа УЗО и распределительных щитков следует обратить

внимание на необходимость использования ограничителей перенапряжений (грозовых разрядников), которые следует устанавливать до УЗО (рис. 51).

В индивидуальных домах рекомендуется использовать УЗО с номинальным током, не превышающим 30 мА, – для групповых линий, питающих ванные комнаты, душевые и сауны, а также штепсельные розетки (внутри дома, в подвалах, встроенных и пристроенных гаражах). Для линий, обеспечивающих наружную установку штепсельных розеток, применение УЗО с номинальным током, не превышающим 30 мА, обязательно.

8. ТРЕБОВАНИЯ ПУЭ К ВЕЛИЧИНАМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Величина сопротивления заземления нормируется для точки подсоединения заземляющего проводника к корпусу электроустановки. В соответствии с определениями [1], заземляющим устройством называется совокупность заземлителя и заземляющих проводников, а заземлитель – это проводник (электрод) или совокупность металлически соединенных между собой проводников (электродов), находящихся в соприкосновении с землей. Заземляющим проводником называется проводник, соединяющий заземляемые части оборудования с заземлителем.

Из приведенных определений следует, что сопротивление главного заземлителя $R_{\text{гл.зав}}$ (см. рис. 11) является разностью между нормируемым сопротивлением заземления в точке подсоединения заземляющего проводника к корпусу электроустановки и сопротивлением заземляющего проводника, т.е.

$$R_{\text{гл.зав}} = R_{\text{норм}} - R_{\text{пр}}. \quad (144)$$

Следует иметь в виду, что сопротивление растеканию тока главного заземлителя не нормируется, а вычисляется по (144).

Главный заземлитель может в свою очередь состоять из искусственного и естественного заземлителей, которые соединены между собой параллельно. Искусственным заземлителем называется заземлитель, специально выполняемый для целей заземления. Естественным заземлителем называются находящиеся в соприкосновении с землей электропроводящие части подземных коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления.

При известном (измеренном) сопротивлении естественного заземлителя R_e величина искусственного заземлителя $R_{и}$ определяется по выражению:

$$R_{и} = (R_{г\text{л.з\text{аз}}} \cdot R_e) / (R_e - R_{г\text{л.з\text{аз}}}). \quad (145)$$

При эксплуатации электрических линий с передвижными электропотребителями часто приходится иметь дело с питающими линиями с отпайками («усами») для попеременного подключения к отпайкам нагрузки при передвижении ее вдоль фронта работ. Такие сети нашли широкое применение на горных предприятиях (карьеры, разрезы), при разработке нефтяных промыслов и при питании других передвижных электропотребителей. В этих случаях электроустановки должны заземляться в любой точке по длине линии. Однако при большой длине требуется большое сечение заземляющего проводника, что в большинстве случаев экономически нецелесообразно. Тогда проблема решается применением выносного дополнительного заземлителя $R_{доп}$, величина которого будет найдена по ниже приведенным выражениям в условных обозначениях совпадающих со схемой рис. 52.

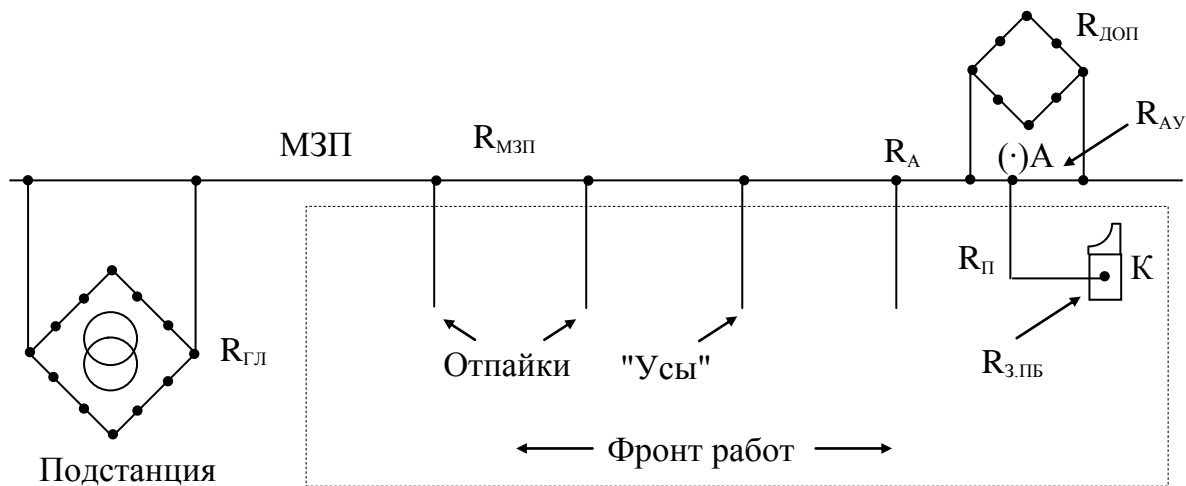


Рис. 52 Схема заземления передвижного электропотребителя

Сопротивление растеканию тока главного заземлителя подстанции $R_{г\text{л.}}$ от точки «А» с учетом сопротивления магистрального заземляющего проводника $R_{мзп}$ определится:

$$R_A = R_{г\text{л.}} + R_{мзп}.$$

Сопротивление R_A можно рассчитать или измерить в точке «А».

Сопротивление растеканию тока в точке «А» для заземляемой электроустановки «К» должно быть

$$R_{AY} = R_{з.пб} - R_{п},$$

где $R_{з.пб}$ – сопротивление заземления электроустановки, регламентируемое [1]; $R_{п}$ – сопротивление заземляющего проводника от электроустановки до точки «А».

Это сопротивление (R_{AY}) должно обеспечиваться сопротивлением растеканию тока главного заземлителя ($R_{гл.}$) в точке «А» R_A и сопротивлением главного дополнительного заземлителя $R_{доп.}$, т.е. можно записать, что

$$\frac{1}{R_{ay}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_{доп.}}$$

Отсюда следует:

$$R_{доп.} = \frac{R_{ay} \cdot R_a}{R_a - R_{ay}}$$

По величине $R_{доп.}$ определяют количество электродов для сооружения главного дополнительного заземлителя.

Количество электродов заземлителя можно определить по выражению:

$$n = \frac{R_{од.ст.} \cdot K_c}{R_{доп.} \cdot \eta}, \text{ шт.}$$

где $R_{од.ст.}$ – сопротивление растеканию тока одиночного вертикального стержневого электрода, Ом; K_c – коэффициент сезонности, зависит от сезонного изменения удельного сопротивления земли, принимается по справочным данным; $R_{доп.}$ – сопротивление растеканию тока любого заземлителя, в данном случае – главного дополнительного, Ом; η – коэффициент экранирования (или использования) электродов, теоретически изменяется в пределах $\eta = 0 \div 1$, принимается по справочным данным.

Сопротивление растеканию тока вертикального углубленного электрода определяют по известному выражению

$$R_{од.ст.} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right), \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м; l – длина активной части электрода (длина, соприкасающаяся с землей), обычно при углубленном электроде длина активной части равна строительной длине электрода, м; d – диаметр электрода, м (для стержня из стали уголкового профиля с

шириной полки b равен $d = 0,95 \cdot b$); t – глубина заложения вертикального электрода, м; это расстояние от поверхности земли до середины электрода, т.е. $t = h + 1/2$ (h – расстояние от поверхности земли до верхней кромки электрода, причем h должно быть $\geq 0,5$ м).

Сопротивление растеканию тока горизонтального протяженного электрода (шины) определяется по выражению:

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi \cdot l_{\pi}} \ln \frac{l_{\pi}^2}{d t_{\pi}}, \text{ Ом,}$$

где l_{π} – длина горизонтального электрода (полосы), м; $d = 0,5 \cdot b_1$, здесь b_1 ширина полосы, м; t_{π} – глубина заложения полосы, м;

Расчеты заземляющих устройств излагаются в технической литературе, в частности, в электротехнических справочниках, а также в учебниках для вузов, см. также [20].

В соответствии с требованиями действующих отраслевых стандартов [1] все электроустановки по величинам сопротивления заземления можно условно разделить на три группы.

I группа. Электроустановки сетей с эффективно заземленной нейтралью напряжением 110, 150, 220, 330, 400, 500, 750 кВ. Это сети трехфазные трехпроводные с заземлением нейтрали через разъединитель. В таких сетях в зависимости от величины тока замыкания на землю (по расчетам релейной защиты) нейтраль трансформатора может быть заземлена или раззаземлена с помощью разъединителя. Для таких электроустановок сопротивление заземления должно быть $R_3 \leq 0,5$ Ом.

II группа. Электроустановки этой группы заземляются либо от отдельного заземляющего устройства, либо от совмещенного. Условно такие электроустановки можно разделить на 2 подгруппы А и Б.

Подгруппа А. Раздельный заземлитель. Если заземляющее устройство используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В до 35 кВ включительно (сюда относятся сети напряжением 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20 и 35 кВ, которые эксплуатируются только с изолированной нейтралью во всех отраслях народного хозяйства), то сопротивление заземления электроустановок должно быть $R_3 \leq 250 / I_{\text{озн}}$, но не более 10 Ом. Здесь $I_{\text{озн}}$ – ток однофазного замыкания на землю в электросети данной ступени напряжения. Обычно это отдельностоящие высоковольтные установки напряжением до 35 кВ. Например, корпуса разъединителей на

опорах линии электропередачи, корпуса электроустановок продольной компенсации и т.п.

Подгруппа Б. Если заземляющее устройство используется одновременно (совмещенный заземлитель) для электроустановок напряжением выше 1000 В до 35 кВ включительно и для электроустановок напряжением 1000 В и ниже, то сопротивление заземления должно быть $R_3 \leq 125 / I_{\text{озн}}$ Ом, но не более норм сопротивления заземления для электроустановок напряжением ниже 1000 В.

III группа. Электроустановки напряжением 1000 В и ниже. Электроустановки, эксплуатирующиеся в сетях с изолированной нейтралью напряжением ниже 1000 В, должны иметь сопротивление заземления не более 4 Ом. При мощности питающих сеть генераторов или трансформаторов 100 кВА и меньше заземляющие устройства электроустановок могут иметь сопротивление не более 10 Ом. Если генераторы или трансформаторы работают параллельно и их мощность не превышает 100 кВА, то сопротивление заземления электроустановок в такой сети также должно быть не более 10 Ом. При удельном сопротивлении земли $\rho \geq 500$ Ом·м в сетях с изолированной нейтралью допускается увеличение сопротивления заземления электроустановок в $0,002\rho$ раз, но не более чем в 10 раз.

Электроустановки, эксплуатирующиеся в сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 1000 В и ниже, должны иметь сопротивление заземления:

- при напряжении сети 660 / 380 В – должно быть $R_3 \leq 2$ Ом;
- при напряжении сети 380 / 220 В – $R_3 \leq 4$ Ом;
- при напряжении сети 220 / 127 В – $R_3 \leq 8$ Ом;

В практике эксплуатации электрических сетей большое внимание уделяется повторным заземлителям нулевого провода в сети с глухозаземленной нейтралью.

Повторные заземлители предназначены:

- а) для защиты сетей и оборудования от грозových перенапряжений;
- б) снижения потенциала на нулевом проводнике относительно земли;
- в) для снижения сопротивления нулевого провода при использовании земли в качестве параллельного проводника.

Следует иметь в виду, что снижения сопротивления нулевого провода способствует равномерному распределению фазных напряжений на нагрузке.

Заземляющие проводники для повторных заземлений нулевого провода должны быть выбраны из условия длительного прохождения тока не менее 25А [1] 1.7.63.

Общее сопротивление всех повторных заземлителей должно быть меньше или равно:

- 5 Ом при $U = 660 / 380$ В;
- 10 Ом при $U = 380 / 220$ В;
- 20 Ом при $U = 220 / 127$ В.

Сопротивление растеканию тока отдельного повторного заземлителя, отключенного от сети заземления, должно быть не более

- 15 Ом при $U = 660 / 380$ В;
- 30 Ом при $U = 380 / 220$ В;
- 60 Ом при $U = 220 / 127$ В.

При удельном сопротивлении земли ρ более 100 Ом·м допускается увеличить указанные нормы в $0,01 \cdot \rho$ раз, но не более чем в 10 раз.

В сетях, эксплуатируемых в подземных условиях, сопротивление заземления электроустановок не должно быть более 2 Ом.

9. ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И УРОВНИ ИХ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В практике эксплуатации электрических сетей электроснабжения важное значение имеет контроль уровней напряжений на зажимах электроприемников. Одним из основных показателей качества электрической энергии, на который может воздействовать обслуживающий персонал, является отклонение напряжения [10].

Отклонением напряжения в данной точке сети называется разность между напряжением в этой точке в данный момент времени и номинальным напряжением сети, если величина напряжения изменяется медленно и плавно. Отклонение напряжения имеет место обычно при стационарном режиме работы сети.

Относительная величина отклонения напряжения определяется:

$$\pm \delta U = (U - U_{\text{ном}}) \cdot 100 / U_{\text{ном}}, \%$$

где U – напряжение в данной точке сети, В; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, В.

Колебанием напряжения в данной точке сети называется разность между напряжением в этой точке до и после действия причины резкого изменения напряжения (например, пуск двигателя).

Относительная величина колебания:

$$\pm \delta U' = (U_1 - U_{\text{ном}}) \cdot 100 / U_{\text{ном}}, \%$$

где U_1 – напряжением в данной точке сети при резком изменении, В.

Особенно чувствительны к отклонению и колебанию напряжения электродвигатели и осветительная нагрузка. Известно, что момент вращения двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения на его зажимах:

$$M_{\phi} / M_{\text{ном}} = U_{\phi}^2 / U_{\text{ном}}^2,$$

где M_{ϕ} и U_{ϕ} – фактические значения момента вращения двигателя и напряжения на его зажимах; $M_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$ – номинальные значения.

Пусть напряжение на зажимах двигателя уменьшилось на 20%, тогда $M_{\phi} = M_{\text{ном}} \cdot (0,8 \cdot U_{\phi} / U_{\text{ном}})^2 = 0,64 M_{\text{ном}}$, т.е. M_{ϕ} уменьшится на 36%.

Также особенно чувствительны к отклонению и колебанию напряжения светильники: при превышении напряжения на 10% от номинального срок службы ламп сокращается на 74%, а при снижении на 5% – световой поток лампы уменьшается на 82,5%.

В условиях нормальной работы приемников электроэнергии отклонения напряжения от номинального значения допускаются в следующих пределах:

- От –5 до + 10% на зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления;
- От –2,5 до +5% на зажимах приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения;
- На зажимах остальных приемников электроэнергии, в том числе приемников электроэнергии животноводческих комплексов и птицефабрик, допускают отклонения напряжения в пределах $\pm 5\%$ номинального;
- Для двигателей и аппаратов в сельской местности – от – 7,5 до + 10% номинального;
- Для остальных приемников $\pm 5\%$;
- Для остальных приемников сельской местности $\pm 7,5\%$.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5%.

Основными причинами отклонений напряжений в системах электроснабжения предприятий являются изменения режимов работы приемников электроэнергии, изменения режимов питающей энергосистемы, значительные индуктивные сопротивления линий 6÷10 кВ. Из всех показателей качества электроэнергии отклонения напряжения вызывают наибольший ущерб.

Границы допустимых отклонений напряжений на зажимах электроприемников в абсолютных величинах оцениваются по минимально допустимым напряжениям для электроприемников и вторичным напряжениям силовых трансформаторов.

При номинальных напряжениях электроприемников $U_{\text{ном}} = 127, 220, 380, 660$ В номинальные вторичные напряжения силовых трансформаторов, в предположении 5% потерь напряжения в трансформаторе, имеют значения:

$$U_{\text{тр.ном}} - 0,05 U_{\text{ном}} = U_{\text{ном}},$$

т.е. $U_{\text{ном}} = 0,95 U_{\text{тр.ном}}$, тогда

$U_{\text{тр.ном}} = U_{\text{ном}} / 0,95$, значения которых приведены в табл.19.

Минимально допустимые напряжения на зажимах двигателей (см. табл.19)

$$U_{\text{min дв.}} = U_{\text{ном}} - 0,05 U_{\text{ном}}.$$

Таким образом, допустимые потери напряжения составляют:

$$\Delta U_{\text{доп}} = U_{\text{тр.ном}} - U_{\text{min дв.}}$$

В тех случаях, когда потери напряжения в сети велики, и не обеспечивается минимально необходимое напряжение на зажимах двигателя, то для увеличения напряжения в сети используют минусовые отпайки трансформатора на первичной обмотке:

$$U_2 = U_1 (W_2 / W_1),$$

где W_2 / W_1 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.

При уменьшении числа витков первичной обмотки на 5% вторичное напряжение увеличится на 5% и составит:

$$U_{\text{тр}}^1 = U_{\text{тр.ном}} + 0,05 U_{\text{ном}}.$$

Очевидно, что допустимые потери напряжения $U_{\text{доп}}^1$ (см. табл.19) увеличатся и составят:

$$\Delta U_{\text{доп}}^1 = U_{\text{тр}}^1 - U_{\text{min}}.$$

Таблица 19

$U_{\text{ном.}}, \text{ В}$	127	220	380	660
$U_{\text{тр.ном.}}, \text{ В}$	133	231	400	695
$U_{\text{min.дв.}}, \text{ В}$	121	209	361	627
$\Delta U_{\text{доп.}}, \text{ В}$	12	22	39	68
$U_{\text{тр.}}^1, \text{ В}$	140	243	420	725
$\Delta U_{\text{доп.}}^1, \text{ В}$	19	34	59	93

Следует иметь в виду, что при использовании минусовых отпаек первичной обмотки силового трансформатора напряжение на низкой стороне может значительно превышать допустимые значения для электроустановок, не удаленных от трансформатора, что приведет к выходу их из строя. В этих случаях используют отдельные трансформаторы или тиристорные регуляторы.

10. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ СХЕМ СЕТЕЙ ТРЕХФАЗНЫХ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ЗАНУЛЕНИЕМ И С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ БЕЗ ЗАНУЛЕНИЯ

В настоящее время электроснабжение подавляющего большинства (80%) низковольтных потребителей (до 1000 В) осуществляется по трехфазной четырехпроводной системе с глухозаземленной нейтралью с занулением корпусов электрооборудования, электрифицированных машин, металлоконструкций с электрическими аппаратами и т.п. Эксплуатация такого режима нейтрали электросетей регламентирована [1], а также рекомендациями Электротехнической Комиссии – ГОСТ Р 50571.2 – 94 (система заземления TN – C, TN – C – S и TN – S).

Трехфазные четырехпроводные сети с изолированной нейтралью без зануления регламентируются лишь для передвижных электроустановок, питающихся от передвижных автономных источников [1].

Основные достоинства эксплуатируемой трехфазной четырехпроводной системы с глухим заземлением нейтрали с занулением заключается в простоте создания селективной защиты от много- и однофазных (однополюсных) коротких замыканий на землю (корпус) и в

возможности получения двух стандартных напряжений (линейного и фазного) без дополнительной трансформации. Наиболее частыми к.з. являются замыкания одной фазы на землю (корпус), таких к.з. в 3÷5 раз больше, чем междуфазных. Для снижения опасности последствий однофазных к.з. требуется быстрое отключение участка с к.з., для чего необходимо обеспечить требуемую [1] кратность (1,5 и 3) тока однополюсного к.з. к току уставки максимально-токовой защиты МТЗ) и току плавкой вставки, а время отключения аварийного участка сети при однополюсном к.з. должно быть таким, чтобы напряжение на корпусе по отношению к земле, возможное напряжение прикосновения, не превосходило допустимое значение.

В теоретических основах электробезопасности (В.И.Королькова, В.Е.Манойлов, М.Р.Найфельд, В.А.Князевский, Л.В.Гладилин, В.И.Щуцкий, А.И.Якобс, П.А.Долин, Н.В.Шипунов, А.Б.Ослон и др.) излагается, что основанием широкого распространения и преимуществом четырехпроводных сетей трехфазного тока с глухим заземлением нейтрали с занулением по сравнению с сетями с изолированной нейтралью является следующее:

1) наличие двух стандартных рабочих напряжений (фазного и линейного), позволяющее без трансформирования применять большее разнообразие силового и осветительного электрооборудования, что удешевляет систему снабжения в целом по сравнению с трехфазной трехпроводной сетью с изолированной нейтралью, за счет уменьшения числа трансформаторов, расхода кабелей, проводов, коммутационной аппаратуры и т.п.;

2) возможность в сравнении с трехпроводной сетью с изолированной нейтралью эксплуатировать сеть с малым сопротивлением изоляции по отношению к земле, а нулевого провода в некоторых случаях вообще без изоляции;

3) в сетях с глухозаземленной нейтралью и занулением обеспечивается высокая безопасность, так, если в сети с изолированной нейтралью уже имеется однофазное замыкание на землю, и человек касается второй фазы, то он оказывается под линейным напряжением, в то время как в сети глухозаземленной нейтралью – под фазным напряжением, т.е. сеть с глухим заземлением нейтрали менее опасна, чем с изолированной нейтралью;

4) трудно, там, где требуется достичь высокого сопротивления изоляции нейтрального провода, так как этот провод имеет большее число присоединений, чем фазный;

5) при замыкании фазы на землю в четырехпроводных сетях с изолированной нейтралью между зануленным оборудованием и землей возникает напряжение, близкое по значению к фазному напряжению сети, и оно будет существовать до отключения сети вручную или до ликвидации замыкания на землю, поэтому [1] регламентируют глухое заземление нейтрали с занулением корпусов электрооборудования.

Все эти и другие обоснования являются в некоторой степени убедительными, если вопрос касается использования четырехпроводной трехфазной системы с одновременно глухим заземлением нейтрали и занулением корпусов электрооборудования и электрифицированных машин. Четырехпроводные трехфазные системы с глухим заземлением нейтрали, именно, без зануления и такие же системы с занулением, но без глухого заземления нейтрали, недопустимы в практике эксплуатации и Правилами устройства электроустановок запрещены [1].

Ниже по тексту изложены обоснования возможности применения четырехпроводной трехфазной системы с изолированной нейтралью без зануления, но с заземлением корпусов, которая (рис. 53) существенно отличается от запрещаемой системы с изолированной нейтралью с занулением корпусов электрооборудования [1].

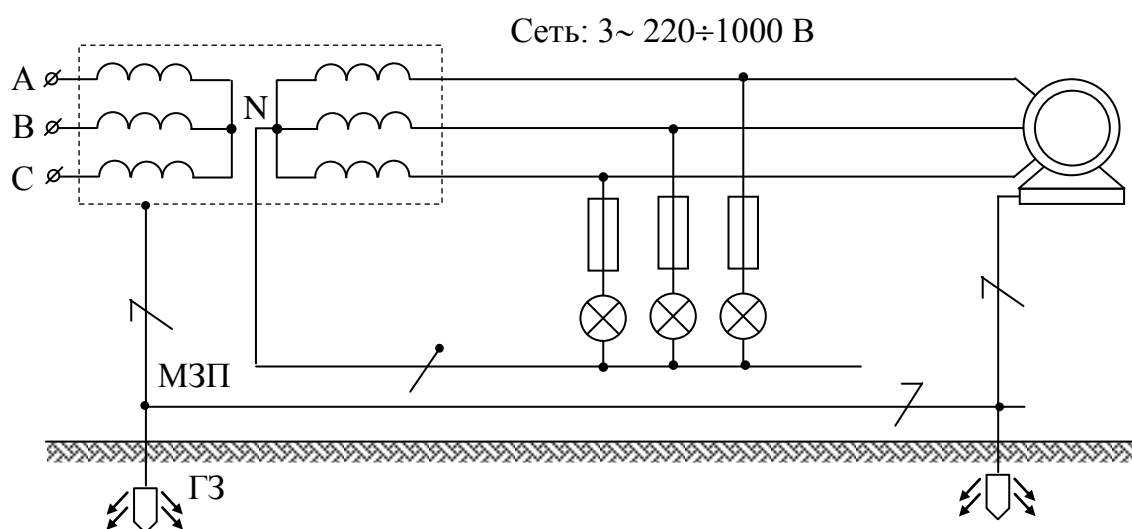


Рис. 53 Трехфазная четырехпроводная сеть с изолированной нейтралью без зануления. МЗП – магистральный заземляющий провод; ГЗ – главный заземлитель.

Хотя проблема выбора режима нейтрали широко освещена в технической литературе, периодической печати, эта проблема обсуждалась также на многих научно-технических конференциях, четырехпроводная система с изолированной нейтралью без зануления корпусов не являлась предметом рассмотрения и обсуждения, а сведения в специальной литературе об этой системе чрезвычайно скудны и практически нет данных сравнительного анализа эксплуатируемых режимов нейтрали с режимом, предлагаемым для рассмотрения.

Рекомендации по применению четырехпроводной трехфазной системы с изолированной нейтралью без зануления, но с заземлением корпусов электрооборудования, излагаются на основе анализа эксплуатации существующих систем, теоретических и экспериментальных исследований сетей горно-промышленных предприятий Восточной Сибири, на зарубежном опыте.

Предлагаемая для эксплуатации система обладает, по нашему мнению, достоинствами четырехпроводной сети с глухим заземлением нейтрали с занулением и трехпроводной трехфазной сети с изолированной нейтралью и свободна от ряда недостатков, присущих применяемым режимам нейтрали.

В сети с глухозаземленной нейтралью с занулением нулевой проводник служит для того, чтобы создать цепь короткого замыкания с малым сопротивлением при однофазном замыкании на корпус, землю и тем самым обеспечить срабатывание максимально-токовой защиты, способной отключить поврежденный участок сети.

Несомненно, в этом случае возникает угроза поражения людей, которые могут прикоснуться к корпусу поврежденного оборудования. Поэтому [1] предписывают присоединение корпусов электрооборудования к нулевому защитному проводнику, за счет которого уменьшается сопротивление цепи короткого замыкания и возрастает ток, вызывающий срабатывание защиты.

Однако положение может быть более опасным при обрыве нулевого провода. Тогда короткое замыкание на корпус повлечет за собой появление высокого напряжения на корпусах всех электроустановок, отделенных обрывом от нейтрали трансформатора, и даже при наличии повторного заземлителя (ПЗ) вблизи этих электроустановок.

Повторный заземлитель уменьшает опасность поражения током, но не может устранить ее полностью. В этой связи серьезным недостатком системы

с глухозаземленной нейтралью является необходимость тщательной прокладки нулевого защитного проводника, порой на большие расстояния к электроустановкам, где и не требуется нулевой проводник, ввиду отсутствия однофазных потребителей. Неоправданные значительные материальные затраты по прокладке нулевого защитного проводника в системе с глухозаземленной нейтралью дают преимущества системе с изолированной нейтралью (см. рис. 53), при которой защитное заземление с меньшими материальными затратами может быть устроено на месте потребления электроэнергии без прокладки провода на большие расстояния, как это имеет место в высоковольтных электросетях напряжением $6\div 35$ кВ, где не прокладывается четвертый провод для заземления. При необходимости питания удаленных однофазных потребителей экономически целесообразней и безопасней разделить сети установить соответствующей мощности понижающий трансформатор. В этом преимущества четырехпроводной сети с изолированной нейтралью перед сетью с глухозаземленной нейтралью бесспорны.

Одним из главных обоснований необходимости глухого заземления нейтрали в четырехпроводной трехфазной сети при занулении корпусов электрооборудования является предотвращение появления напряжения близкого к фазному на всех зануленных корпусах в случае замыкания одной из фаз сети на землю (рис. 54). Такое положение, естественно, недопустимо. В этих случаях снизить опасное напряжение на корпусах позволяет глухое заземление нейтрали, что и предписывается [1]. Исходя из требований [1], следует вывод:

Четырехпроводная трехфазная сеть с нулевым защитным проводником без заземления нейтрали представляет большую опасность поражения людей током и поэтому ее применение запрещено.

Однако необходимо обратить внимание на то, что такую опасность создает именно зануление (присоединение корпусов оборудования к нулевому проводу), т.е. первопричиной опасности является зануление корпусов – гальваническая связь корпусов с сетью (с источником электрического тока), а затем предпринимается вынужденная попытка снизить эту опасность заземлением нейтрали трансформатора. В рекомендуемой системе ликвидировать первоначальную причину опасности предлагается отказом от зануления корпусов, т.е. применением

четырёхпроводной трёхфазной сети с изолированной нейтралью без зануления. В этом случае появление опасного напряжения на заземленных корпусах при замыкании одной из фаз на землю исключено. Тогда опасность сохраняется при прикосновении к проводу другой фазы, однако здесь уже совершенно другое дело.

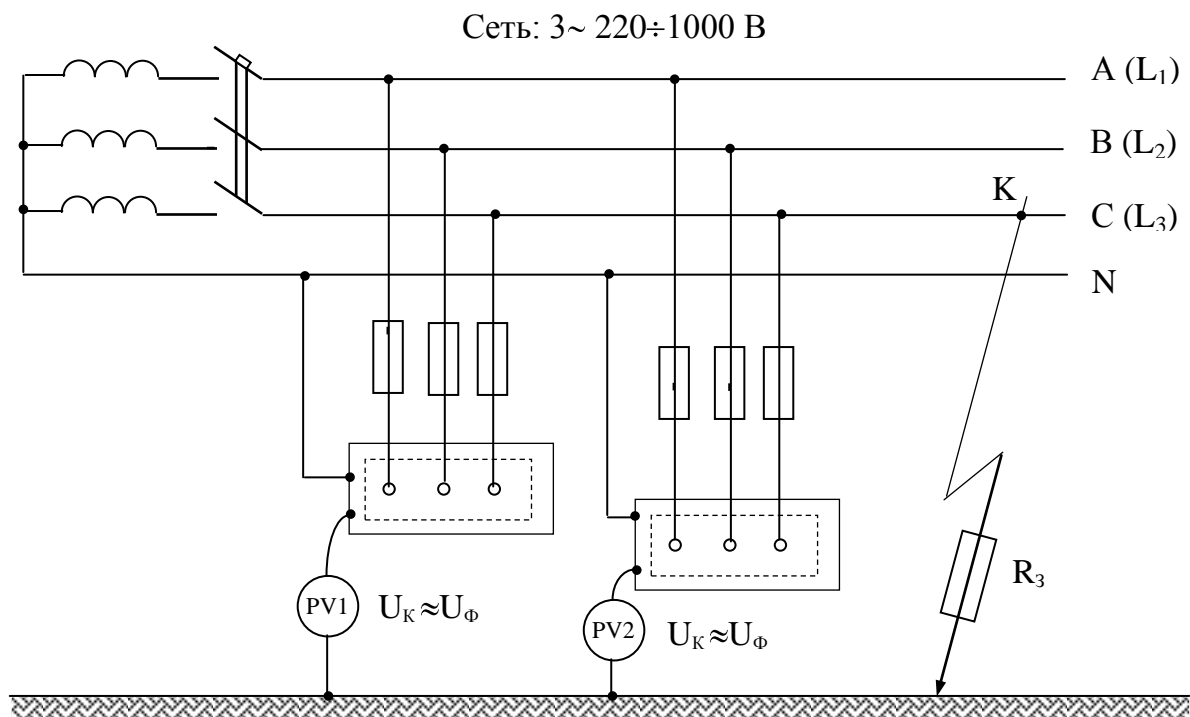


Рис. 54 Замыкание фазы на землю в сети с занулением без заземления нейтралью.

Во-первых, вероятность прикосновения к токоведущей части во много раз меньше, чем к корпусу оборудования.

Во-вторых, напряжения прикосновения 220 В в сети с глухозаземленной нейтралью с точки зрения опасности воздействия на организм человека практически равноценны – в том и другом случае напряжение смертельно опасно. Однако в сети с глухозаземленной нейтралью с занулением опасное напряжение на корпусе может существовать до тех пор, пока не будет ликвидировано замыкание на землю или отключена сеть вручную, так как максимально-токовая защита не реагирует ввиду малого тока замыкания. В то время как в четырёхпроводной сети с изолированной нейтралью без зануления прикосновение к фазе (появления утечки) вызывает срабатывание защитно-отключающего устройства за короткое время (0,2 с), тем самым предотвращается поражение током. Кроме того, в этом случае изоляция сети играет свою основную роль -

она используется как средство защиты людей, она ограничивает величину тока утечки. Однако в сетях с глухозаземленной нейтралью защитное свойство изоляции при прикосновении к токоведущей части не используется, это свойство для ограничения тока утечки использовать в данном случае невозможно, так как ток $I_{кз}^{(1)}$ возвращается к источнику тока не через изоляцию сети, а через проводник, соединяющий нейтральную точку источника с землей.

Опасность воздействия тока на человека определяется его величиной и временем воздействия на организм. Время действия тока на человека зависит от времени срабатывания аппаратуры защиты и времени прикосновения к корпусу. Следовательно, время действия тока на организм определяется временем срабатывания защиты.

Именно от напряжения на корпусе в сетях с глухозаземленной нейтралью, как свидетельствует зарубежная и отечественная статистика, доля несчастных случаев составляет 25÷30 %. Следует иметь в виду, что при увеличении тока $I_{кз}^{(1)}$ увеличивается его разрушающее действие на оборудование.

Таким образом, и с вышеизложенной точки зрения экономически целесообразней и безопасней является четырехпроводная сеть с изолированной нейтралью без зануления, где токи ОЗН в сотни и тысячи раз меньше токов $I_{кз}^{(1)}$, которые имеют место в сетях с глухим заземлением нейтрали, и где ток ОЗН ограничивается изоляцией сети. Кроме того, в сети с изолированной нейтралью без зануления достаточно контролировать лишь параметры заземления и изоляции сети.

Но опасность сети с глухозаземленной нейтралью сохраняется для персонала и в нормальном режиме (без однополюсного замыкания). Она обусловлена существованием напряжения на зануленных корпусах неповрежденных токоприемников, вызванного прохождением рабочего тока в нулевом проводе при трехфазной несимметричной или однофазной нагрузке. Максимально-токовая защита, отстроенная на срабатывание при однополюсных замыканиях, в этом случае не предотвращает возможность поражения током, на нее возлагается лишь отключение сети при однополюсных замыканиях на корпус или на нулевой провод.

В отличие от сети с глухим заземлением нейтрали в сетях с изолированной нейтралью при нормальном режиме работы появление

опасного напряжения на корпусах оборудования исключено. В этом одно из важных преимуществ эксплуатации четырехпроводной сети с изолированной нейтралью без зануления.

Анализ работы сетей с глухозаземленной нейтралью свидетельствует о том, что условия работы изоляции при однофазном к.з. улучшаются несущественно. При этом следует иметь в виду очень важное обстоятельство, заключающееся в том, что коммутационные и атмосферные (в воздушных линиях) перенапряжения превосходят в несколько раз перенапряжения, возникающие при однофазном замыкании на землю как при этом, так и при другом режиме нейтрали, независимо от длительности однофазного замыкания.

Из этого следует, что нет никаких оснований надеяться на повышение запаса электрической прочности изоляции сети при осуществлении глухого заземления нейтрали, т.е. в этом случае нет преимуществ глухого заземления нейтрали перед сетью с изолированной нейтралью.

Кроме того, в рассмотренных режимах работы сети с глухозаземленной нейтралью изоляция сети по отношению к земле не используется как основное защитное средство от поражения током, она лишь предотвращает короткие одно- и многофазные замыкания и защищает от прямого контакта с токоведущими частями. Однако при изолированной нейтрали изоляция сети выполняет еще, кроме названных, очень важную роль. Она ограничивает ток через человека и снижает ток однофазного замыкания на землю (корпус), повышает тем самым электробезопасность и уменьшает или полностью ликвидирует опасные разрушающие последствия однополюсных замыканий.

В результате разрушающего действия дуги на междуфазную изоляцию однополюсные замыкания переходят в многофазные замыкания. Это является одной из причин, что многофазные замыкания в сетях с глухозаземленной нейтралью происходят в $2,8 \div 3$ раза чаще, чем при изолированной нейтрали.

В результате частых режимов коротких замыканий в сетях с глухозаземленной нейтралью подвергается разрушающему действию и изоляция электроустановок, что сокращает их срок службы. Известно, что каждый случай протекания больших токов к.з. сопровождается необратимыми тепловыми и механическими деформациями диэлектриков и

оболочек кабелей, проводов, образованием в изоляции пузырьков пустот, ослаблением ее электрической прочности и в конечном итоге разрушением.

Частые короткие замыкания вызывают и частые срабатывания максимально-токовой защиты и отключение всей сети или поврежденного участка. Однако каждое отключение больших токов к.з. не остается бесследным и для автоматического выключателя, а у предохранителя разрушает плавкую вставку. Электрические повреждения автоматических выключателей и связанные с этим выходы их из строя, происходят в преобладающем большинстве случаев (около 70%), по сравнению с аналогичными выходами но обусловленными механическими повреждениями. Контакты выключателя изнашиваются в результате разбрызгивания электрическими силами, параллельно действующими в элементах расплавленного дугой металла. Задачи снижения расхода металла (серебра, вольфрама и др.) на изготовление контактов автоматических выключателей диктуются не только экономическими, но и общегосударственными соображениями. Безвозвратно расходуются ежегодно тысячи тонн цветного металла (свинец, олово, цинк, серебро, медь) на изготовление плавких вставок предохранителей, подавляющая часть которых сжигается под действием дуги при однополюсных замыканиях в сетях с глухозаземленной нейтралью. Не случайно, что в настоящее время на промышленных предприятиях плавкие вставки заводской калибровки являются острым дефицитом. В 50÷60% случаях для защиты электроустановок используются некалиброванные плавкие вставки, а так называемые «жучки» или проволока «на глазок». В результате положение еще больше усугубляется: увеличивается вероятность возникновения пожаров, выхода из строя кабельных и воздушных линий, трансформаторов, коммутационных аппаратов и т.п.

Огромный ущерб от применения сетей с глухим заземлением нейтрали наносится в результате простоя оборудования и нарушения технологических процессов из-за более частых режимов к.з., вызывающих отключения потребителей. Этот недостаток сетей с глухозаземленной нейтралью имеет большое значение даже при наличии АПВ, в низковольтных сетях в большинстве случаев АПВ нет, поскольку отключение токов короткого замыкания всегда сопровождается осмотром автоматического выключателя либо заменой плавкой вставки, поиском места повреждения, устранением

последствий выхода из строя кабелей, аппаратуры, электродвигателей или другого оборудования.

Преимущества сетей без зануления в этом аспекте заключаются в том, что изолированная нейтраль дает возможность работы ответственным потребителям при ОЗН, а глухозаземленная нейтраль – нет.

Использование сетей с глухим заземлением нейтрали повышает опасность при эксплуатации маслонаполненного электрооборудования (трансформатора, автотрансформаторов, реостатов и т.п.). Более частые, чем при изолированной нейтрали, однополюсные замыкания, кроме того, сопровождающиеся возникновением дуги большой мощности, создают высокую опасность возникновения взрывов и пожаров маслонаполненного электрооборудования.

Частой причиной возникновения пожара и перегорания цепей зануления на предприятиях является использование нулевых защитных проводников и цепей заземления в сетях с глухозаземленной нейтралью в качестве рабочих нулевых проводников. Такие негативные явления возникают чаще всего по двум причинам. Первая – заключается в том, что при подключении вновь устанавливаемых однофазных потребителей к действующей сети с заземленной нейтралью не производится перерасчет и перемонтаж цепей защитного зануления (либо не производится прокладка дополнительного нулевого провода к вновь подключаемому оборудованию). Вторая причина возникновения пожаров и отгорания защитного заземления возникает в результате использования трехжильных кабелей, когда в системе с глухозаземленной нейтралью в качестве нулевого защитного проводника используется металлическая оболочка кабеля, проводимость которой недостаточна для использования ее в качестве нулевого рабочего проводника.

В сетях с изолированной нейтралью такие нарушения Правил безопасности предотвращаются самой системой нейтрали, и возникновения пожаров по этим причинам исключены, исключается также и электроопасное состояние сети, где обгорание заземляющих проводников такими нагрузками или же токами $I_{кз}^{(1)}$ невозможно.

Серьезный ущерб на предприятиях наносится при производстве электросварочных работ с использованием сварочных трансформаторов, запитанных от сети с глухозаземленной нейтралью. В соответствии с [1]

запрещается использование в качестве обратного сварочного провода сети заземления, металлические строительные конструкции, коммуникации и технологическое оборудование. Нарушение этих требований может привести к тяжелым последствиям. Кроме того, ПУЭ предписывают заземление вторичной обмотки и зануление (заземление) корпуса сварочного трансформатора (рис. 55), с целью обеспечения безопасности сварщика в случае перехода высокого напряжения на сторону низкого напряжения (например, в результате пробоя изоляции между обмотками, падения высоковольтного провода на сварочные провода и т.п.).

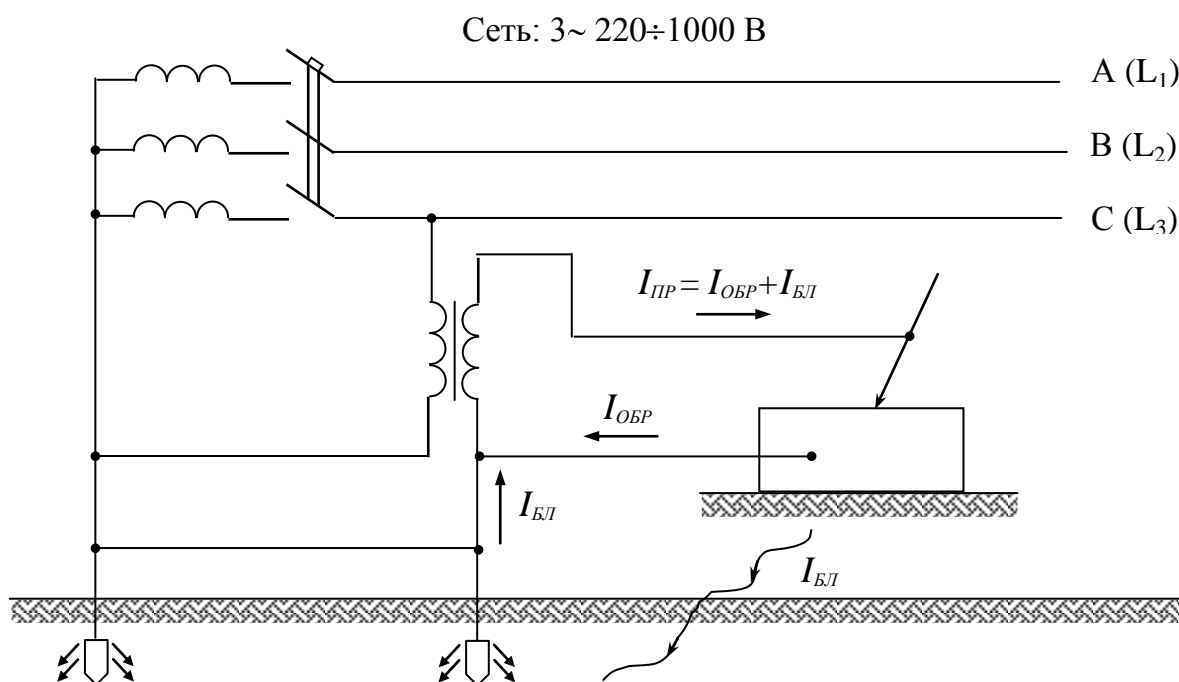


Рис. 55 Блуждающий ток при сварке.

При отсутствии заземления сварщик может оказаться под действием фазного напряжения сети. Таким образом, в сети с глухозаземленной нейтралью первичная и вторичная обмотки сварочного трансформатора гальванически связаны с землей, корпусами электрического и технологического оборудования. При производстве сварочных работ возникают блуждающие сварочные токи, достигающие десятки и сотни ампер, в земле, в заземляющих и зануляющих проводах, в металлической броне силовых и контрольных кабелей, кабелей связи, телемеханики и т.п. Причина возникновения блуждающих токов заключается в том, что контакт между металлоконструкцией, на которой ведется сварка, и обратным сварочным проводом выполняется обычно большим сопротивлением, чем

сопротивление контакта металлоконструкции с цепью зануления (заземления). Хотя инструкция для сварщика предписывает тщательную зачистку поверхности свариваемой детали и присоединение к этой поверхности обратного сварочного провода с помощью специального зажима типа струбцины, однако на практике это требование не выполняется. Контакт осуществляется скруткой, крюком, накладкой с придавливанием провода к поверхности свариваемой детали посторонним металлическим предметом и т.п. Тщательный контакт не создается в случаях частой смены места сварки.

Большие по величине блуждающие токи представляют серьезную опасность, они выводят из строя бронированные кабели, сеть заземления (зануления), технологическое оборудование, могут явиться причиной возникновения пожара, сокращают срок службы бронированных кабелей из-за нагрева брони и интенсивного высыхания пропитывающего состава изоляции. Предписываемые директивными документами организационно-технические мероприятия малоэффективны.

Радикально решить этот вопрос позволяет переход к системе с изолированной нейтралью. При отказе от зануления и заземления нейтрали, т.е. при питании сварочных трансформаторов от сети с изолированной нейтралью, не потребуется заземление вторичной обмотки сварочного трансформатора, в результате исключается возможность появления блуждающих токов и опасных последствий от их разрушающего действия.

В итоге сравнения двух схем сетей преимущество трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью без зануления перед такой же схемой с глухозаземленной нейтралью с занулением заключается в следующем:

- снижается в три раза количество разрушающих электрооборудование однофазных коротких замыканий (аппаратов, двигателей, трансформаторов, генераторов, кабелей, проводов и т.п.).

- в такое же количество раз увеличивается срок службы автоматических выключателей, отключающих ток однополюсного к.з. (уменьшается износ контактов);

- снижается в три раза расход цветного металла (цинка, меди, олова и др.) на изготовление плавких вставок предохранителей;

- снижаются или полностью ликвидируются блуждающие токи, снижается коррозия металлоконструкций в земле, выход из строя

коммуникаций (подземных трубопроводов, кабелей связи, контроля, сигнализации и т.п.), особенно при проведении сварочных работ;

– не требуется зануление корпусов и т.п., вместо него используется только заземление. Нулевой изолированный от земли рабочий проводник используется только для питания однофазной и несимметричной нагрузки;

– в четырехпроводных сетях с изолированной нейтралью снизится количество однофазных коротких замыканий с большими токами, следовательно, сокращается число пожаров на предприятиях и в быту. (Статистика свидетельствует, что число пожаров от применения электроэнергии составляет 20÷25 % от общего количества пожаров);

– резко сократится бытовой (составляющий 50 %) и производственный электротравматизм, снизится детский электротравматизм, который составляет сейчас 25 %;

– на 50-60 % увеличивается длина питающих линий вследствие отказа от проверки токов уставки и токов плавкой вставки на надежность срабатывания или снижается мощность подстанции, или уменьшается сечение кабелей и проводов;

– уменьшается опасность поражения персонала током при прикосновении к корпусу в момент замыкания на корпус. При глухозаземленной нейтрали велик ток однополюсного к.з., а следовательно, велико напряжение прикосновения;

– уменьшается термический износ кабелей и проводов;

– снижается тепловой режим системы заземления и зануления;

– снижается воровство электроэнергии, повышается культура эксплуатации электроустановок.

Применение в практике электроснабжения трехфазных четырехпроводных сетей с изолированной нейтралью без зануления позволяет широко использовать для защиты от токов утечки как защитное отключение (реле утечки), так и устройства защитного отключения (УЗО) в вариантах селективного построения при коэффициенте эффективности заземления нейтрали $K_{3\phi} = 1,4 \div 1,73$.

Разумеется, что для этого требуется пересмотр ряда статей Правил устройства электроустановок.

11. МОНТАЖ ЗАЩИТНОГО ЗАНУЛЕНИЯ И ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Заземление или зануление в электроустановках выполняют: при напряжениях 380 В и выше переменного и 440 В и выше постоянного тока во всех случаях; при напряжении 42 В и выше переменного и 110 В постоянного тока – в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках. Во взрывоопасных установках заземление или зануление выполняют при любых напряжениях.

Заземлению или занулению подлежат корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т.п.; провода электрических аппаратов; вторичные обмотки измерительных трансформаторов; каркасы распределительных щитов, щитов управления, щитков и шкафов, а также съемные или открывающиеся части конструкций, если на последних установлено электрооборудование с напряжением 42 В переменного тока или выше 110 В постоянного тока; металлические конструкции РУ, металлические кабельные конструкции и кабельные соединительные муфты, металлические оболочки и броня контрольных и силовых кабелей, металлические оболочки проводов, стальные трубы электропроводки, корпуса шинопроводов, лотки, короба, тросы и стальные полосы, на которых закреплены кабели и провода.

Указанные выше металлические части заземляют или зануляют как на стационарных, так и на передвижных электроустановках и переносных электроприемниках. Заземлению или занулению не подлежат корпуса электроприемников с двойной изоляцией, а также корпуса электроприемников, подключаемых к сети через разделительный трансформатор.

11.1 ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Каждая заземляемая или зануляемая часть электроустановки присоединяется к сети заземления (зануления) при помощи отдельного ответвления (рис.56) [11].

Последовательное включение в заземляющий или нулевой защитный проводник заземляемых частей электроустановки запрещается. При этом разрешается последовательное включение нескольких стационарных металлических конструкций, используемых в качестве заземляющих

проводников или магистралей заземления (зануления). Под один заземляющий болт на магистрали заземления разрешается присоединять только один проводник.

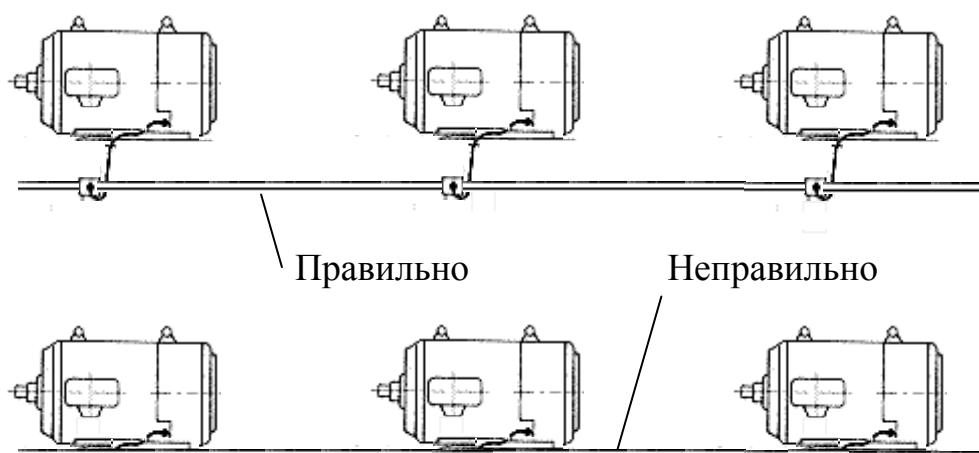


Рис. 56 Заземление электроустановок.

11.2 ПОВТОРНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

На ВЛ до 1000 В с глухим заземлением нейтрали металлическая связь с нейтралью трансформатора осуществляется нулевым проводом, проложенным на тех же опорах ВЛ, что и фазные. Подсоединением к нулевому проводу и заземление железобетонных и металлических опор на таких ВЛ.

Для повышения надежности цепи заземления на случай обрыва нулевого провода ПУЭ требуют устройства повторных заземлений нулевого провода на концах ВЛ длиной более 200 метров, а также на вводах в здания, электроустановки которых подлежат занулению. Общее сопротивление растеканию повторных заземлений должно быть не более 10 Ом при напряжении 380 В, а каждого из повторных заземлителей – не более 30 Ом. При этом используют естественные заземлители, например подземные части опор, а также заземляющие устройства от грозových перенапряжений.

Для защиты людей, находящихся в зданиях, от грозových перенапряжений в населенных пунктах с одно-, двухэтажной застройкой на ВЛ 1000 В, не экранированных высокими зданиями, сооружениями и высокими деревьями, выполняют повторные заземляющие устройства сопротивлением не более 30 Ом по трассе ВЛ с расстоянием, не

превышающим 200 м – для районов с числом грозových часов в году до 40 и 100 м, если число этих часов более 40.

Кроме того, такие заземляющие устройства выполняют на опорах с ответвлениями к вводам в помещения, где может быть сосредоточено большое количество людей, а также на конечных опорах линий, имеющих ответвления к вводам.

11.3 ЗАЗЕМЛИТЕЛИ

Для заземления электроустановок в первую очередь используют естественные заземлители. Если эти заземлители имеют сопротивление растеканию, удовлетворяющее требованиям ПУЭ, то устройство искусственных заземлителей не выполняют.

В качестве естественных заземлителей используют железобетонный фундамент зданий и сооружений, проложенные под землей водонапорные и другие металлические трубопроводы, обсадные трубы, металлические шпунты и другие металлические конструкции, имеющие соединение с землей. Исключение составляют трубопроводы для горючих жидкостей и горючих взрывчатых газов, чугунные трубопроводы и временные трубопроводы строительных площадок.

В качестве естественных заземлителей используют также свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле. Алюминиевые оболочки кабелей и голые алюминиевые провода использовать в качестве заземлителей запрещается.

11.4 ИСКУССТВЕННЫЕ ЗАЗЕМЛИТЕЛИ

По их расположению в грунте и форме делят на следующие группы:

а) углубленные – из круглой или полосовой стали, укладываемые горизонтально на дно котлованов по периметру фундаментов. При укладке таких заземлений на большой глубине используют грунты с большой электрической проводимостью и менее подверженные сезонным изменениям.

б) вертикальные – из стальных вертикально ввинчиваемых и вдавливаемых в грунт стержней из круглой стали, а также из забиваемых отрезков угловой стали.

в) горизонтальные – из круглой или полосовой стали, уложенных горизонтально в траншею. Эти заземлители используют по прямому назначению и для связи между стержнями вертикальных заземлителей.

На практике также применяются комбинированные заземлители из указанных выше.

Для заземлителей обычно применяют круглую сталь диаметром 10÷16 мм, полосовую сталь сечением 40×4 мм и угловую сталь сечением 50×50×5 мм. Длина вертикальных заземлителей принимается равной: ввинчиваемых и вывинчиваемых (4,5÷5) м, забиваемых (2,5÷3) м. Вертикальные заземлители в плане располагаются в соответствии с проектом. При уменьшении расстояния между ними суммарное сопротивление растеканию увеличивается из-за явления экранирования.

На территориях электроустановок с большим удельным сопротивлением земли (более 200 Ом в наиболее неблагоприятное время года) применяют углубленные заземлители, если на большой глубине сопротивление снижается; искусственную обработку земли с целью снижения его удельного сопротивления. Например, для вертикальных электродов выполняют укладку слоев соли, не увеличивающей коррозию стали (нитрат натрия, гидрат окиси кальция), и земли при диаметре обработки примерно 0,5 м на 1/3 длины электрода; после укладки каждого слоя его поливают водой. Устраивают выносные заземлители, если вблизи электроустановок есть места с меньшим удельным сопротивлением земли. Устройство выносных заземлителей выполняют проводами или кабелями.

На территориях распространения вечномёрзлых грунтов заземлители помещают в незамерзающие водоемы или в талые зоны, в том числе искусственные, а так же используют артезианские скважины.

Наименьшие допустимые размеры заземляющих и нулевых защитных проводников, а также стальных заземлителей приведены в табл. 20.

В электроустановках напряжением до 1000В и выше с изолированной нейтралью проводимость заземляющих проводников должна иметь кратное значение проводимости фазных проводников (не менее 1/3), а сечение проводников соответствовать данным, приведенным в табл. 1 и табл. 2.

В производственных помещениях с электроустановками напряжением до 1000 В магистрали заземления из стальной полосы применяют сечением не менее 100 мм, а напряжение выше 1000 В – не менее 120 мм.

Таблица 20

Заземлители, заземляющие и нулевые защитные проводники	Прокладка		
	В зданиях	В наружных установках	В земле
Круглые проводники диаметром, мм	5	6	10
Прямоугольные проводники:			
Сечение, мм	24	48	48
Толщина, мм	3	4	4
Угловая сталь(толщина полок), мм	2	2,5	4
Стальные трубы (толщина стенок), мм:			
Водогазопроводные	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные	1,5	2,5	Не допускается

Наименьшие допустимые сечения медных и алюминиевых заземляющих и зануляющих защитных проводников в электроустановках до 1000В приведены в табл. 21.

Таблица 21

Заземляющие и нулевые защитные проводники	Медь, мм	Алюминий, мм
Неизолированные проводники при открытой площадке	4	6
Изолированные провода	1,5	2,5
Заземляющие жилы кабелей или многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами	1,5	2,5

Использование металлических конструкций зданий и сооружений, трубопроводов и оборудования в качестве нулевого рабочего проводника запрещается.

Для передвижных и переносных электроприемников в качестве заземляющего или зануляющего защитного проводника применяют отдельную жилу в общей оболочке с фазными жилами одинакового с ними сечения.

Во взрывоопасных участках в сетях напряжением до 1000В с глухозаземленной нейтралью зануление в силовых цепях выполняют с помощью специально проложенного нулевого защитного проводника: третьего – в двухпроводных (одно- и двухфазных) сетях и четвертого – в трехпроводных (трехфазных) сетях. В осветительных двухпроводных (однофазных) сетях специальный третий проводник для зануления прокладывают только во взрывоопасных зонах В1.

11.5 МОНТАЖ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

11.5.1 Монтаж вертикальных заземлителей

Вертикальные заземлители, или, как их часто называют, электроды заземления, погружают различными способами, зависящими от конструкции и размеров электродов, характера грунта и его состояния во время монтажа (талый, мерзлый) и от ряда других факторов.

Электроды из угловой и другой профильной стали любого сечения можно забивать в грунт, вдавливать, закладывать в готовые скважины. Электроды из круглой или арматурной стали и из некондиционных труб можно погружать, кроме перечисленных способов, также и ввертыванием в грунт.

Обычно наиболее рациональными способами монтажа являются: для талых, мягких грунтов – вдавливание и ввертывание стержневых электродов, забивка и вдавливание профильных электродов; для плотных грунтов – забивка электродов любого сечения; для мерзлых грунтов – вибропогружение; для скальных и мерзлых грунтов при необходимости глубокого погружения – закладка в пробуренные скважины.

Конструкция и способы погружения вертикальных заземлителей влияют на сопротивление растеканию отдельных электродов и заземляющего устройства в целом.

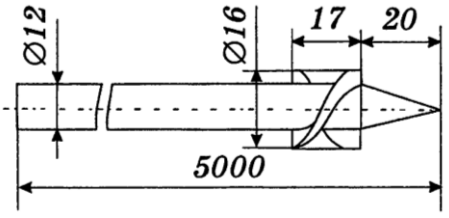
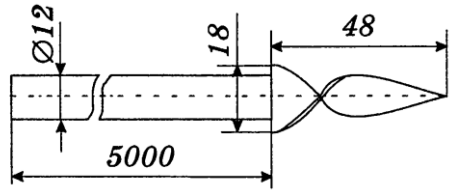
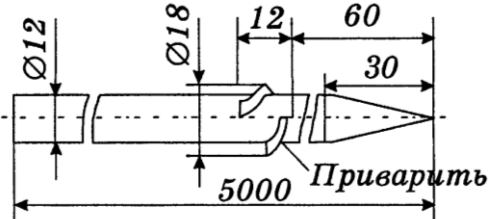
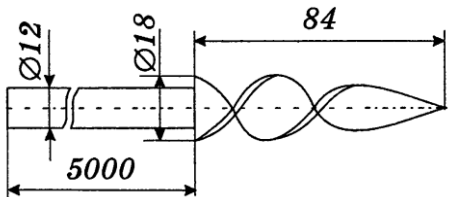
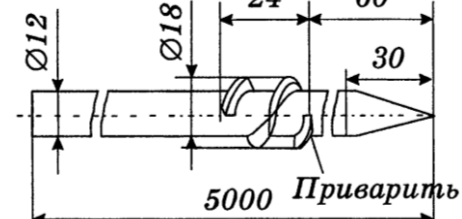
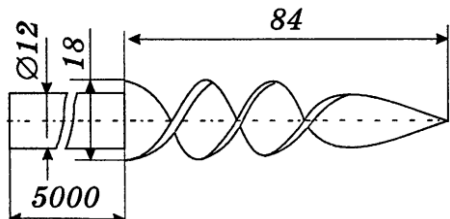
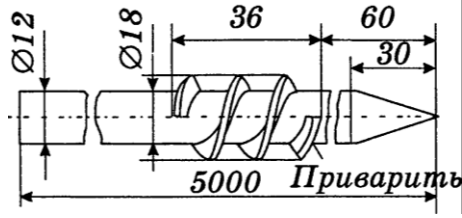
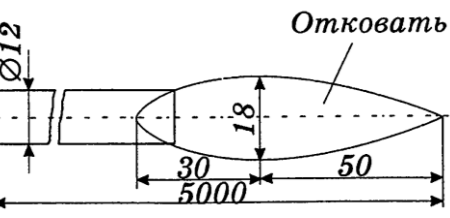
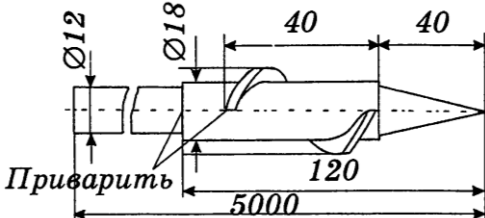
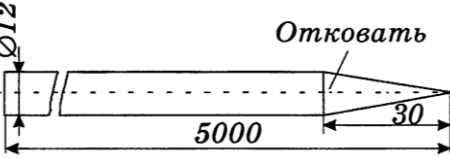
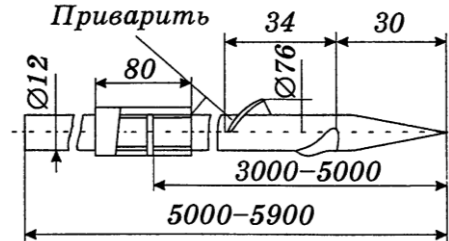
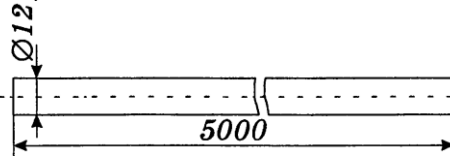
Виды наконечников стержневых заземлителей приведены в табл. 22.

На рис. 57 даны графики изменения сопротивления растеканию электрического тока с электродов с различной конструкцией наконечников (табл. 22) в зависимости от способа погружения и конструкции заземлителя в глинистых грунтах.

Электроды пп. 11, 12 (см. табл. 22) сразу после погружения способом вибрации имеют наименьшее сопротивление. При вибрации электрода из окружающего грунта выделяется влага, грунт становится более вязким, плотно прилегает к электроду и этим снижает сопротивление растеканию. В дальнейшем, через несколько дней, структура грунта восстанавливается, сопротивление R электродов увеличивается.

При погружении способом вибрации заостренные и незаостренные электроды погружаются с одинаковой скоростью, поэтому при таком способе погружения лучше выбирать конструкцию электродов с наконечником 12

Таблица 22

№ п/п	Конструкция наконечника	№ п/п	Конструкция наконечника
1		7	
2		8	
3		9	
4		10	
5		11	
6		12	

(рис. 57), как более простую в изготовлении (табл. 22). Сопротивление R электродов, погруженных способом забивания, является наиболее стабильным и наименьшим в глинистых грунтах. Лучшие конструктивные параметры при этом способе погружения у электродов с наконечником 11.

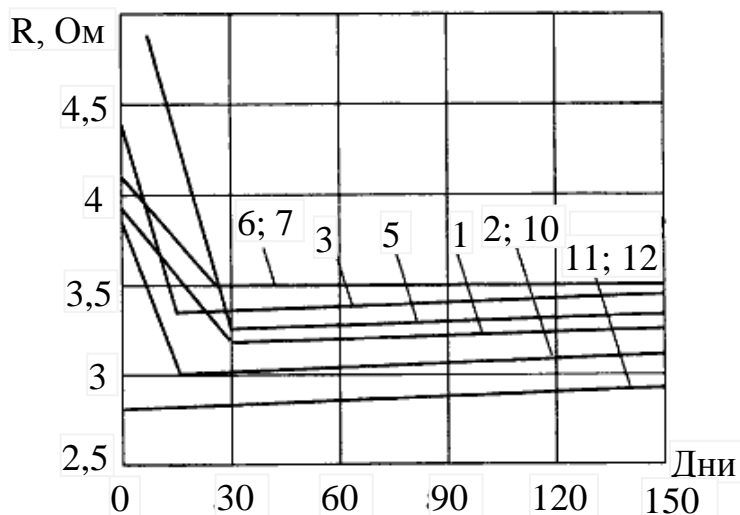


Рис. 57 Сопротивление растеканию тока с электродов в зависимости от времени, способа погружения и конструкции наконечника (по табл. 22) в глинистых грунтах.

Сопротивления R электродов, погруженных способом ввертывания, в начальный период превышают на 20÷60% сопротивления R электродов, погруженных другими способами. В течение месяца после погружения разница в значениях R уменьшается до 10÷20% и на этом уровне остается длительное время. Наконечники таких конструкций электродов раздвигают в стороны грунт и уплотняют его. Отверстие, образованное в грунте таким наконечником, больше диаметра стержня, поэтому соприкосновение с грунтом происходит в отдельных контактных точках, что и приводит к увеличению R . Верхние слои грунта, разбухая от влаги, плотно прилегают к электроду и не дают возможности воде просачиваться вниз по глубине отверстия. Наименьшее сопротивление R при таком способе погружения у электрода 10 (см. табл. 22). Через некоторое время (10÷15 суток) оно выравнивается с сопротивлением R забитых электродов.

Конструкции электродов 2, 6, 7 (см. табл. 22) имеют сопротивления R больше сопротивлений забитых электродов.

Однако скорости погружения этих электродов значительно превышают скорости погружения электродов способом вибрации и забивания (табл. 23).

Наращивание, соединение вертикальных электродов с целью увеличения глубины погружения следует выполнять термосваркой или механическим сочленением.

Таблица 23

Способ погружения	Номер электрода по табл. 3	Скорость погружения, м/мин	Условия погружения
Ввертывание	1	0,77	Тяжелые
	2	1	---
	3	1,56	Легкие
	5	1,14	---
	6,7	0,7	Тяжелые
	10	1,65	Легкие
Вибрация	11	0,43	Погружаются автоматически
	12	0,43	То же
Забивание вручную	11	0,18	Тяжелые
	12	0,17	---

Соединение электродов с помощью муфты значительно увеличивает R и снижает скорость погружения электродов.

Для ускорения и удешевления изготовления стержневых электродов заземления монтажными заводами организован выпуск направляющих наконечников, обеспечивающих ввертывание электродов заземления в грунт. Технические условия предусматривают выпуск двух типов направляющих наконечников:

1) одновитковая спиральная шайба, конструкция которой представляет собой отрезок круглой стали с приваренной к нему по винтовой линии полосой (рис. 58, а);

2) одновитковая спираль для полосы, конструкция которой представляет собой полосу, изогнутую по винтовой линии (рис. 58, б).

Одной из разновидностей стержневых электродов является заземлитель для передвижных электротехнических установок (рис. 58, в).

Заземлитель может быть использован для транспорта на резиновом ходу в охранно-опасных зонах, для заземления бытовых вагончиков и других аналогичных установок, требующих смены мест.

Общие размеры стержня: длина 900÷2000мм; диаметр 12÷14мм.

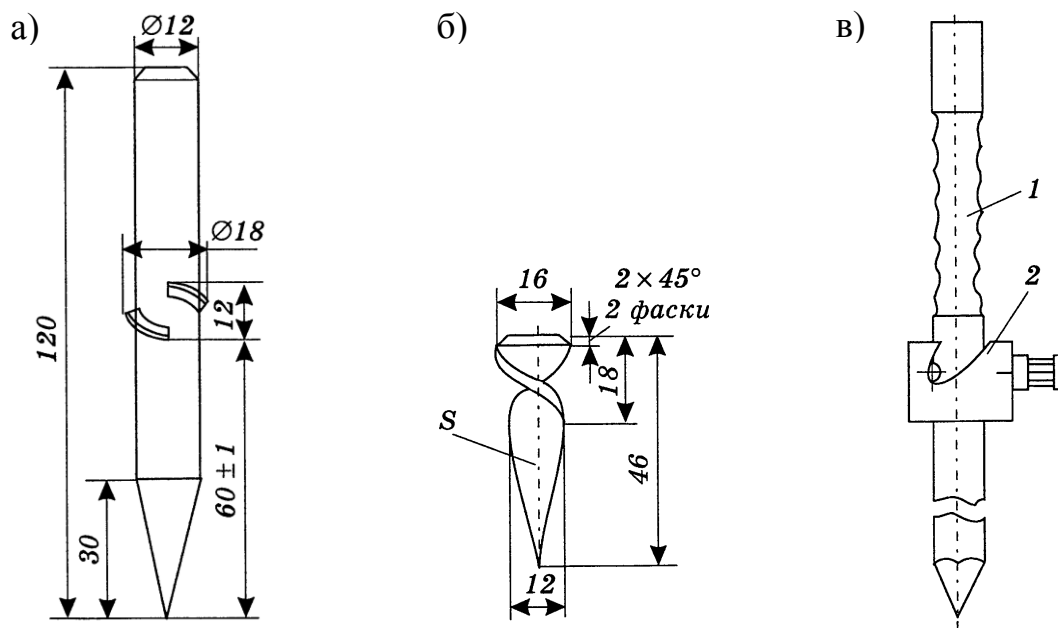


Рис. 58 Наконечники электродов заземления: а – наконечник электрода заземления с разрезной шайбой; б – наконечник электрода заземления из полосы; в – заземлитель для передвижных установок: 1 – стержень; 2 – зажим.

Способы забивки и извлечения заземлителя показаны на рис. 59. Забивка и извлечение производится с помощью молота (рис. 60).

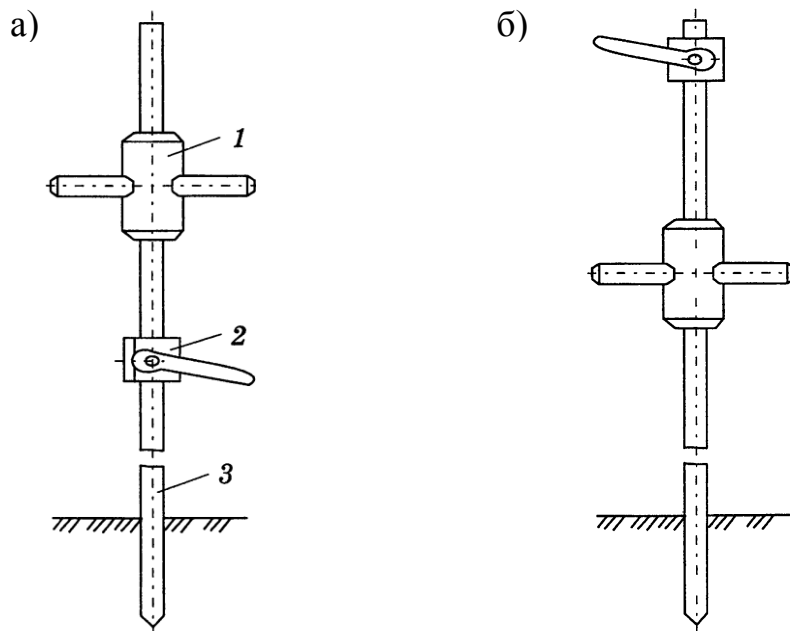


Рис. 59 Способы забивки и извлечения электродов: а – забивка; б – извлечение: 1– молот; 2– замок; 3– электрод.

Твердость поверхности заостренного конца стержня на длине 40 мм участков с волнистой поверхностью, деталей замка и рабочего конца поворотного рычага замка должна быть не ниже HRC 35.

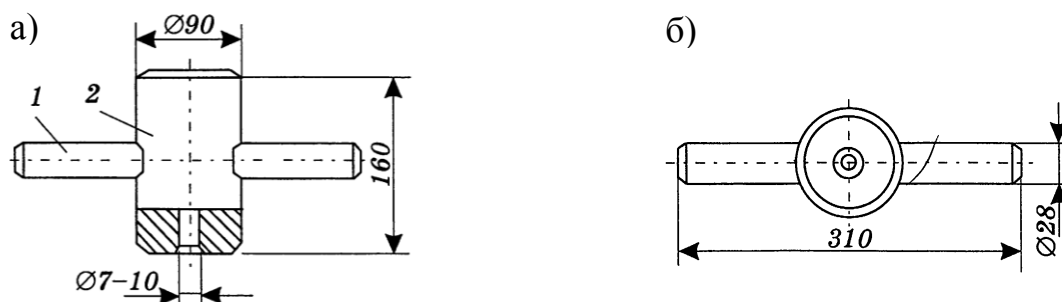


Рис. 60 Устройство для забивки и извлечения электродов: а – вид сбоку; б – вид сверху; 1 – рукоятка; 2 – молот.

Зажим должен обеспечивать надежный контакт заземляющего провода. Значение переходного сопротивления между стержнем и заземляющим проводом не должно быть более 0,01 Ом.

При механизации процесса забивки и извлечения заземлителя, как правило, применяют машины специального назначения или приспособливают для этого серийные электрические и пневматические молотки, электротрамбовки, бензоперфораторы, легкие копры, вибраторы и другие механизмы ударного и виброударного действия, а также и ручные приспособления для монтажа единичных заземлителей в удаленных местах.

В частности, вертикальные (а также и наклонные) электроды чаще всего ввертывают в грунт с помощью ручных машин типа дрелей, имеющих привод от электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания и снабженных редуктором, понижающим частоту вращения двигателя. Рабочий устанавливает в вертикальное положение механизм со вставленным в него электродом, заостренный конец которого (иногда снабженный спиралью для облегчения погружения) упирается в грунт в намеченном месте (рис. 61, а). При включении двигателя электрод начинает вращаться и погружается в разрыхляемый грунт под воздействием тяжести механизма и электрода при небольшом дополнительном усилии рабочего. Таким способом удается ввернуть электрод диаметром 10÷14 мм на глубину 4÷5 м в мягкий и талый грунт за несколько минут.

Для погружения электродов в плотные и мерзлые грунты приходится применять более мощные механизмы, например электрические вибраторы (рис. 61, б). В данном случае используется электровибратор, подвешенный к крановой стреле, смонтированной на автомобиле. Для выполнения сварочных работ в кузове машины установлен сварочный трансформатор, а

для электропитания трансформатора, привода стрелы и вибратора – электрогенератор. Кнопки управления установки смонтированы на стенке автомашины в защитном кожухе. Стрела грузоподъемностью 0,5 т вынесена на крышу фургона. Подъем вибратора занимает 2 мин, а погружение отрезка электрода длиной 3 м, изготовленного из отходов труб, – около 5 мин.

а)



б)

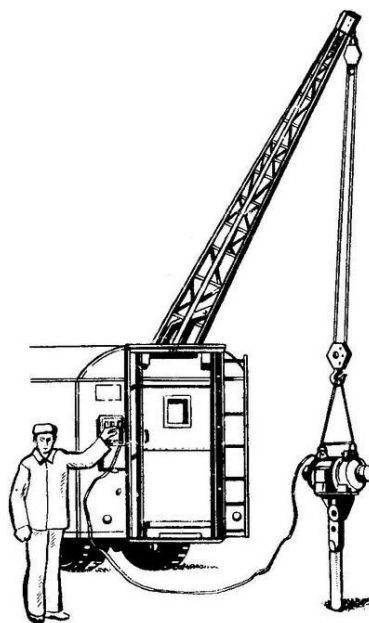


Рис. 61 Погружение в грунт вертикальных электродов заземления: а – ввертыванием электросверлилкой; б – забивкой электрическим вибратором, питаемым от автомобильной электростанции.

К электровибратору заводского выпуска дополнительно изготавливают направляющий стакан с цилиндрическим переходником для электродов круглого сечения или с переходником, насаживаемым на электрод из угловой стали или стали соответственно другого профиля. Мощность электровибратора – 1,2 кВт, масса – 100кг. Мощность электродвигателей на подъемной лебедке и стреле соответственно 1,7 и 1,0 кВт.

В песчаных грунтах вибраторами удается погрузить электроды на глубину, нужную для достижения хорошо проводящих глубинных слоев земли (табл. 24), залегающих иногда на 15÷20 м и более, ниже поверхности.

Таблица 24

Глубина забивки электрода, м	3,5	5	7	9	11	13	15	18
Сопротивление растеканию, Ом	300	250	150	110	85	45	20	10

Анализ данных, приведенных в табл. 24 позволяет сделать вывод о том, что один вертикальный электрод, погруженный на глубину 18 м, будет

иметь примерно такую же проводимость, что и 30 электродов, погруженных на глубину 3,5 м. С учетом перемычек, необходимых для соединения коротких электродов, металла понадобится гораздо больше, чем при одиночном электроде длиной 18 м. Кроме того, значительно повысятся и затраты труда и стоимость заземляющего устройства, а проводимость ввиду взаимного экранирования коротких электродов может оказаться даже хуже, чем у одного глубинного электрода.

При прочих отмеченных выше достоинствах глубинное заземление целесообразно устраивать при стесненной территории.

Конструкция глубинного заземляющего устройства показана на рис. 62: 1 – муфта соединительная; 2 – наконечник стальной; 3 – стержень заземления; 4 – зажим специальный; 5 – заземляющий проводник.

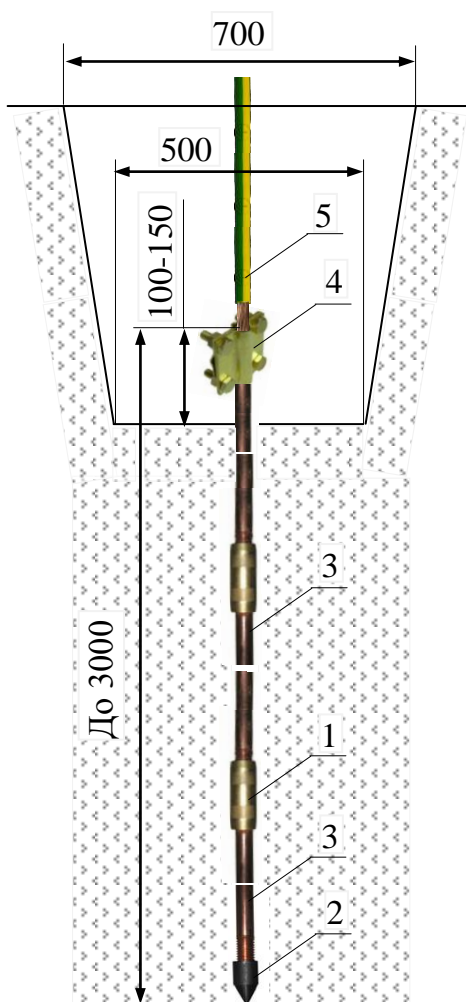


Рис. 62 Конструкция глубинного заземляющего устройства

В основу глубинного заземляющего устройства положен электрод заземляющий вертикальный стержневой сборный. Схема применяется при точечном монтаже электрода. На поверхность выводится круглый или плоский проводник. Электрод погружается на глубину до 30 метров. Глубина погружения определяется расчетом в зависимости от грунтовых условий.

Использование электрода заземляющего вертикального стержневого сборного в качестве вертикального элемента заземляющих устройств, погружаемого на глубину до 30 метров, позволяет получить стабильное электрическое сопротивление заземляющего устройства, на которое слабо влияет изменение температуры внешней среды.

Покрытие стержня заземления медью чистотой не менее 99,95% и толщиной не менее 0,25мм гарантирует получение низкого удельного электрического сопротивления заземления, высокую коррозионную стойкость

и срок службы в грунте до 30 лет.

Удобство и простота монтажа позволяет исключить использование тяжелой строительной техники (экскаватор), а также людского ресурса (в человеко-часах).



Муфта соединительная (рис. 63) предназначена для соединения по длине нескольких стержней заземления посредством резьбы. Муфта изготовлена из латуни, устойчивой к коррозии. Муфта представляет собой цилиндр со сквозным резьбовым отверстием, на наружной поверхности которого нанесено рифление для обеспечения удобства сборки. Конструкция муфты такова, что стержни заземления встречаются на ее середине, а силы, возникающие при погружении заземляющего электрода в грунт, передаются с одного стержня на другой, а не через муфту. С каждой стороны муфты перед внутренней резьбой предусмотрено увеличение диаметра отверстия с целью полного закрытия резьбы на стержнях заземления и предохранения ее от воздействия окружающей среды. Внешний диаметр муфты больше диаметра стержня заземления. Благодаря этому основная истирающая нагрузка приходится на муфту, а не на стержень заземления.

Для погружения заземляющего электрода в грунт путем передачи ударных нагрузок от отбойного молотка с энергией единичного удара не менее 25 Дж используются специальные приспособления: приемная головка и ударная насадка (рис. 64).



Рис. 64 Отбойный молоток для погружения заземляющего электрода



Наконечник стальной (сталь Ст45 ГОСТ 1050-88) (рис.65) представляет собой цилиндр с глухим резьбовым отверстием, на одном из торцов которого имеется конус. Использование наконечников как части заземляющего устройства обеспечивает вертикальное погружение электродов относительно

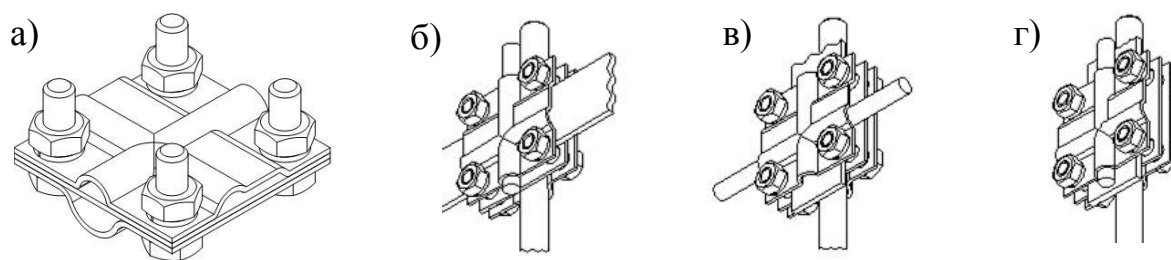
плоскости земли в плотных слоях грунта до 30 метров и позволяет увеличить скорость погружения заземляющего электрода при использовании виброударных нагрузок на заземляющий электрод, а также защищает погружаемый электрод от механических повреждений.



Стержень заземления (рис. 66) представляет собой тннутый стальной стержень (сталь низкоуглеродистая Ст10), покрытый электрохимическим способом медью. В соответствии с ГОСТ 12.1.030-81 п. 1.8 материал, конструкция и размеры заземлителей должны обеспечивать устойчивость к механическим, химическим и термическим воздействиям на весь период эксплуатации. Это требование обеспечивает медное покрытие, которое образует со стальным стержнем молекулярную связь, что позволяет погружать заземляющий электрод на глубину до 30 метров в грунт без нарушения целостности и отслаивания покрытия. Резьба на концах стержня заземления получена накатыванием роликом после нанесения медного покрытия, что позволяет

Рис. 66 предохранить однородное медное покрытие от повреждений.

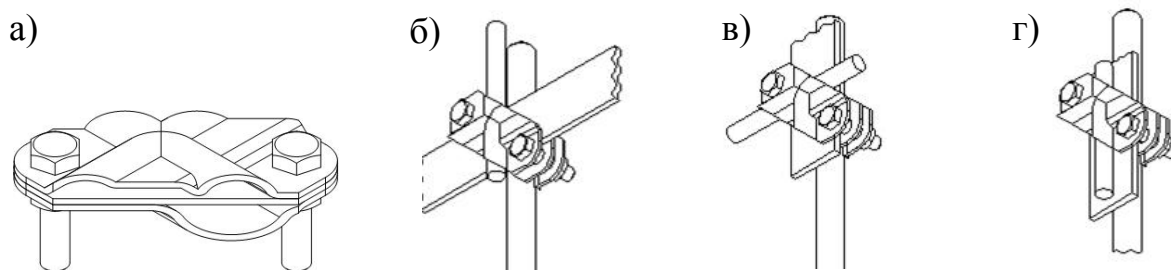
Среди специальных зажимов для заземляющих электродов наибольшее практическое применение получили зажимы ЗУ (рис. 67), ЗУ-К (рис. 68) и ЗУ-В (рис. 69).



а – зажим ЗУ; б, в, г – схема монтажа зажима: соединение электрода заземляющего вертикального стержневого с круглыми и плоскими медными проводниками

Рис. 67 Зажим универсальный для элементов заземляющих устройств.

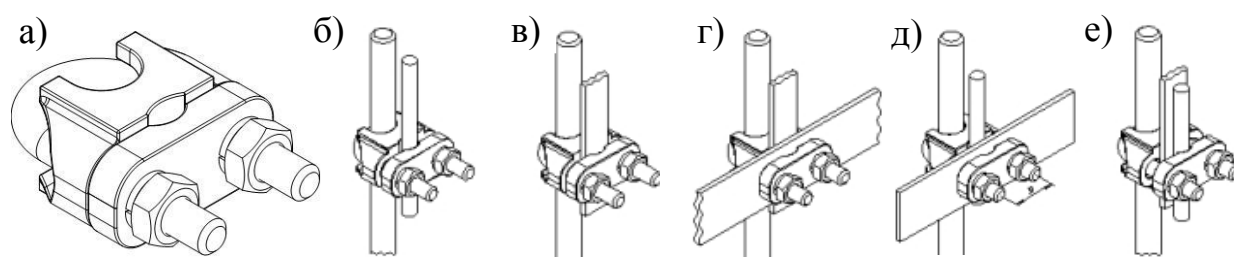
Зажимы предназначены для резьбового электрического соединения вертикальных и горизонтальных элементов (шин заземления из круглых и/или плоских проводников) заземляющих устройств, и электрического соединения с землей аппаратов, машин, приборов и других подобных устройств вместе с другими элементами монтажа.



а – зажим ЗУ-К; б, в, г – схема монтажа зажима: соединение электрода заземляющего вертикального стержневого с круглыми и плоскими медными проводниками

Рис. 68 Зажим универсальный косой для элементов заземляющих устройств.

Надежное электрическое соединение у зажимов обеспечивается за счет применения латуни высокой удельной электропроводности и стабильным низким электрическим сопротивлением, не зависящим от колебаний температуры внешней среды. Высокая коррозионная стойкость применяемых материалов обеспечивает срок службы не менее 30 лет.



а – зажим ЗУ-В; б, в, г, д, е – схема монтажа зажима: соединение электрода заземляющего вертикального стержневого с круглыми и плоскими медными проводниками

Рис. 69 Зажим универсальный U-образный для элементов заземляющих устройств

Заземляющий проводник в виде троса сечением 25 мм^2 в ПВХ изоляции используется для соединения заземляющих электродов друг с другом, а также для соединения заземлителя.

Трос изготовлен из 7 медных жил сечением $3,5 \text{ мм}^2$ ($\varnothing 2,13 \text{ мм}$).

При монтаже проводник прокладывается в канале глубиной $0,5 \div 0,7 \text{ м}$.

Соединение со штырем заземления производится зажимом.

Порядок монтажа глубинного заземляющего устройства

1. Для погружения вертикальных заземляющих электродов должен быть отрыт приямок шириной в верхней части $0,7 \text{ м}$, в нижней – $0,5 \text{ м}$ и глубиной $0,7 \div 0,8 \text{ м}$.

2. Подготовка составных частей заземляющего электрода заключается в обработке внутренней части стального наконечника и муфты антикоррозионной токопроводящей пастой.

Примечание. Смазка (паста) графитовая электропроводящая является всесезонным смазочным электропроводящим материалом. Смазка предназначена для получения стабильной электрической цепи электрода заземляющего вертикального стержневого сборного. Наносится на резьбовые соединения элементов монтажа. Обладает хорошей адгезией и в течение времени ее свойства не меняются даже при нагревании стыка соединения током 1200 А до температуры +40°. Защищает от коррозии, что способствует стабилизации электрического сопротивления в условиях эксплуатации. Применение смазки позволяет снизить на 9÷11% сопротивление стыка практически во всем диапазоне токов, пропускаемых через сборный стык (до 1200 А). При этом при нагревании смазка не вытекает, а сопротивление контактируемых поверхностей на 55÷60% снижается за счет лучшего заполнения неровностей стыка.

3. Стальной наконечник наворачивается на один конец стержня до упора.

4. На другой конец этого же стержня наворачивается муфта до упора.

5. В муфту до упора вкручивается приемная головка.

6. При помощи отбойного молотка с ударной насадкой погрузить электрод в грунт на глубину, удобную для проведения последующих операций.

7. Из муфты выкручивается приемная головка, внутренняя поверхность муфты еще раз обрабатывается антикоррозионной токопроводящей пастой.

8. В муфту погруженного стержня вворачивается до упора следующий стержень.

9. На другой конец этого стержня накручивается до упора обработанная антикоррозионной токопроводящей пастой муфта.

10. В муфту вворачивается до упора приемная головка, и электрод погружается в грунт аналогичным образом.

11. Последовательно в грунт выше описанным способом погружаются остальные стержни заземления.

12. Последний стержень погружается в грунт на такую глубину, чтобы была возможность произвести на нем монтаж зажима для соединения с заземляющим проводником (кругом или полосой).

Примечание. Рекомендуется проводить измерение сопротивления заземления каждые 5÷10 метров глубины. Выполнение этой рекомендации позволяет определить оставшийся объем работ, а также сэкономить материалы, если требуемое сопротивление будет получено на глубине, меньшей полученной расчетом (это может быть связано с ошибкой принятого удельного сопротивления грунта).

13. После соединения проводников из различных металлов (например, медь-сталь) с помощью зажима рекомендуется дополнительно защищать место соединения для увеличения срока службы специальной антикоррозионной стойкой к неорганическим кислотам, щелочам, солям и микроорганизмам, высокогерметичной в отношении воды, водяного пара и газов изоляционной лентой.

14. После монтажа заземлителя и наружных заземляющих проводников перед засыпкой приямок должен быть составлен акт освидетельствования скрытых работ.

15. Приямок следует засыпать однородным грунтом, не содержащим щебня и строительного мусора с утрамбовкой грунта 200мм. Затем засыпать местным грунтом.

11.5.2 ВДАВЛИВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ

Если нет специальных приспособлений для ввертывания или забивки электродов, их можно погружать вдавливанием, воспользовавшись механизмами общего назначения (тракторы, автомобили), а также бурильными и другими машинами.

При вдавливании электродов-заземлителей грунт не только не разрыхляется, но даже уплотняется. Поэтому этот способ монтажа обеспечивает так же, как и способ забивки, наилучшую проводимость заземлителя вследствие хорошего контакта электрода с грунтом и возможность немедленной сдачи в эксплуатацию после монтажа и измерения сопротивления.

11.5.2.1 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЦАНГОВОГО ЗАЖИМА

Перед погружением электрод (рис. 70) крепят к штоку 2 гидроцилиндра 3 с помощью цангового зажима 1, что позволяет в случае

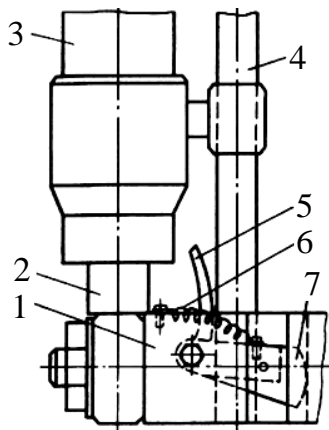


Рис. 70

необходимости (например, при попадании электрода на камень) освободить его. Кроме штока гидроцилиндра, такой зажим может прикрепляться к шнеку или штанге строительных машин. Во избежание вращения вокруг вертикальной оси гидроцилиндр соединен с направляющей штангой 4. При движении штока гидроцилиндра вниз, вместе с ним перемещается и зажим с электродом, который надежно прижимается к его корпусу стопорным сегментом 7 и вдавливается в грунт. При движении зажима вверх стопорный сегмент скользит по электроду, а при движении вниз захватывает новый участок электрода и вдавливает его в грунт. В такой последовательности происходит погружение электрода на глубину, предусмотренную проектом. При необходимости его можно освободить, нажав на рукоятку 5 отвода сегмента. В рабочем положении сегмент удерживается пружиной 6, концы которой закреплены винтами на нем и корпусе зажима.

11.5.2.2 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЗАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ С ЦИЛИНДРОМ

Приспособление (рис. 71) состоит из гидроцилиндров 3 с двумя полыми штоками и зажимного автоматического устройства 1, закрепленного на конце нижнего штока 2. Гидроцилиндр с помощью стоек 5 и фиксатора 4 крепится на раме 6.

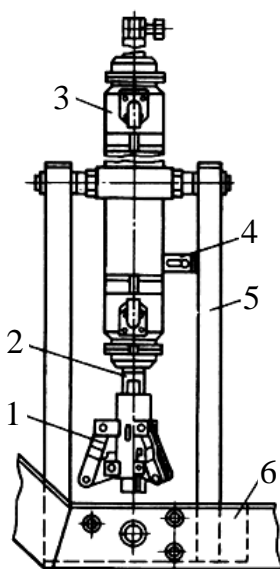
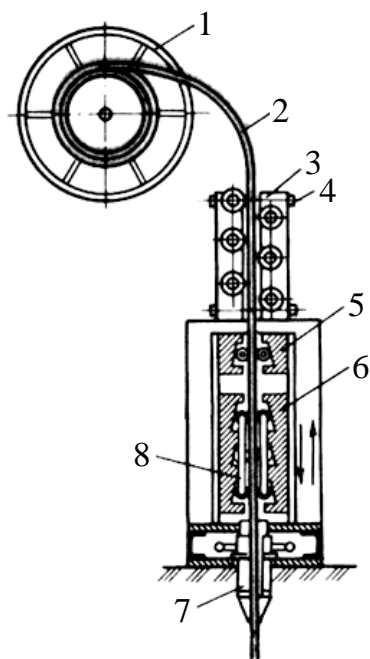


Рис. 71

При установке электрода гидроцилиндр размещают в горизонтальном положении, а электрод продевают через штоки и зажим. После этого гидроцилиндр устанавливают в рабочее положение и укрепляют фиксатором между стойками. Электрод вдавливается в грунт при рабочих ходах штока: вначале при полном, затем с постепенным уменьшением рабочего хода, величина которого зависит от сопротивления грунта и достигнутой глубины погружения.

11.5.2.3 ЗАГЛУБЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ НАВЕСНОГО ВДАВЛИВАТЕЛЯ К ТРАКТОРУ

Приспособление (рис. 72) позволяет вдавливать стальную проволоку в грунт, сматывая ее с барабана 1. При этом не нужно заострять концы проволоки, так как усилие вдавливания достаточно велико. Нижняя часть вдавливателя представляет собой плиту с конусообразной массивной направляющей, в цилиндрической части которой имеется опорная втулка 7 с рычагом для ее поворота на 180° вокруг оси. Вдавливание электрода в грунт осуществляется так: конец стальной проволоки 2 диаметром 10 мм из барабана 1 заправляют между роликами протяжного механизма 3 и через



фиксатор 5 вводят в захват 8, при этом ползун 6 находится в верхнем положении. Винтами 4 регулируют зазор между проволокой и обжимающими роликами, а затем приводят во вращение приводной вал. При этом ползун совершает движение вниз вверх, захват зажимает проволоку и она, проходя через ролик-протяжный механизм, выпрямляется и перемещается вниз в направляющей. После этого механизм останавливают, и конец проволоки, вошедшей в паз, закрывают втулкой, поворачивая ее рычаг. Таким образом, обеспечивается устойчивое положение конца проволоки, благодаря чему она не изгибается при погружении.

Рис. 72

Включают привод. При движении ползуна вниз захват зажимает проволоку и ползун вдавлирует ее в грунт, а ролики фиксатора расклиниваются. При движении ползуна вверх ролики фиксатора зажимают проволоку, а ролики захвата свободно перекатываются по ее стержню вверх. Таким образом, процесс взаимодействия захвата и фиксатора повторяется.

11.5.2.4 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ НОЖНОГО НАЖИМНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Приспособление (рис. 73), состоящее из сварного корпуса 2 и двух эксцентрично поворачивающихся на своих осях дисков захвата 3, позволяет

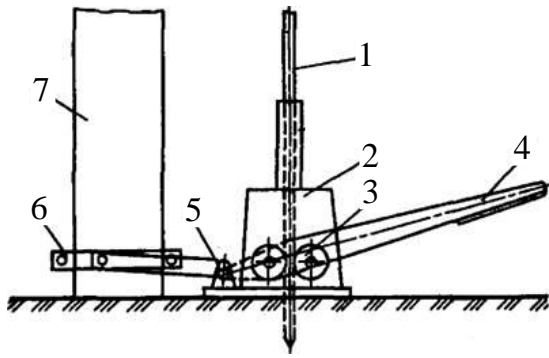


Рис. 73

захватывать и удерживать электрод *1* при нажатии, направленном вниз, и освобождать его при поднятии рычага-педали *4* вверх. При достаточной длине рычага-педали электрод легко вдавливается на большую глубину. Для упора этого приспособления при вдавливании его прикрепляют, например, к опоре линии электропередачи *7* с помощью хомута *б* и деревянного клина. Хомут соединяется с основанием приспособления через ось рычага *5*.

11.5.2.5 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ТРАКТОРА С ГИДРОЦИЛИНДРОМ

Зажимное устройство *2* с гидроцилиндром *1* (рис. 74) можно использовать в малых колесных тракторах с гидроцилиндром, обладающих хорошей маневренностью, проходимостью и скоростью передвижения. Гидроцилиндр с двумя полыми штоками устанавливается на трактор с

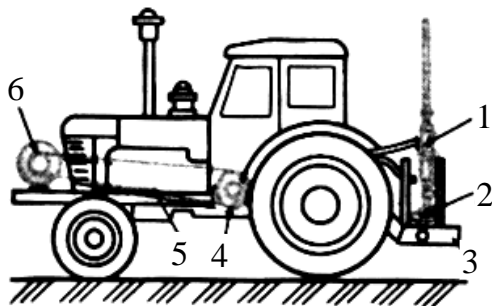


Рис. 74

помощью специальной рамы. В передней части трактора размещают сварочный генератор *б* с приводом от бокового вала отбора мощности *4* с помощью клиноременной передачи *5*. Так как гидроцилиндр может поворачиваться на угол 30° или 45° , то при максимальном усилии (25 кН) электроды диаметром $12\div 18$ мм и длиной до 6 м могут погружаться в грунт средней плотности вертикально и наклонно за $4\div 5$ мин.

11.5.2.6 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ БУРИЛЬНОЙ МАШИНЫ С САМОЗАЖИМНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Зажимное устройство *4* состоит из двух клинообразных кулачков для зажатия электрода *2* (рис. 75), передвигающихся по двум наклонным пазам от усилия пружины, и рычага зажима *5*. Оно прикрепляется к бурильной штанге *3* машины *1*, с которой предварительно снята бурильная головка. Зажатый электрод вдавливается в грунт возвратно-поступательным

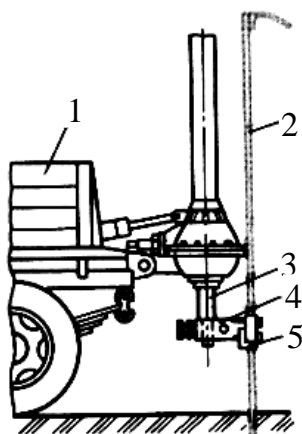


Рис. 75

движением бурильной штанги без ее вращения. При движении штанги вниз кулачки зажимного устройства удерживают электрод, а при движении вверх они отжимаются и освобождают электрод, остающийся в грунте. После заглубления на полную длину электрода нажимают рычаг зажима 5, которым раздвигают кулачки, при этом штанга освобождается. При демонтаже электрод вытаскивают из земли в той же последовательности, но при перевернутом зажиме.

Необходимость демонтажа электрода может возникнуть и при монтаже, например, если он погнется. В зависимости от плотности грунта вдавливание одного электрода длиной 6м происходит за 2÷5 мин.

Если для заземления защищаемого объекта достаточен один электрод, сварочные работы полностью выполняют в мастерской, а на месте лишь вдавливают электрод и присоединяют заземляющий проводник к оборудованию.

11.5.2.7 ВДАВЛИВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ БУРИЛЬНО-КРАНОВОЙ МАШИНЫ С ТРУБЧАТЫМ НАПРАВИТЕЛЕМ



Рис. 76

Приспособление (рис. 76) состоит из направляющей трубы 5 диаметром 3" с рядом продольных отверстий 6, в которые вставляют палец для перехвата электрода по мере его заглубления. Труба свободно перемещается в гильзе 7, закрепленной на штанге 2 бура хомутами 1. При опускании штанги опускается и гильза, скользящая по трубе, пока не упрется в палец, который, нажимая на конец электрода, вдавливает его в грунт. Нижний конец направляющей трубы с помощью косынки 4 прикрепляется к бурильной штанге. Бур 3 перед началом вдавливания отсоединяют от редуктора. Погружение электрода на глубину до 3 м осуществляется за четыре – шесть перехватов пальца в отверстиях трубы.

11.5.3 ВВЕРТЫВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ – ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ В ГРУНТ

Способ ввертывания электродов – заземлителей так же, как и любой другой способ, имеет свои преимущества и недостатки, определяющие его применение в конкретных условиях.

Несомненным преимуществом является сравнительная легкость освоения массового производства механизированных приспособлений. Это нашло отражение в заводском выпуске заглубителей электродов на базе ручных электросверлильных машин или малых бензодвигателей, широко применяемых на монтаже заземлительных устройств.

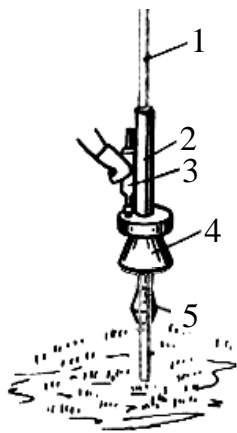
Вместе с тем легкие и удобные приспособления для ввертывания позволяют заглублять электроды лишь на сравнительно небольшую глубину, а это в ряде случаев увеличивает число электродов и расход металла.

Мощность этих приспособлений небольшая, и для облегчения ввертывания приходится применять наконечники на электродах, разрыхляющие грунт, что резко увеличивает электрическое сопротивление грунта на период, пока его естественная структура не восстановится, т.е. на время, определяемое месяцами. Необходимость быстрого ввода в эксплуатацию вызывает увеличение числа погружаемых электродов для достижения нужной проводимости заземлителя, а следовательно, и дополнительный расход металла.

Несмотря на приведенные недостатки, способ ввертывания во многих конкретных случаях позволяет быстро и экономично смонтировать заземляющее устройство.

11.5.3.1 ВВЕРТЫВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЗАГЛУБИТЕЛЕЙ

Наибольшее распространение получили электрозаглубители ПЗ-12 на базе сверлилки И-28А и УВЭГ-16 на базе электросверлилки ИЭ-1023, позволяющие ввертывать электроды диаметром 12÷16 мм на глубину до 5 м. Конструктивно заглубители (рис. 77) состоят: из трубы 2, к которой сбоку прикреплена электросверлилка 3, а снизу расположенный в кожухе 4 автоматический зажим 5, которым и закрепляется электрод 1. Зажим представляет собой полый вал, на который насажена одна шестеренка, а другая соединена со шпинделем электросверлилки. С помощью шестеренок (редуктора) снижается частота вращения вала электросверлилки, которая на



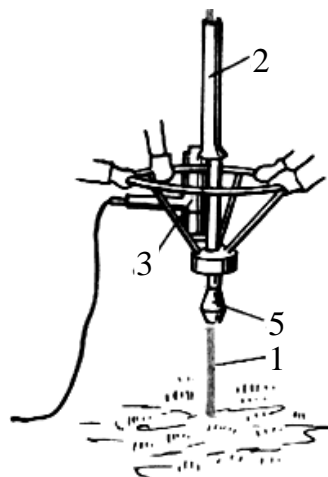
электрودة не превышает 100 об/мин, при этом увеличивается его крутящий момент. Вращающиеся части заглубителей закрываются кожухом.

Перед ввертыванием подготовленный электрод вставляют верхним концом в заглубитель, лежащий в горизонтальном положении, со стороны автоматического зажима так, чтобы конец выходил на $1,3 \div 1,5$ м из зажима. Зажим заглубителя вместе с электродом устанавливается в рабочее положение в точке ввертывания, а электрод под

Рис. 77 действием осевого усилия вниз захватывается автоматическим зажимом, при этом включается электросверлилка и электрод вворачивается на глубину около 1 м (механизм заглубителя приближается к земле на расстояние $0,3 \div 0,5$ м). Затем механизм заглубителя за ручки электросверлилки перемещают вверх по электроду на расстояние около 1 м. Глубина каждого погружения зависит от роста работающего и плотности грунта.

При необходимости демонтажа электрода с него снимают механизм, переворачивают автоматическим зажимом вверх и выполняют работы в обратном порядке (вращающийся электрод вынимают из земли и, нажимая на ручки электросверлилки снизу вверх, переставляют заглубитель ступенями вниз по электроду). При работе с такими заглубителями следят, чтобы при нажатии на рукоятки электросверлилки не создавался момент, способный изогнуть электрод.

При ввертывании электродов в плотный грунт требуются значительные усилия, что затруднительно для одного работающего. Поэтому



рассмотренные заглубители снабжают приспособлениями в виде колеса с упорами, изготовленными из стальных или дюралевых труб (рис. 78), вследствие чего вместо одного рабочего работают двое, а длина ввертываемого электрода увеличивается на $1 \div 1,5$ м. При ввертывании электродов в мерзлый грунт (с глубиной промерзания свыше 10 см) необходима предварительная проходка этого слоя, для чего применяют специальные длинные сверла с наконечниками из твердого сплава, диаметр которых

Рис. 78

больше, чем диаметр электрода, спиральным шнеком длиной около 60 см и удлинителем круглого сечения диаметром, равным диаметру электрода. Такие сверла вставляют в автоматические прижимы и закрепляют в них вместо электродов.

Промерзшую часть грунта просверливают. Затем сверла удаляют, вставляют электроды и ввертывают их в нижележащий талый грунт. Если устанавливается большое количество электродов в мерзлый грунт, то рекомендуется один заглубитель оснастить сверлом, а другими только ввертывать электроды.

Для облегчения ввертывания электродов в плотные грунты используют серийные заглубители или более мощные электродвигатели (рис. 79, поз. 7) с редукторами, которые устанавливают на специальных направляющих рамах,

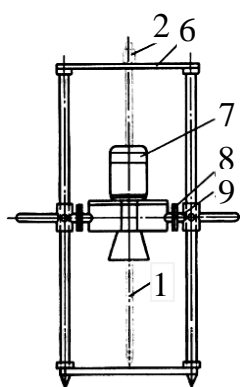


Рис. 79

смонтированных на основаниях (рис. 79, поз. 9). Поперечина основания, на которой крепится заглубитель или электродвигатель с редуктором, может быть поворачивающейся благодаря узлу вращения (рис. 79, поз. 8), что позволяет заглублять электроды (рис. 79, поз. 1) как вертикально, так и наклонно. Направляющая труба (рис. 79, поз. 2) на перекладине (рис. 79, поз. 6) позволяет применять более тонкие электроды (диаметром 10÷12 мм и длиной до 6 м).

11.5.3.2 ВВЕРТЫВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ БЕНЗОМОТОРНЫХ ПОГРУЖАТЕЛЕЙ

В случаях, когда нельзя использовать заглубители с электроприводом, применяют заглубители с двигателями внутреннего сгорания для мотопил "Дружба", "Урал", "Тайга". Наиболее распространены заглубители с бензиновым двигателем "Дружба", например, приспособление серии ПЗД-12У1 для ввертывания электродов диаметром 12÷16 мм (рис. 80, а, б).

При снижении частоты вращения с помощью редуктора значительно увеличивается крутящий момент в приспособлениях (рис. 80, б), изготовленных на базе переносных ручных геологоразведочных установок ПБУ-10 для ввертывания электродов диаметром 12÷18 мм.

Работа приспособления ПЗД-12У1 основана на том, что при осевом нажатии на рукоятку двигателя происходят автоматический зажим и вращение электрода, что обеспечивает ввертывание его в грунт.

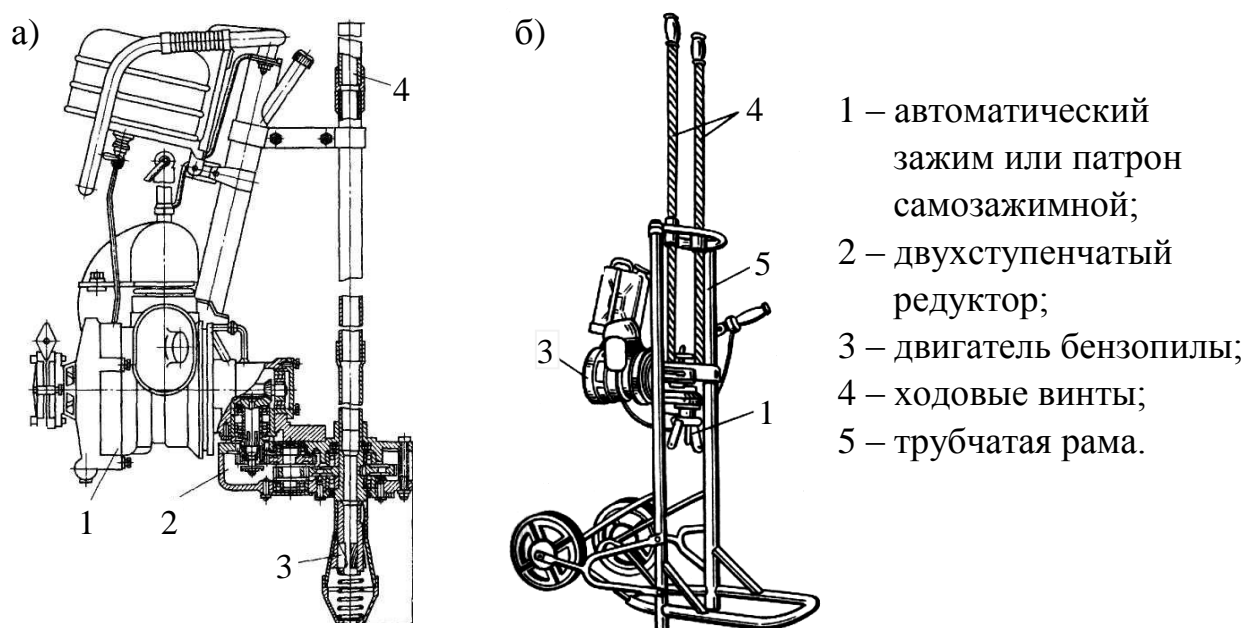


Рис. 80 Бензомоторный погружатель серии ПЗД-12У1

Приспособление (рис. 80) состоит из трубчатой рамы 5, по которой с помощью ходовых винтов 4 может передвигаться вращатель, приводимый от двигателя 3 бензопилы. Вращатель имеет двухступенчатый редуктор 2, снижающий его частоту вращения до 80÷200 об/мин (на редукторе приспособления ПЗД – 540 об/мин). К вращателю приспособления вместо шнекового бура крепится с помощью самозажимного патрона или автоматического зажима 1 ввертываемый электрод. По мере погружения электрода сопротивление грунта увеличивается. В приспособлении ПЗД оно преодолевается лишь его тяжестью и ручным усилием рабочего, поэтому наибольшая глубина погружения электрода обычно не превышает 5÷6 м (рис. 80, а). Скорость ввертывания электрода наибольшего диаметра в землю, м/мин –1.

В приспособлении ПБУ-10 (рис. 80, б) усилие подачи электродов вниз может быть значительно увеличено вращением винтов, что позволяет погружать их на глубину до 10 м в сравнительно плотные грунты. Цельным электродом такой длины пользоваться неудобно, так как нужна очень длинная направляющая труба, предотвращающая изгиб электрода, поэтому обычно применяют составные электроды или цельные длиной до 6м с

небольшой направляющей трубой, укрепляемой выше рамы. В зависимости от плотности грунта и достигнутой глубины скорость погружения электрода составляет, м/мин – 0,9÷2,4. Для переоборудования ручной буровой установки в заглубитель электродов требуется не более 1 ч, чтобы установить автоматический зажим.

11.5.4 БЕСТРАНШЕЙНЫЙ СПОСОБ ПРОКЛАДКИ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

11.5.4.1 ПРОКЛАДКА С ПОМОЩЬЮ НОЖЕЙ ДЛЯ ПРОРЕЗАНИЯ ПОЧВЫ

Для прорезания грунта и протягивания заземлителя при бестраншейной прокладке применяют различные конструкции ножей, которые навешивают на тракторы, автомобили и другие машины. В конструкции приведенной на (рис 81, а) нож 4, выполненный из рельса Р - 55, крепится с помощью накладки 5 и болтов 3 к отвалу 1 бульдозера. Он имеет общую длину около 1,5 м, заострен в нижней части 6 и усилен в верхней части стальными планками длиной около 1 м каждая. Часть нагрузки на нож при работе принимают на себя упоры 2.

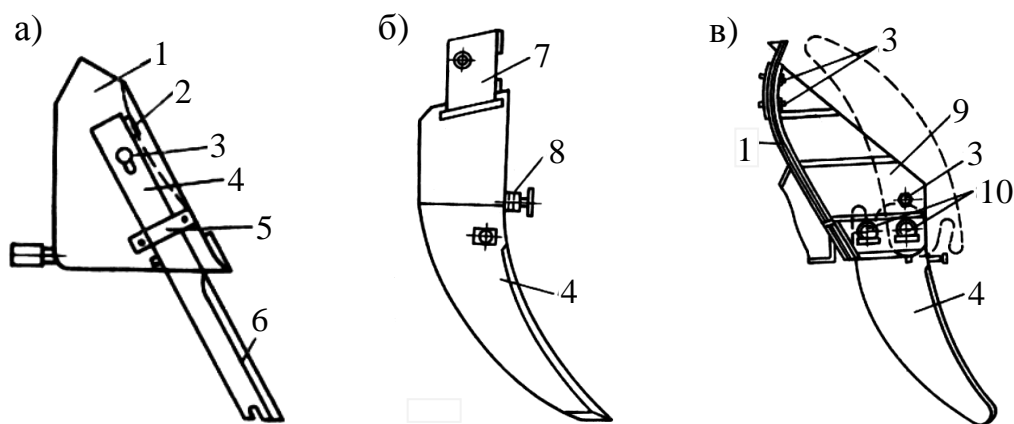


Рис. 81 Конструкция ножей для прорезания почвы

Другая конструкция ножа (рис. 81, б) закрепляется на гидронавеске трактора К-700. Она представляет собой сварное устройство, состоящее из режущей части 4, кронштейна для крепления ножа к гидронавеске 7 и зажима 8 со стопором для присоединения к ножу конца прокладываемого протяженного электрода заземлителя. При движении трактора нож с помощью гидронавески заглубляется и протягивает за собой на нужной глубине электрод. В конце прокладки с помощью гидроцилиндра трактора

нож вместе с концом электрода вынимают из грунта и электрод отсоединяют от приспособления. На обратном пути трактор уплотняет взрыхленный грунт.

Для тракторов меньшей мощности изготавливают ножи (рис. 81, в) из листовой стали, которые крепятся к кронштейну, выполненному из стальной плиты 9, на отвале 1 бульдозера с помощью болтов 3. Ножи с помощью специальных шайб и шплинтов 10 могут легко перемещаться вверх в нерабочее положение. Конец электрода также прикрепляется к ножу, который при движении бульдозера вперед прорезает грунт и протягивает его за собой на нужной глубине. При движении в обратную сторону трактор уплотняет 9 землю над электродом, а нож в это время находится в откинутом вверх положении.

11.5.4.2 ПРОКЛАДКА С ПОМОЩЬЮ КАБЕЛЕУКЛАДЧИКОВ

При больших объемах работ для непосредственной прокладки заземлителей с помощью ножей применяют прицепные (рис. 82, а) и навесные (рис. 82, б) кабелеукладчики. Небольшие прицепные кабелеукладчики рассчитаны на прокладку глубиной до 700 мм. Для прокладки электрода-заземлителя (провода) на глубину до 1 м заводские колеса кабелеукладчика заменяют на колеса меньшего диаметра.

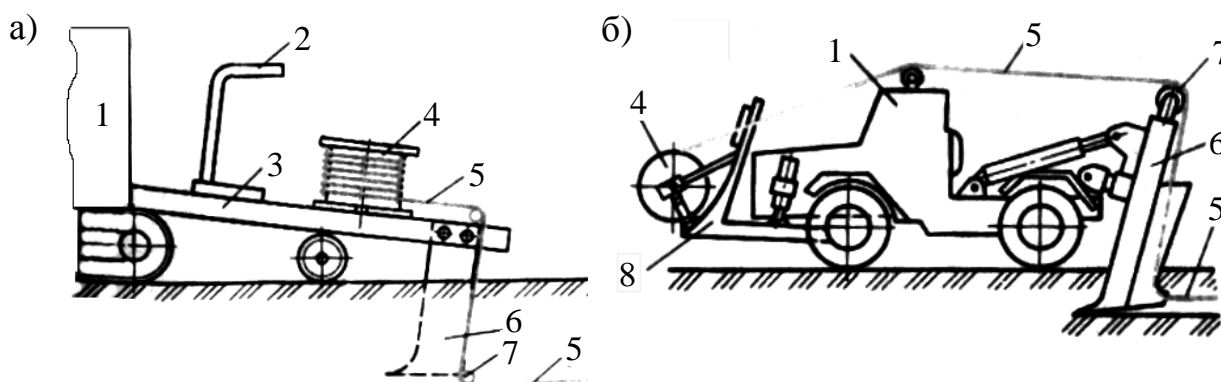


Рис. 82 Прокладка заземлителей с помощью кабелеукладчиков

У прицепного кабелеукладчика (рис. 82, а) барабан 4 с намотанной на него проволокой 5 из мягкой малоуглеродистой стали диаметром 10 мм или оцинкованной проволокой диаметром 6-8 мм поднимают ручной лебедкой 2 на раму 3. Проволоку заводят в нож 6 и пропускают через направляющий ролик 7. Конец проволоки прикрепляют к какому-либо прочному предмету на поверхности земли (к фундаменту опоры ВЛ или специальному якорю).

Затем трактором *1* тянут кабелеукладчик с заглубленным в грунт ножом, прокладывая проволоку. Недостатком этого способа прокладки является необходимость разрыхления небольшого объема грунта вручную для заглубления ножа в начале процесса.

При использовании навесного кабелеукладчика (рис. 82, б) можно поднимать и опускать нож *б* с помощью гидросистемы трактора *1*. Барабан *4* со стальной проволокой (заземлителем) *5* размещается на бульдозерном отвале *8*, откуда проволока пропускается по роликам *7* через нож. При движении трактора нож прорезает грунт и одновременно прокладывает проволоку на нужную глубину, которая сматывается со свободно вращающегося барабана. Ее конец в начале прокладки прикрепляют к якорю или другому прочному предмету. При переоборудовании кабелеукладчиков проверяют возможность использования предназначенных для движения кабелей роликов и других деталей и при необходимости приспособливают их для монтажа жесткой стальной проволоки заземлителей.

11.5.4.3 ПРОКЛАДКА С ПОМОЩЬЮ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

Для бестраншейной прокладки горизонтальных заземлителей можно использовать некоторые строительно-дорожные машины и их детали, например прицепное приспособление к трактору (рис. 83, а) с гидросистемой навески.

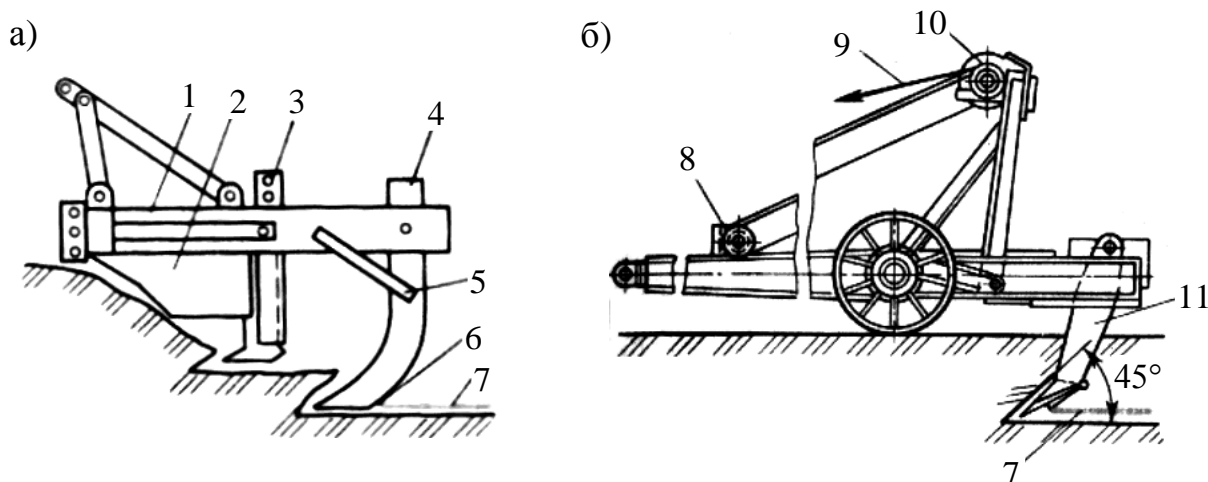


Рис. 83 Прокладка заземлителей с помощью строительно-дорожных машин

Прицепное приспособление (рис. 83, а) состоит: из переднего *2*, среднего *3* и заднего *4* ножей, закрепленных на Т-образной раме *1*, сваренной

из швеллера № 20. Передний нож используется из машины для посадки молодых кустарников, а средний изготавливается из зуба корчевателя. При движении механизма оба ножа выполняют предварительную работу: передний подрезает корни кустарников и приподнимает приспособление в случае попадания больших камней или других препятствий, средний разрыхляет грунт на глубину до 700 мм и ширину 100 мм. Задний нож, дополнительно прикрепляемый к раме с помощью откоса 5, имеет специальный зажим 6 для закрепления проволоки 7 заземлителя и изготавливается в виде втулки длиной 60 мм и внешним диаметром 30 мм с толщиной стенки 10 мм.

При креплении проволоки вводят в отверстие втулки снизу ее конец, изогнутый под углом 90° на длине 50-60 мм. Задний нож прорезает грунт еще глубже и протягивает за собой проволоку заземлителя.

Для прокладки проволоки заземлителей применяют и прицепной плуг-рыхлитель, используемый в дорожных и лесных хозяйствах (рис. 83, б). В таком механизме оставляют только один зуб-лемех 11, к которому приваривают зажим-втулку для крепления конца проволоки 7 заземлителя указанным выше способом. Зуб-лемех опускается и поднимается лебедкой трактора с помощью каната 9 и блоков 8 и 10. При движении трактора нож погружается на заданную глубину, прорезает грунт и протягивает проволоку заземлителя, при этом земля не выбрасывается наружу. Грунт утрамбовывается при движении трактора в обратную сторону.

11.5.4.4 ПРОКЛАДКА С ПОМОЩЬЮ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Этот способ применяют, когда нужно соединить между собой несколько находящихся рядом вертикальных электродов. В месте их погружения (рис. 84) выкапывают механизированным или ручным буром

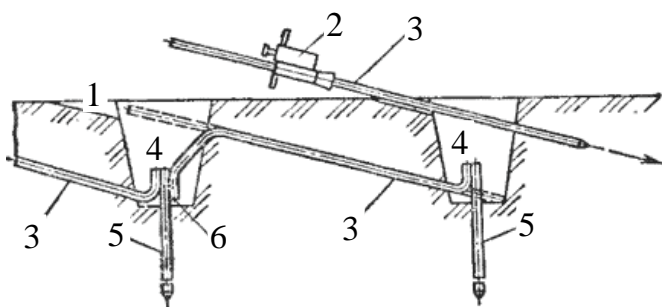


рис. 84

приямки 4 на глубину до 1 м. Затем с помощью ручного механизированного заглубителя 2 погружают между приялками стержневые перемычки 3. На краях приямков для удобства погружения предварительно делают срезы 1.

Концы перемычек загибают к электродам 5 и приваривают к ним электросваркой 6 на длине, не меньшей шести их наружных диаметров.

11.5.5 МОНТАЖ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ В ЗЕМЛЯНЫХ ТРАНШЕЯХ

При небольших объемах работ прокладка горизонтальных заземлителей с помощью мощных ножевых укладчиков нерентабельна. В других случаях их нельзя применить из-за подземных коммуникаций и других препятствий или из-за невозможности изготовить ножи в мастерской. Во всех этих случаях заземлители прокладывают в траншеях, применяя механизмы, выпускаемые промышленностью, в том числе и небольшие машины малой мощности и недорогие.

Экскаваторы, баровые (землеройные) машины и различные траншеекопатели обеспечивают рытье траншей нужной для заземляющих устройств глубины и обладают высокой производительностью. Однако при удаленности и малом объеме работ по монтажу заземлителей доставка мощных машин к месту работы себя не оправдывает, а применение их в стесненных условиях ограничено, вследствие чего часто применяется ручной труд. В таких условиях можно рекомендовать применение микро-траншеекопателей.

Для укладки лучевого заземлителя в мерзлом грунте можно воспользоваться баровой машиной, т.е. трактором с навесным баром или двумя барам, прорезающими на глубину до 1,7 м узкие траншеи – щели шириной 10÷14 см каждая. Режущим инструментом такой машины, является режущий бар (цепь с резцами) от угольной врубной машины, дополнительное приспособление в виде облегченного ножа для прокладки заземлителей можно укрепить к кронштейнам подъема бара сзади последнего. Контур ножа должен соответствовать контуру бара, а нижняя линия ножа в рабочем положении должна располагаться параллельно дну щели. Если снабдить устройство закрылками для засыпки грунтом прорезаемой баром щели, то весь процесс монтажа заземлителя будет выполняться за один ход машины. После укладки заземлителей в траншеи необходимо уплотнение грунта, например трюмбованием за счет давления гусениц трактора.

При невыполнении уплотнения засыпаемого грунта сопротивление растеканию тока заземления будет иметь повышенное значение, и вследствие последующей усадки грунта могут образовываться провалы.

11.5.5.1 ПРОКЛАДКА ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ С ТРУБОПРОВОДАМИ ИЛИ КАБЕЛЯМИ

Траншеи для протяженных заземлителей выполняют обычно специальными землеройными машинами. При этом заземлители не должны быть окрашены. В местах пересечения горизонтальных заземлителей с подземными сооружениями (рис. 85, поз. 3) (кабелями, трубопроводами), с

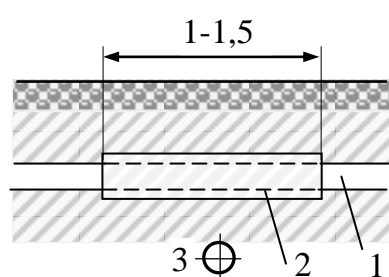


Рис. 85

дорогами и в других местах, где возможны механические повреждения, заземлители (рис. 85, поз. 1) защищают металлическими или асбесто-цементными трубами (рис. 85, поз. 2) на длине $1 \div 1,5$ м. Прокладку заземлителей параллельно кабелям и трубопроводам выполняют на расстоянии в свету не менее $0,3 \div 0,35$ м.

11.6 ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Монтажная организация, выполнившая заземляющее устройство, должна предъявить приемочной комиссии следующую техническую документацию: исполнительные чертежи и схемы с указанием расположения подземных коммуникаций; акты на выполнение скрытых или малодоступных элементов, в частности заземлителей в грунте, скрыто проложенных заземляющих проводников; протоколы измерения сопротивления растеканию тока промышленной частоты заземлителей; протоколы проверки цепей фаза – нуль в сетях 380/220В с заземленной нейтралью, проверки действия защиты при замыканиях на землю и защитно-отключающих устройств при прикосновениях; акты проверки элементов выравнивания потенциалов и других устройств, которые предусмотрены проектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок: ПУЭ: утв. Минэнерго России 08.07.02: введ. в действие с 01.01.03 – 7-е изд., измен. и доп. – М.: Главгосэнергонадзор, 2002.

2. Сибкин Ю.Д. Справочник по эксплуатации электроустановок промышленных предприятий: 5-е изд., испр. и доп. / Ю.Д. Сибкин, М.Ю. Сибкин. – М.: Высшая школа, 2002.

3. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 364 с.

4. Якобс А.И. Энергетическая техника и ее развитие / А.И. Якобс, А.В. Луковников. – М.: Колос, 1981. – 239 с.

5. Щуцкий В.И. Электропривод и электрификация горных работ: Учебник для вузов / В.И. Щуцкий, Ю.Д. Глухарев, А.К. Малиновский, Л.А. Плащанский. – М: Недра, 1991. – 319 с.

6. Электротехника и основы электроники: практикум по дисциплине: учеб. пособие / А.Г. Черных. – Иркутск: ИрГСХА, 2010. – 272 с.

7. Евдокунин Г.А. Электрические системы и сети: учеб. пособие для студентов электроэнергетических специальностей вузов / Г.А. Евдокунин. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2004. – 304 с.

8. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98.. – М: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 131с.

9. Епифанов А.Д. Технология монтажа электрооборудования и средств автоматизации: практическое пособие: в 2-х ч. Ч.2; / А.Д. Епифанов, А.Г. Черных. – Иркутск: ИрГСХА, 2011. – 203с.

10. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в сетях электроснабжения общего назначения.

11. Епифанов А.Д. Технология монтажа электрооборудования и средств автоматизации: практическое пособие: в 2-х ч. Ч.1; / А.Д. Епифанов, А.Г. Черных. – Иркутск: ИрГСХА, 2011. – 173с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Научные и практические направления в решении вопросов электробезопасности	5
2. Основные понятия и определения	8
3. Режимы нейтрали электрических сетей	11
3.1 Трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью.....	13
3.1.1 Электрическая сеть с изолированной нейтралью напряжением 220÷1000 вольт... ..	13
3.1.2 Оценка предельных значений параметров изоляции сети с напряжением 220÷1000 вольт.... ..	16
3.1.3 Прикосновение к фазе или корпусу незаземленного оборудования	22
3.1.4 Прикосновение к заземленному корпусу.....	28
3.2 Экспериментальная оценка параметров изоляции сети.....	32
4. Предельные значения параметров изоляции трехфазных четырехпроводных сетей с изолированной нейтралью и их экспериментальная оценка	36
5. Токи через человека и предельные значения изоляции фаз сети при асимметрии изоляции	48
5.1 Трехпроводная трехфазная сеть	48
5.2 Четырехпроводная трехфазная сеть	52
6. Расчет несимметричных режимов работы электрических сетей и их анализ на электробезопасность.....	58
6.1 Применение метода симметричных составляющих для расчета несимметричных режимов работы трехфазных сетей.....	58
6.1.1 Расчет установившихся режимов работы трехфазных сетей с поперечной несимметрией	64
6.1.2 Сопротивления элементов электрических сетей для прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз	69
6.2 Расчеты режимов в схемах с однократной продольной и поперечной несимметрией	79
6.2.1 Определение параметров схем замещения нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов	83
7. Трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью с занулением	90

7.1 Системы заземляющих устройств, конструкции и защитные характеристики устройств защитного отключения	96
7.1.1 Меры обеспечения защиты от косвенного прикосновения	98
7.1.2 Типы систем заземления	99
7.1.3 Классификация УЗО	104
7.1.4 Принцип действия УЗО дифференциального типа.....	105
7.1.5 Основные и дополнительные параметры УЗО.....	108
7.1.6 Типы УЗО по условиям функционирования.....	113
7.1.7 Селективность работы УЗО.....	116
7.2 УЗО серии Multi 9 тип ID	118
7.3 Автоматический, дифференциальный выключатель-моноблок DPN N Vigi серии Multi 9.....	121
7.4 Выключатель дифференциальный ВД1-63	123
7.5 Дифференциальный автомат АД-12/14.....	125
7.6 Автоматический выключатель дифференциального тока АВДТ-32.....	127
7.7 Проверка работоспособности и схемы включения УЗО.....	130
8. Требования ПУЭ к величинам сопротивления заземления электроустановок	137
9. Отклонения напряжений и уровни их допустимых значений.....	142
10. Техничко-экономическое сравнение схем сетей трехфазных четырехпроводных с глухозаземленной нейтралью с занулением и с изолированной нейтралью без зануления	145
11. Монтаж защитного зануления и заземления.....	158
11.1 Заземляющие устройства	158
11.2 Повторное заземление	159
11.3 Заземлители	160
11.4 Искусственные заземлители.....	160
11.5 Монтаж заземляющих устройств	163
11.5.1 Монтаж вертикальных заземлителей.....	163
11.5.2 Вдавливание электродов	175
11.5.2.1 Вдавливание с помощью цангового зажима	175
11.5.2.2 Вдавливание с помощью зажимного приспособления с цилиндром	176
11.5.2.3 Заглубление с помощью навесного вдавливателя к трактору	177
11.5.2.4 Вдавливание с помощью ножного нажимного приспособления	177

11.5.2.5 Вдавливание с помощью трактора с гидроцилиндром	178
11.5.2.6 Вдавливание с помощью бурильной машины с самозажимным устройством	178
11.5.2.7 Вдавливание с помощью бурильно-крановой машины с трубчатым направителем	179
11.5.3 Ввертывание электродов-заземлителей в грунт	180
11.5.3.1 Ввертывание с помощью электрозаглубителей	180
11.5.3.2 Ввертывание с помощью бензомоторных погружателей.....	182
11.5.4 Бестраншейный способ прокладки заземлителей	184
11.5.4.1 Прокладка с помощью ножей для прорезания почвы	184
11.5.4.2 Прокладка с помощью кабелеукладчиков	185
11.5.4.3 Прокладка с помощью строительно-дорожных машин	186
11.5.4.4 Прокладка с помощью соединительных вертикальных электродов.....	187
11.5.5 Монтаж горизонтальных заземлителей в земляных траншеях	188
11.5.5.1 Прокладка при пересечении с трубопроводами или кабелями	189
11.6 Ввод в эксплуатацию	189
<hr/>	
Литература	190

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Бузунова Марина Юрьевна
Черных Алексей Георгиевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Учебное пособие

КНИГА 2

Научный редактор – А.Г. Черных
Ответственный за выпуск – А.Г. Черных
Компьютерная верстка – Е.И. Черных

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать . . .13 г.

Усл.печ. л. Заказ №

Изд. №

Тираж 300 экз.

ISBN

Издательство Иркутской государственной
сельскохозяйственной академии
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный