

Федеральное агентство по образованию  
Российской Федерации

ГОУ ВПО Ангарская государственная техническая  
академия

Коренев Н.П., Болоев Е.В.

Эксплуатация систем электроснабжения:  
техника обеспечения безопасности

учебное электронное пособие

Ангарск  
2009

УДК 621.3.053

Коренев, Н.П. Эксплуатация систем электроснабжения: техника обеспечения безопасности [Электронный ресурс]: подгот. по печ. изд. / Н.П. Коренев, Е.В. Болоев – Электрон. текстовые, граф. дан. – Ангарск: изд-во Ангарской гос. техн. акад., 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Pentium® III; 128 МБ; Windows XP; Adobe Reader 8; 4хCD-ROM дисковод; мыш. – Загл. с экрана. – Диск помещен в контейнер.

Изложены вопросы теории и практики эксплуатации и обеспечения электробезопасности в трехфазных электросетях, приведены методы экспериментальной и расчетной оценки предельных значений параметров электрических сетей и заземления, обеспечивающих безопасность электрооборудования и обслуживающего персонала.

Пособие предназначено для студентов, специалистов электроэнергетических служб предприятий, преподавателей, слушателей факультетов повышения квалификации, научных работников и специалистов проектных и конструкторских организаций, аспирантов.

Электронное издание подготовлено на базе учебного пособия: Коренев, Н.П. Эксплуатация систем электроснабжения: техника обеспечения безопасности [Текст]: Учебное пособие / Н.П. Коренев, Е.В. Болоев – Ангарск: изд-во Ангарской гос. техн. акад., 2009. – 198 с.

Рецензенты: в.н.с. Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, к.т.н. О.Н. Войтов.

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Ангарской государственной технической академии.

© Н.П. Коренев, 2009

© Е.В. Болоев, 2009

© Ангарская государственная  
техническая академия, 2009

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В области электробезопасности персонала и эксплуатации систем электроснабжения 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.

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

Пособие базируется на теоретических основах электротехники, научных достижениях в нашей стране и за рубежом, практике эксплуатации систем электроснабжения, на действующих нормативно-технических документах, теоретических и экспериментальных исследованиях, выполненных авторами в течение ряда последних лет.

В учебном пособии не предусматривается изложение всех аспектов проблемы расчетов по электробезопасности в трехфазных электросетях.

## 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, электробезопасности 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 последующими контролем положительных свойств электрооборудования и сетей, профилактическими мероприятиями, предусматривающими нормированный контроль, ремонт и защиту электрооборудования и электросетей от повреждений агрессивными средами, 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) обеспечением недоступности, нормированием и контролем 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 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 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, главные из которых являются:

1. Нормирования 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 конкурентно способных мероприятий безопасности.
2. Вероятностный метод решения проблемы критериев электробезопасности, при котором в качестве количественного показателя уровня электробезопасности рекомендуется вероятность электробезопасной рабо-

ты человека за данный период времени. На основе этого метода определяются допустимые параметры электробезопасности электроустановок по показателям общих статистических данных электротравматизма, а не дифференциацией конкретных величин параметров электробезопасности применительно к конкретным электроустановкам и конкретного анализа электротравматизма в установках эксплуатации.

3. Отрицания нормирования токов и напряжений прикосновения для человека и создание таких условий труда и эксплуатации электрооборудования, которые исключали бы протекание тока через человека вообще, в этом случае предполагается абсолютное безаварийное состояние электроустановок в процессе эксплуатации при любых условиях. Однако в этом случае требуется мобилизация огромных средств, и общество не в состоянии это удовлетворить.

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. создания таких параметров электроустановок, при которых даже в аварийных режимах не могли возникнуть опасные воздействия на человека, либо человек должен быть предупрежден о предстоящем возникновении опасности (защитные отключения, контроль фактических показателей и сравнение их с предельно допустимыми, сигнализация и т.д.).

Второе и третье направления могут быть применимы при планировании материальных средств на технические и организационные мероприя-

тия 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 (ПУЭ) режимов нейтрали электрических сетей, параметров заземлений, защитных мер электробезопасности, норм испытаний и т.п.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*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.

*Номинальной мощностью  $S_{\text{ном}}$  электроустановки* 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, сюда включается и напряжение 1140 В: 127; 220/127 В; 380/220 В; 660/380 В; 1140/660 В. Эти напряжения являются напряжениями распределительных сетей до 1140 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. Ступень 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 эффективно 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 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 растекания тока заземляющего устройства), расчет однофазного (однополюсного) тока к.з.  $I_{кз}^{(1)}$ , 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; 1140/660 В; 660/380 В; 380/220 В; 220/127 В; 36 В, т.е. 8 электрических сетей.

### 3. РЕЖИМЫ НЕЙТРАЛЕЙ 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 электроэнергетика", "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, 4].

*Заземлителем* называют электрод или совокупность электродов, соединенных между собой, которые имеют непосредственный контакт с землей [1].

*Заземляющими проводниками* называют проводники, соединяющие корпуса электрооборудования и электрических машин, с заземлителем.

*Заземляющим устройством* называется совокупность заземлителей и заземляющих проводников.

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 1140 В, а также при 6 – 35 кВ. Корпуса всех электроустановок до 1140 В должны быть присоединены к главному заземлителю заземляющими и магистральными заземляющими проводниками [1].

#### 3.1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 – 1140 В

На [рис. 1](#) сеть с изолированной нейтралью, где нейтральная точка "О" соединена с заземляющим устройством ГЗ через пробивной предохранитель-разрядник, показаны активные и реактивные сопротивления изоляции между фазами сети и землей.

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 ([см. 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).

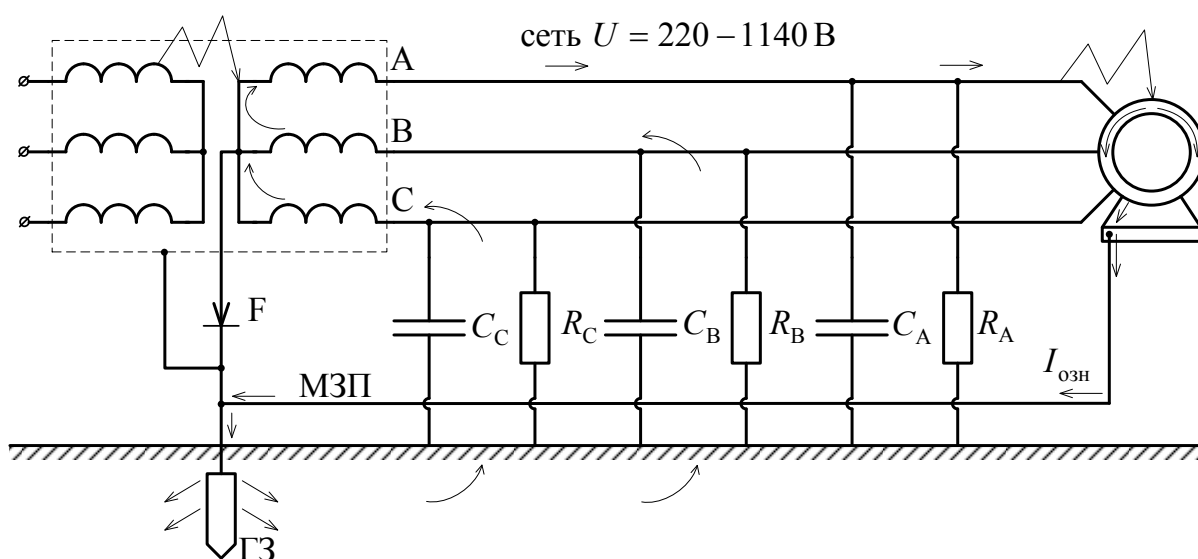


Рис. 1. Сеть с изолированной нейтралью:  $I_{\text{ОЗН}}$  – ток однофазного замыкания на землю (корпус); F – предохранитель-разрядник; МЗП – магистральный заземляющий провод; ГЗ – главный заземлитель



Рис. 2. Конденсатор

Пробивной предохранитель – разрядник конструктивно состоит из двух металлических пластин, между которыми помещена слюдяная прокладка с четырьмя отверстиями по периферии и одним отверстием в центре для крепления (см. рис. 3). Одна пластина соединяется с нейтралью

трансформатора, вторая – с заземленным корпусом. Слюдяная прокладка служит для точной установки искрового промежутка между пластинами.

Пробивные предохранители-разрядники низкого напряжения (см. 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.

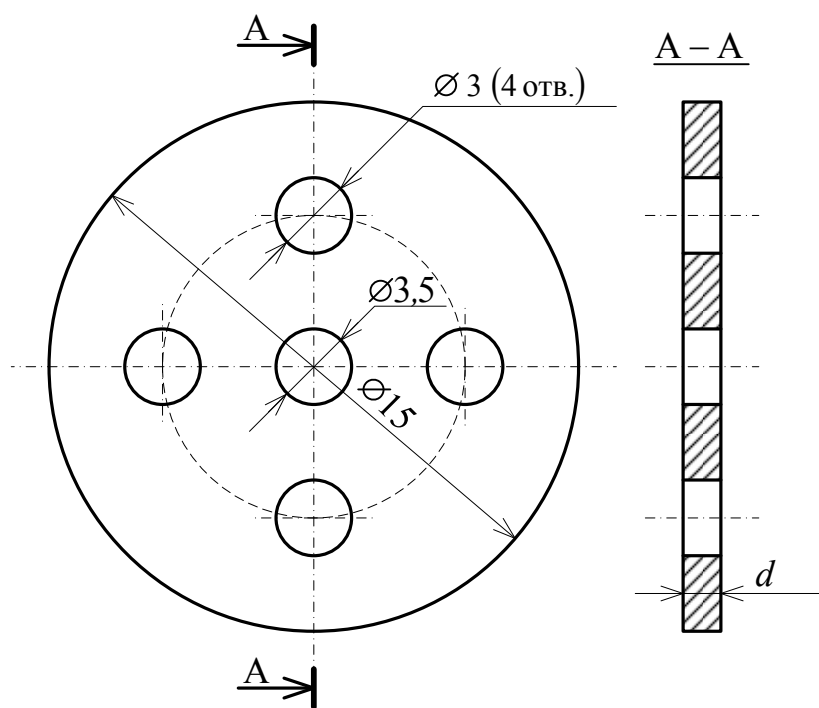


Рис. 3. Слюдяная прокладка

Пробивные предохранители 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) соединена с заземленным корпусом трансформатора.

В сетях с изолированной нейтралью для обеспечения безопасности

применяется *защитное заземление* электроустановок. *Защитным заземлением* называют металлическое соединение корпусов электрооборудования или электрифицированных машин с заземляющим устройством.

Таблица 1

Технические данные пробивных предохранителей - разрядников низкого напряжения

Исполнение	Номинальное напряжение сети, В	Пробивное напряжение в пределах, В	Расстояние разрядных промежутков $d$ , мм
I	до 220	351 – 600	$0,08 \pm 0,02$
II	до 500	701 – 1000	0,22
III	до 660	1000 – 1300	0,33

Если бы отсутствовало заземление электрической машины, 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  $C_b$ ,  $C_c$  и сопротивления  $R_b$ ,  $R_c$  ко второму полюсу источника ЭДС (фаза А). Путь тока показан на [рис. 1](#) стрелками. 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  $I_z$  проходит с корпуса через заземлитель, т.е.

$$I_{\text{озн}} = I_h + I_z.$$

Следовательно, защитное заземление предназначено для создания параллельного пути току в земле 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" ([см. рис. 4](#)).

Сопротивление тела человека  $R_h$  примем равным 1000 Ом, 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.

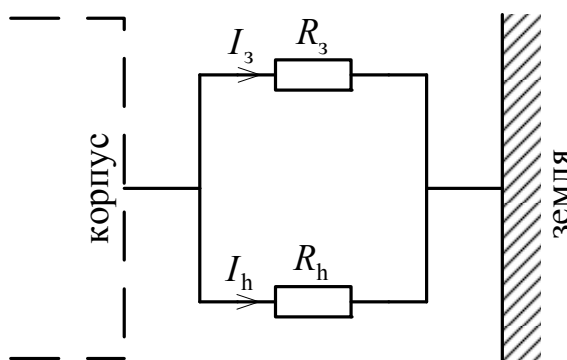


Рис. 4. Схема "корпус-земля"

### 3.1.2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 220 – 1140 В

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

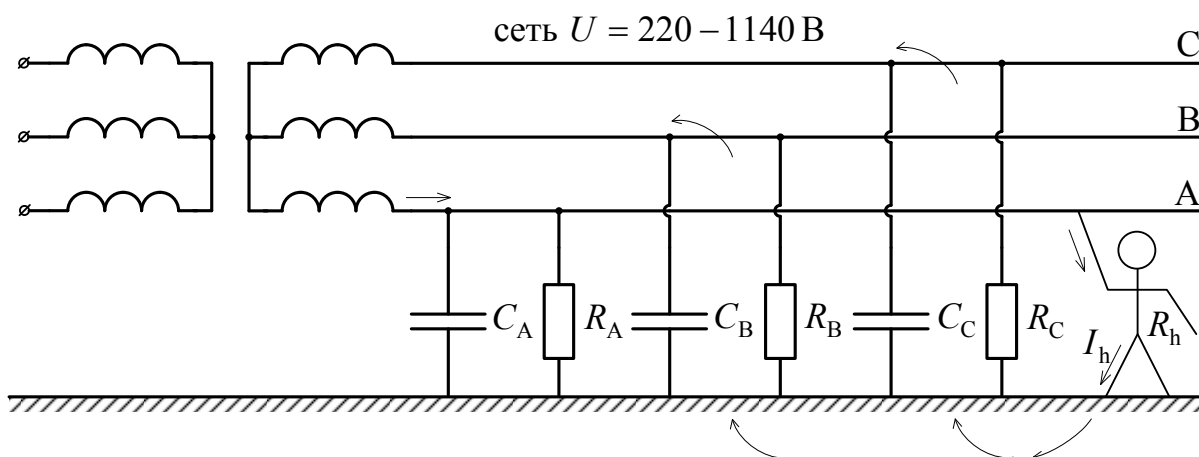


Рис. 5. Прикосновение к фазе в сети с изолированной нейтралью трансформатора

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

$$\sum i = i_A + i_B + i_C + i_h = 0. \quad (1)$$

Для упрощения расчета примем, что емкость фазных проводов по отношению к земле равна нулю, т.е.  $C_A = C_B = C_C = 0$ , а так же активные сопротивления фаз по отношению к земле одинаковыми, 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:

$$i_A = \frac{\dot{U}_A}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_{из}}; \quad (2)$$

$$i_B = \frac{\dot{U}_B}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_0}{R_{из}}; \quad (3)$$

$$i_C = \frac{\dot{U}_C}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{R_{из}}; \quad (4)$$

$$i_A = \frac{\dot{U}_A}{R_h} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h}, \quad (5)$$

где  $\dot{U}_0$  – напряжение смещения нейтрали (напряжение между землей и нейтралью после прикосновения);  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$  – фазные ЭДС трансформатора;  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – напряжения фазных проводов по отношению к земле после прикосновения к фазе.

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

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

или

$$\frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3}{R_{из}} - \frac{3\dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} = 0. \quad (6)$$

Фазные ЭДС трансформатора сдвинуты по фазе относительно друг



друга на 120 электрических градусов и по абсолютной величине равны, т.е.  $U_1 = U_2 = U_3$  и  $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 = 0$ , поэтому выражение (6) примет вид

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} - \frac{3\dot{U}_0}{R_{из}} = 0,$$

откуда напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 R_{из}}{3R_h + R_{из}}. \quad (7)$$

Подставив значение  $\dot{U}_0$  (7) в выражение (5), получим ток через человека, прикоснувшегося к фазе

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} = \frac{3\dot{U}_\phi}{3R_h + R_{из}}, \quad (8)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение сети,  $U_1 = U_\phi$ .

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

$$\dot{I}_A = \frac{3\dot{U}_\phi}{3R_h + Z_{из}}. \quad (9)$$

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 практики эксплуатации электрических сетей не всегда удастся с малыми затратами достигнуть требуемой величины сопротивления заземляющих устройств в сети напряжением до 1140 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, разрезом и приисков, автономных источников геологоразведки, газовых промыслов и т.п.), где заземление и другие меры безопасности должны устраиваться и контролироваться при каждом перемещении источников за фронтом работ или при изменении места работы. Отсутствие норм сопротивления изоляции по отноше-

нию к земле указанных сетей не может способствовать эффективности мероприятий электробезопасности.

О необходимости нормирования сопротивления изоляции сети в целом, а не по отдельным ее 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 обоснованными 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 "Правила устройства электроустановок" (ПУЭ) разработаны с учетом широкого использования современных достижений в практике проектирования и эксплуатации электроустановок и направлены на повышения уровня электробезопасности при одновременном сокращении материальных затрат. Эти нормативные документы базируются на постоянно совершенствующихся исходных положениях основ электробезопасности, развития науки и технических возможностей.

Особенностью требований ПУЭ в отношении обеспечения безопасности электроустановок является возможность использования в качестве исходного критерия электробезопасности – напряжения прикосновения, 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 [см. ПУЭ]), где не всегда удастся 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 ПУЭ 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.

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

При питании электроприемников передвижных установок от передвижных автономных источников с изолированной нейтралью ПУЭ допускают либо не нормировать сопротивление заземления, если заземляющее устройство выполнено с соблюдением требований к напряжению прикосновения (ПУЭ), либо не выполнять защитного заземления электроприемников, если значения напряжений прикосновения при однополюсном замыкании на землю не превышает допустимых. Эти значения должны быть определены специальным расчетом или экспериментально (ПУЭ).

Таблица 2

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

$t_b, \text{с}$	$U_{\text{h доп}}, \text{В}$	$I_{\text{h доп}}, \text{мА}$	$t_b, \text{с}$	$U_{\text{h доп}}, \text{В}$	$I_{\text{h доп}}, \text{мА}$
0,01 – 0,08	650	650	0,6	85	85
0,1	500	500	0,7	70	70
0,2	250	250	0,8	65	65
0,3	165	165	0,9	55	55
0,4	125	125	1,0	50	50
0,5	100	100	больше 1,0	36	6

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

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

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

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  $R_{\text{h}} = 6 \text{ кОм}$  можно определить по (10), задаваясь значениями  $I_{\text{озн}}$ . На рис. 6 представлена зависимость  $R_3$  от  $I_{\text{озн}}$ . Например, при  $R_3 = 36 \text{ Ом}$  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.

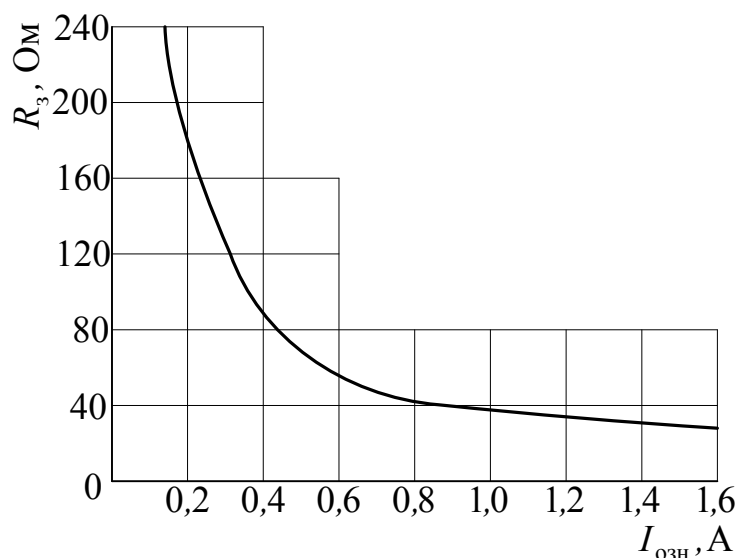


Рис. 6. Зависимость минимально необходимого сопротивления заземления от тока замыкания на землю

Максимально допустимые значения  $R_3$  ограничивающие напряжения прикосновения до 36 В и величину тока через человека до 6 мА расчи-

танные по (10), по ряду значений  $I_{\text{озн}}$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Максимально допустимые значения  $R_3$

$I_{\text{озн}}, \text{А}$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2,0
$R_3, \text{Ом}$	360	180	120	72	60	45	36	30	24	18

Нормированные 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  $Z_{\text{из}}$  в комплексной форме определяется

$$Z_{\text{из}} = R_{\text{экв}} - jX_{\text{экв}} = \frac{3U_{\phi}}{I_{\text{н}}} - 3R_{\text{н}}, \quad (11)$$

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

В электротехнике  $j$ , не имея количественного значения, является символом, умножения на который равносильно повороту вектора на угол  $90^\circ$  (без изменения его величины) в положительном направлении, т.е. против хода часовой стрелки. Число  $j$  используется в символическом методе расчета цепей переменного тока для обозначения физических величин в комплексной форме (подробности см. ниже).

Для определения предельных величин активной и емкостной составляющих сопротивления изоляции сети воспользуемся методом перехода от эквивалентных значений к фактическим через проводимости. Учитывая, что эквивалентные  $R_{\text{экв}}$  и  $X_{\text{экв}}$  соединены последовательно, переход к

фактическим сопротивлениям изоляции  $R_{из}$  и  $X_{из}$ , соединенным параллельно, производим методом проводимостей фаз (см. рис. 7).

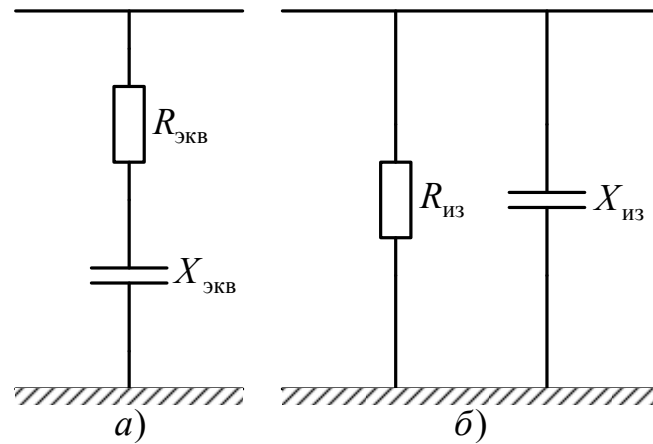


Рис. 7. Сопротивление изоляции: *а* – при последовательном соединении;  
*б* – при параллельном соединении

Активная  $G$  и реактивная  $B$  проводимости фаз на землю

$$\begin{cases} G = \frac{R_{экв}}{Z_{из}^2}, \\ B = \sqrt{Y_{из}^2 - G^2}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $Y_{из}$  – полная проводимость изоляции фазы равная

$$Y_{из} = \frac{1}{Z_{из}}.$$

Активное и реактивное сопротивление изоляции

$$\begin{cases} R_{из} = \frac{1}{G}, \\ X_{из} = \frac{1}{B}, \end{cases} \quad (13)$$

тогда емкость фазы относительно земли

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

где  $\omega$  – угловая частота.

Минимально необходимое (критическое)  $R_k$  сопротивление изоляции, при котором обеспечивается безопасность прикосновения к фазе, определяется из условия, что емкость сети полностью скомпенсирована (емкост-

ная 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 нейтральной точкой и землей, например, с помощью трех конденсаторов, подключенных к каждой фазе одним зажимом, 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  $B = Y_{из}$ ,

$$X_{из} = \frac{1}{Y_{из}} = Z_{из},$$

тогда

$$C_{пр} = \frac{1}{\omega X_{из}}.$$

При емкости, скомпенсированной полностью, минимально необходимое сопротивление изоляции может быть определено по вышеприведенным зависимостям и при известном допустимом токе через человека.

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

$$Z_{из} = \frac{3U_{\phi}}{I_{зддо}} - 3R_h = \frac{3 \cdot 220}{6} - 3 \cdot 6 = 92 \text{ кОм}.$$

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

$$R_k = Z_{из} = 92 \text{ кОм}.$$

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

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

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

Выполняя аналогичные вычисления для сетей напряжением 220 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  $X_{\text{из}} = Z_{\text{из}} = 45,5 \text{ кОм}$ ,

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

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

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

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 45,5; 92 и 172 кОм соответственно для сетей напряжением 220; 380 и 660 В.

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

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

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

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



$$G = \sqrt{Y_{из}^2 - B^2} = \sqrt{(10,87 \cdot 10^{-6})^2 - (6,28 \cdot 10^{-6})^2} = 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Тогда

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

Соотношения между  $R_{из}$  и  $C_{из}$  не трудно установить, задавшись рядом значений  $R_{э\text{кв}}$  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 штрихованными 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  $R_{из} = f(C_{из})$

$Z_{из}$ , кОм	$R_{из}$ , кОм	$G$ , мкСм	$B$ , мкСм	$C_{из}$ , мкФ	$R_{из}$ , кОм
1	2	3	4	5	6
Напряжение сети 220/127 В					
45,5	45	21,74	2,65	0,003	45,9
45,5	40	19,30	10,30	0,032	5,8
45,5	35	16,90	13,90	0,044	59,2
45,5	30	14,50	21,89	0,052	69,0
45,5	25	12,10	18,30	0,058	83,0
45,5	20	9,66	19,6	0,062	103,0
45,5	15	7,25	20,70	0,066	138,0
45,5	10	4,83	21,40	0,068	207,0
45,5	5	2,42	21,76	0,0693	13,0
45,5	1	0,48	21,89	0,0697	2070,0
45,5	0	0	21,90	0,06975	$\infty$

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6
Напряжение сети 380/220 В					
92	88	10,4	3,26	0,010	96,2
92	85	10,05	4,15	0,013	99,5
92	80	9,46	5,36	0,017	105,7
92	70	8,27	7,05	0,022	121
92	60	7,09	8,24	0,026	141
92	50	5,91	9,13	0,029	169
92	40	4,73	9,79	0,031	211
92	30	3,55	10,30	0,033	282
92	20	2,36	10,60	0,034	423
92	10	1,18	10,80	0,0344	847
92	0	0	10,90	0,0347	$\infty$
Напряжение сети 660/380 В					
172	165	5,58	1,63	0,005	179
172	150	5,07	2,84	0,009	197
172	130	4,29	3,81	0,014	228
172	110	3,72	4,46	0,0171	269
172	90	3,04	4,96	0,012	329
172	70	3,37	5,30	0,0157	422
172	50	1,69	5,38	0,0167	592
172	30	1,01	5,72	0,0182	990
172	20	0,68	5,77	0,0183	1470
172	10	0,34	5,80	0,0183	2941
172	0	0	5,81	0,0185	$\infty$

Графики на [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  $f$ ).

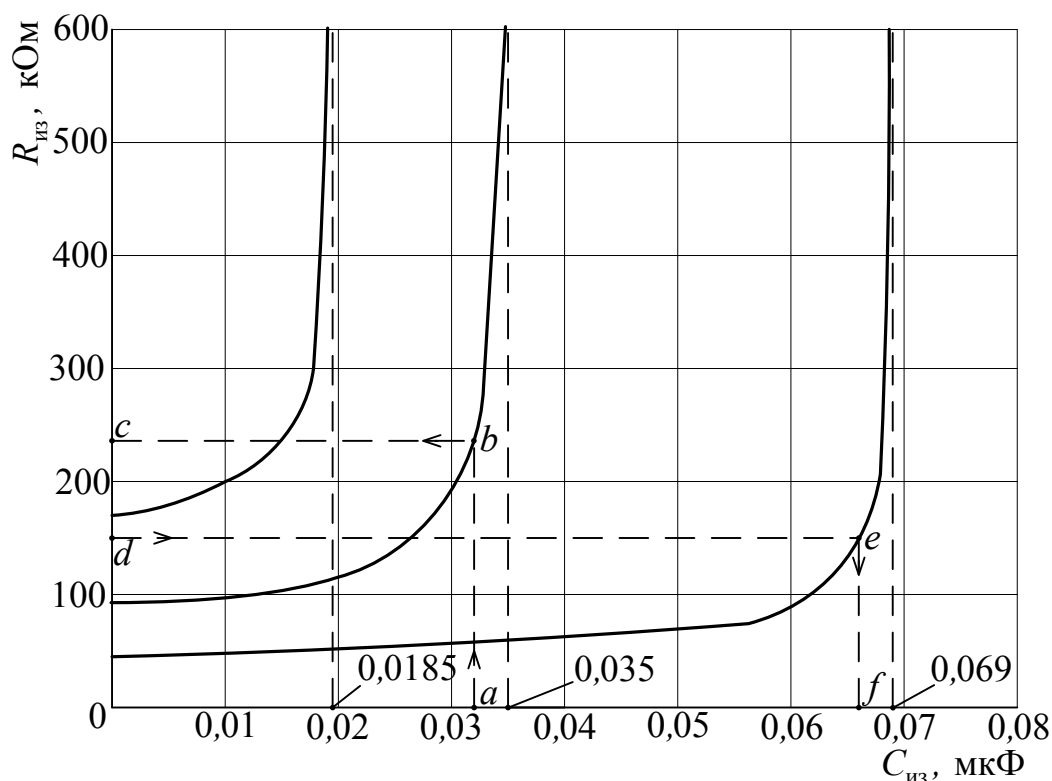


Рис. 8. Зависимость минимально необходимого сопротивления изоляции от емкости  $C_{из}$  в сетях с изолированной нейтралью напряжением 660, 380 и 220 В без применения заземления

В передвижных электроустановках, питающихся от автономных источников с изолированной нейтралью ПУЭ допускает не нормировать сопротивление заземления, если заземляющее устройство выполнено с соблюдением требований к напряжению прикосновения (ПУЭ), либо не выполнять защитное заземления электроприемников, если значения напряжений прикосновения при однополюсном замыкании на землю не превышает нормированных, причем эти значения должны быть определены специальным расчетом или экспериментально (ПУЭ). 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 кабеля, электродвигателей и т.д.), то следует применить защитное заземление и произвести оценку безопасности по графикам, приведенным на рис. 9 и 10.

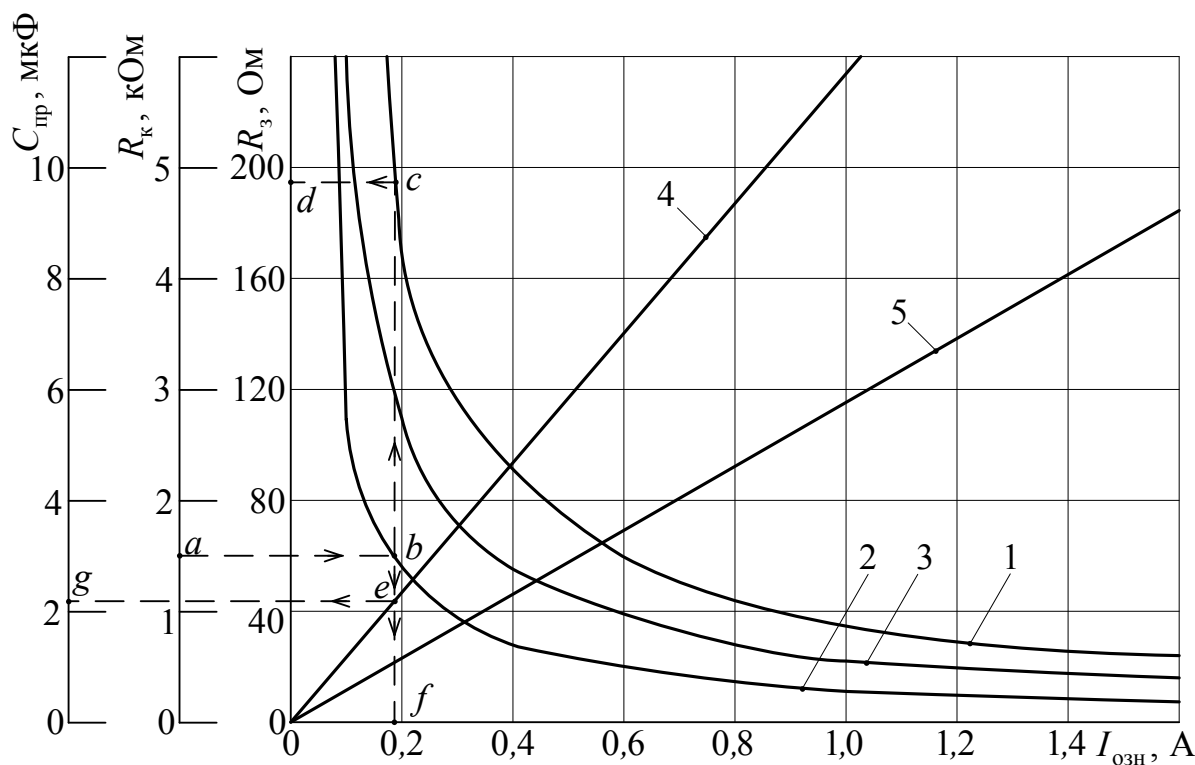


Рис. 9. Зависимость предельных значений параметров от тока однофазного замыкания на землю при напряжении сети 220 и 380 В: 1 – максимально допустимые сопротивления заземления  $R_z$ ; 2, 3 – минимально необходимое сопротивление изоляции сети  $R_k$  соответственно при напряжении 220 и 380 В; 4 и 5 – значение предельных емкостей  $C_{пр}$  при напряжении 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 ве-

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

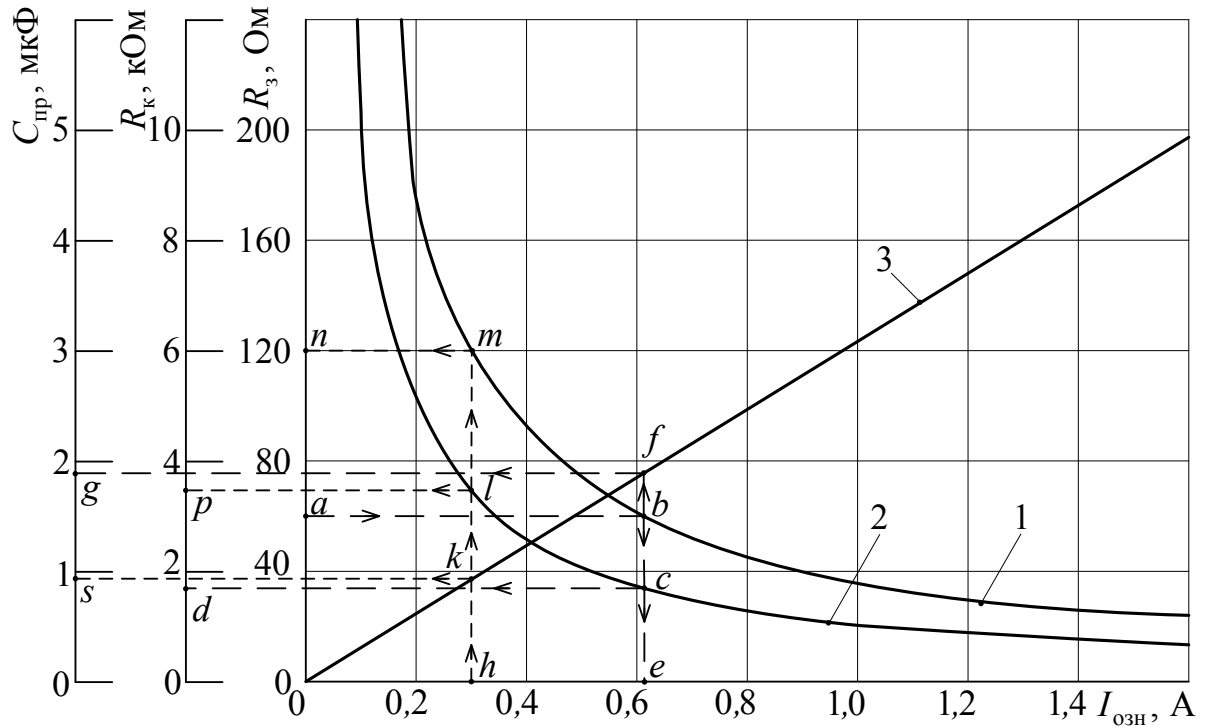


Рис. 10. Зависимость предельных значений параметров тока однофазного замыкания на землю при напряжении сети 660 В: 1 – максимально допустимое сопротивление заземления; 2 – минимально необходимое сопротивление изоляции сети; 3 – значения предельных емкостей  $C_{пр}$

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

$$Z_{из} = R_{из} - jX_{из} = \frac{U_{\phi}}{I_з} - 3R_з.$$

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

$$R_3 \leq \frac{U_{\text{доп}}}{I_{\text{из}}} \leq \frac{36}{0,6} \leq 60 \text{ Ом},$$

а полное сопротивление изоляции фазы сети – не менее

$$Z_{\text{из}} = \frac{3U_{\text{ф}}}{I_{\text{озн}}} - 3R_3 = \frac{3 \cdot 220}{0,6} - 3 \cdot 60 = 920 \text{ Ом}.$$

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

$$R_{\text{из}} = Z_{\text{из}} = 920 \text{ Ом}.$$

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

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

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

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

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

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

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

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.

Таблица 5

Расчетные данные  $R_z$ ,  $R_k$  и  $C_{пр}$

$I_{озн}$ , А	$R_z$ , Ом	220 В		380 В		660 В	
		$R_k$ , кОм	$C_{пр}$ , мкФ	$R_k$ , кОм	$C_{пр}$ , мкФ	$R_k$ , кОм	$C_{пр}$ , 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

Зависимости  $R_z = f(I_{озн})$ ,  $R_k = f(I_{озн})$  и  $C_{пр} = f(I_{озн})$ , 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 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 зависимос-

ти  $C_{\text{пр}} = f(I_{\text{озн}})$  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 380 В (см. табл. 5).

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 короткого 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  $q$  на рис. 10). 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 сопротивление заземления не больше 120 Ом, минимально необходимое сопротивление изоляции составляет 3,44 кОм, а предельная емкость фазы сети – 0,92 мкФ (точки  $h$ ,  $l$ ,  $p$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $s$  на рис. 10).

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 свидетельствуют 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 1140 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.

Экспериментальная оценка параметров изоляции сети и тока однофазного замыкания на землю может быть выполнена методом амперметра-вольтметра, разработанным профессором Л. В. Гладилиным и заключающимся в следующем (см. рис. 11).

Вольтметром измеряются напряжения всех трех фаз сети по отношению к земле, их значения должны быть примерно одинаковы и равны фазному

$$U_1 \approx U_2 \approx U_3 \approx U_{\phi}.$$

Если на одной из фаз напряжение близко к нулю, а на других оно стремиться к линейному, что свидетельствует о наличии однофазного замыкания на землю, то перед дальнейшими измерениями это повреждение должно быть устранено.

Амперметром измеряется ток однофазного замыкания на землю (корпус) каждой фазы при отключенном вольтметре

$$I_1 \approx I_2 \approx I_3 \approx I.$$

Определяется полная проводимость изоляции сети по отношению к земле

$$Y_{\text{из}} = \frac{I}{U_{\phi}}.$$

Для разделения полной проводимости на активную и реактивную составляющие измеряют еще раз напряжение фаз при включенном параллельно вольтметру дополнительного активного сопротивления, примерно рав-

НОГО

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{доб}}}{I}$$

(при отключенном амперметре), и получают

$$U_{\text{доб1}} \approx U_{\text{доб2}} \approx U_{\text{доб3}} \approx U_{\text{доб}}.$$

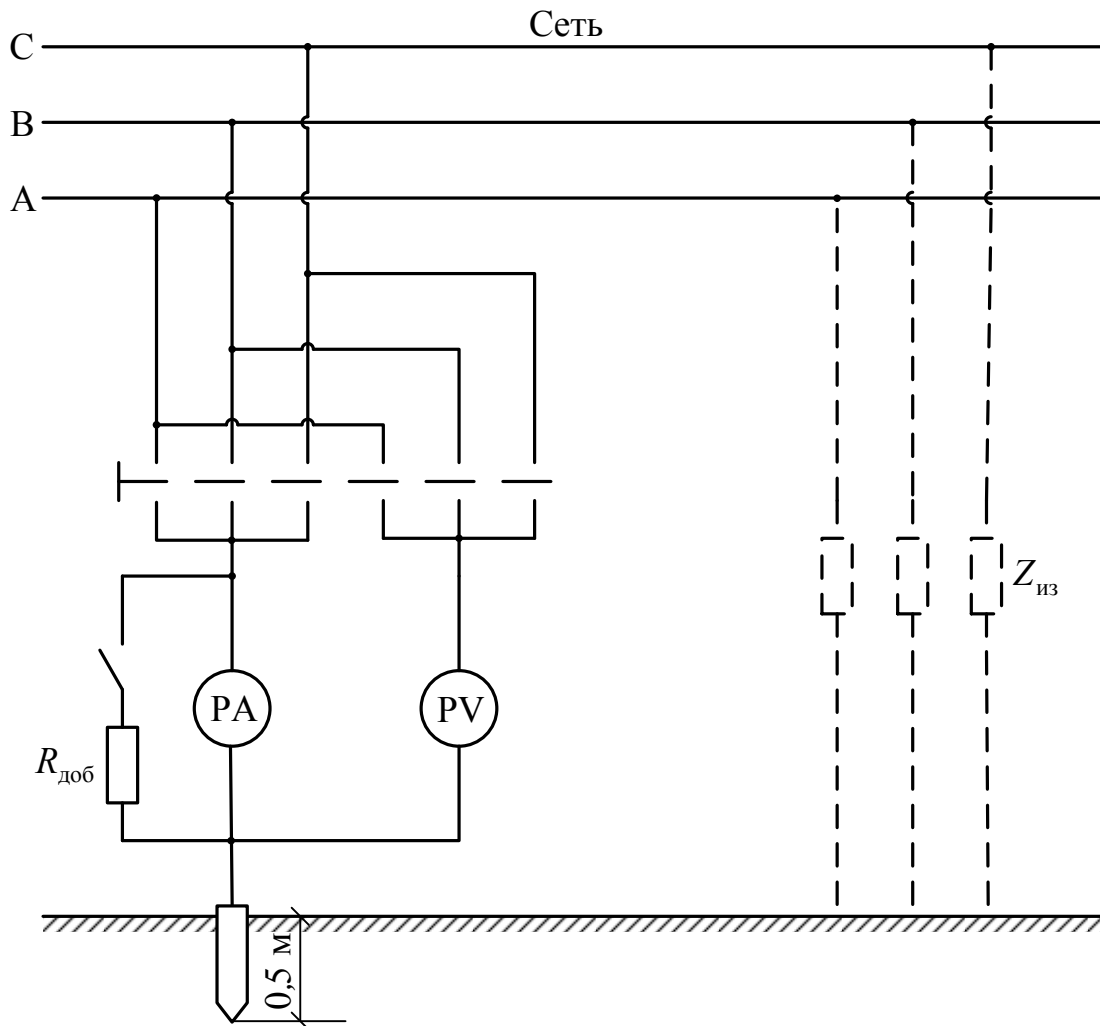


Рис. 11. Схема измерения параметров изоляции сети по методу профессора Л. В. Гладилина

Затем определяют полную проводимость фаз при введенном  $R_{\text{доб}}$

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{U_{\text{доб}}}.$$

Активную и реактивную проводимости фаз сети и соответствующие им сопротивления изоляции вычисляют в следующем порядке:

$$G_{из} = \frac{Y_{\Sigma}^2 - Y_{из}^2 - G_{доб}^2}{2G_{доб}},$$

где

$$G_{доб} = \frac{1}{R_{доб}}.$$

Тогда

$$B_{из} = \sqrt{Y_{из}^2 - G_{из}^2}; R_{из} = \frac{1}{G_{из}}; X_{из} = \frac{1}{B_{из}}.$$

Отсюда емкость фазы относительно земли

$$C_{из} = \frac{1}{\omega X_{из}}.$$

Величина добавочно сопротивления находится в пределах

$$R_{доб} = (0,5 \div 2)Z_{из}.$$

Обычно  $R_{доб} \approx Z_{из}$ , где

$$Z_{из} = \frac{1}{Y_{из}}.$$

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, 9 и 10).

#### 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 ПУЭ. 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 при однофазных замыканиях на землю через тело человек 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 ПУЭ в некоторых случаях допускает 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 напряжения 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 за-

щитного 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 ПУЭ, 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 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 (см. рис. 12). Таким образом, наличие нулевого изолированного от земли провода вносит некоторые особенности в расчеты предельных значений параметров изоляции сети.

Для упрощения расчетов примем, что емкость фазных проводов и нулевого провода по отношению к земле равна нулю, т.е.  $C_{\phi} = 0$  и  $C_0 = 0$ , а также активные сопротивления фаз по отношению к земле (корпус) одинаковые, т.е.  $R_A = R_B = R_C = R_{из}$ , в дальнейших расчетах эти упрощения будут сняты.

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:

$$\sum \dot{I} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_h - \dot{I}_0 = 0. \quad (15)$$

Токи через изоляцию фазных проводов определяются:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_{из}}; \quad (16)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_0}{R_{из}}; \quad (17)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{R_{из}} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{R_{из}}. \quad (18)$$

где  $\dot{U}_0$  – напряжение смещения нейтрали (напряжение между нулевым проводом и землей после прикосновения).

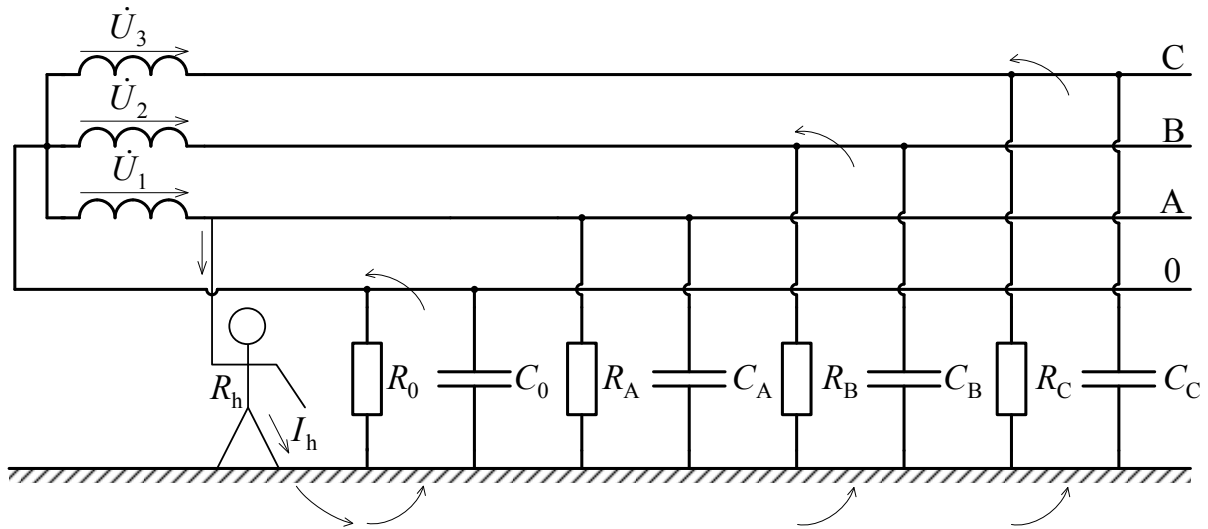


Рис. 12. Прикосновение к фазе в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью

Точки через тело человека и изоляцию нулевого провода определяются:

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_A}{R_h} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h}; \quad (19)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0}{R_0}. \quad (20)$$

где  $R_0$  – сопротивление изоляции нулевого провода по отношению к земле.

Учитывая (16) – (20), равенство (15) примет вид:

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} - \frac{\dot{U}_0}{R_0} = 0$$

или

$$\frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3}{R_{из}} - \frac{3\dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_0}{R_{из}} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} - \frac{\dot{U}_0}{R_0} = 0.$$

При равенстве фазных ЭДС 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

$$\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} - \frac{3\dot{U}_0}{R_{из}} - \frac{\dot{U}_0}{R_0} = 0,$$

откуда напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_0 R_{из} R_0}{3R_h R_0 + R_{из} R_0 + R_h R_{из}}. \quad (21)$$

Ток через тело человека, прикоснувшегося к фазе, с учетом (21) определяется:

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_0}{R_h} = \frac{U_1(3R_0 - R_{из})}{3R_h R_0 + R_{из} R_0 + R_h R_{из}},$$

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

$$I_h = \frac{U_\phi(3R_0 - R_{из})}{3R_h R_0 + R_{из} R_0 + R_h R_{из}}. \quad (22)$$

Для удовлетворения требований ПУЭ к напряжению прикосновения и допустимому току  $I_{h\text{доп}}$  для человека минимально необходимое сопротивление изоляции сети  $R_{из}$  будет определено из выражения (22), где  $I_h$  не должно превышать допустимого значения, т.е.  $I_h \leq I_{\text{доп}}$

$$R_{из} \geq \frac{3R_0(U_\phi - I_{h\text{доп}} R_h)}{I_{h\text{доп}}(R_h + R_0) - U_\phi}. \quad (23)$$

С учетом реактивных составляющих сопротивлений изоляции сети выражения (22) и (23) примут вид

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_\phi(3Z_0 + Z_{из})}{3R_h Z_0 + Z_0 Z_{из} + R_h Z_{из}}, \quad (24)$$

$$Z_{из} \geq \frac{3z_0(U_{\phi} - I_{h доп} R_h)}{I_{h доп}(R_h + Z_0) - U_{\phi}}, \quad (25)$$

где  $Z_{из}$  и  $Z_0$  – полные сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов.

Задаваясь значениями  $Z_{из}$  и  $Z_0$  можно определить по выражению (24) величину тока, проходящего через человека в случае его прикосновения к фазе. На [рис. 13](#) представлены зависимости величины тока при прикосновении к фазе от сопротивления сети для различных значений сопротивления изоляции нулевого провода  $Z_0$ , 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  $Z_0 = 0$ ) и кривой тока при прикосновении к фазе трехпроводной сети 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  $Z_0 = \infty$ ).

Важное практическое значение имеет анализ выражения (25), 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, исключаяющие 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. 2](#).

Анализ выражения (25) 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.

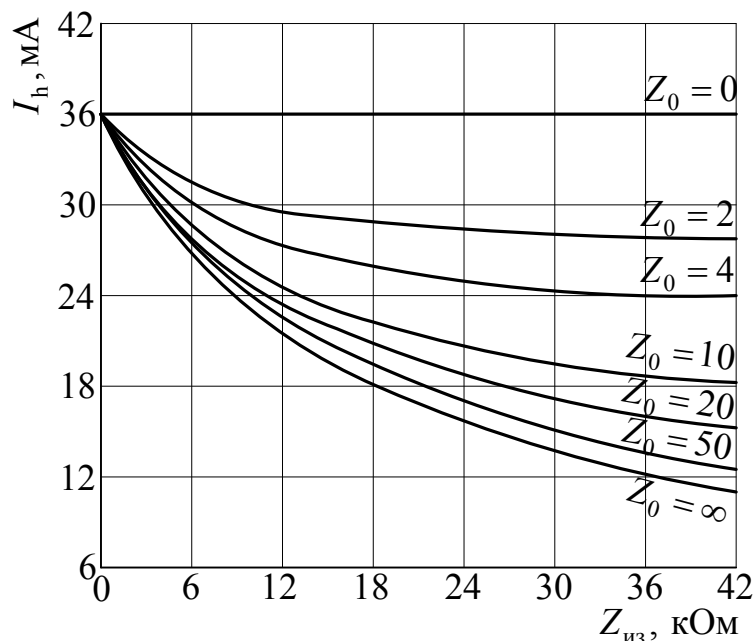


Рис. 13. Зависимость тока через человека, прикоснувшегося к фазе, от сопротивления изоляции фазных проводов при различных сопротивлениях нулевого провода  $Z_0$ : при  $Z_0 = 0$  сеть с глухозаземленной нейтралью; при  $Z_0 = \infty$  сеть с изолированной нейтралью

При бесконечно большом сопротивлении изоляции ( $Z_{из} \rightarrow \infty$ ), знаменатель выражения (25) стремиться к нулю, т.е. можно записать

$$I_{\text{хдоп}}(R_{\text{н}} - Z_0) - U_{\text{ф}} = 0.$$

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

$$Z_0 = \frac{U_{\text{ф}} - I_{\text{хдоп}} R_{\text{н}}}{I_{\text{х}}} = \frac{133 - 6 \cdot 6}{6} = 16,2 \text{ кОм},$$

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

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

230 В		380 В	
$Z_{из}$ , кОм	$Z_0$ , кОм	$Z_{из}$ , кОм	$Z_0$ , кОм
$\infty$	16,2	$\infty$	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	$\infty$	92	$\infty$

Таким образом существует взаимосвязь между  $Z_{из}$  и  $Z_0$ : 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 ПУЭ предписывают применение защитного отключения, при котором обеспечить безопасность можно со значительным снижением  $Z_{из}$  и  $Z_0$ . 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 (25) при разном времени воздействия и соответствующего этому времени допустимого тока.

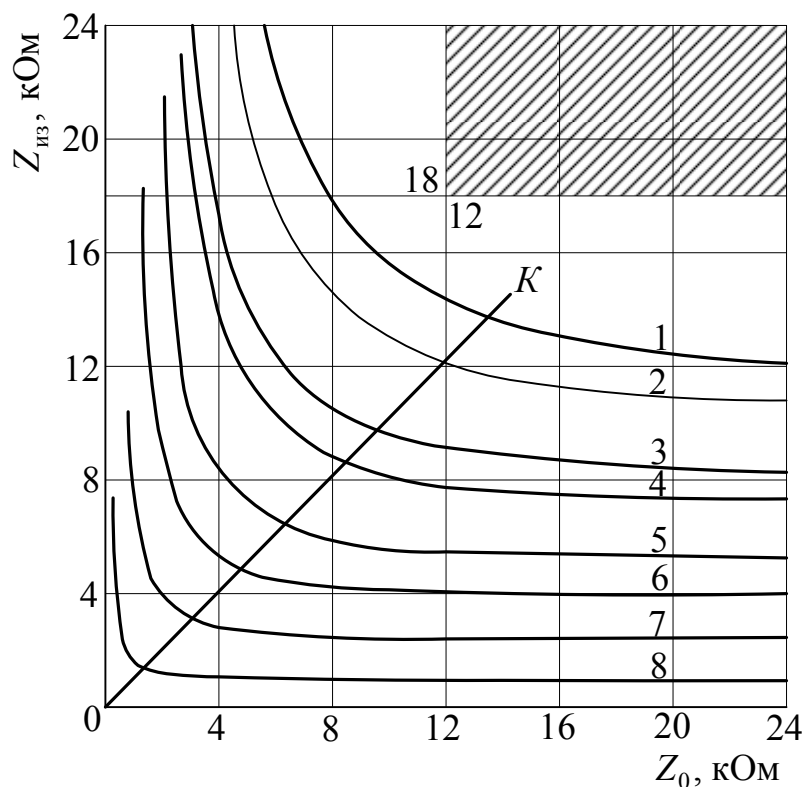


Рис. 14. Зависимости минимально необходимых значений сопротивления изоляции фаз сети от сопротивления изоляции нулевого провода при времени действия тока на человека: 1 – 1 с; 2 – 0,9 с; 7 – 0,4 с; 8 – 0,3 с

Кривые показывают, что с увеличением  $Z_0$  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 на [рис. 14](#), допустимый ток  $I_{\text{зддо}} = 85 \text{ мА}$ ,  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ ) 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.

Учитывая возможное появление асимметрии изоляции фаз до 20 % и то, что среди потребителей практически всегда имеются электродвигатели, ЭДС 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  $Z_{\text{из}} \geq 18 \text{ кОм}$ ,  $Z_0 \geq 12 \text{ кОм}$ . Аналогично в сети напряжением 220/133 В – на уровне  $Z_{\text{из}} \geq 9 \text{ кОм}$ ,  $Z_0 \geq 7 \text{ кОм}$  ([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 – 1 с (зона рекомендуемых значений сопротивления изоляции фазных и нулевого проводов на [рис. 14](#) заштрихована, прямая ОК соединяет точки кривых со значением сопротивления  $Z_{\text{из}} = Z_0$ ). Следует заметить, что при времени действия тока не 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

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 Y_A + \dot{U}_2 Y_B + \dot{U}_3 Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}, \quad (26)$$

где  $Y_A$ ,  $Y_B$ ,  $Y_C$ ,  $Y_0$  – полные проводимости изоляции фаз сети и нулевого провода относительно земли. При замыкании одной из фаз на землю (например, фазы А) сопротивление изоляции ее по отношению к земле будет

равно нулю, т.е.  $Z_A = 0$ . Умножим числитель и знаменатель дроби выражения (26) на  $Z_A$ , а затем приравняем  $Z_A$  к нулю, тогда получим

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 Y_B Z_A + \dot{U}_3 Y_C Z_A}{1 + Z_A (Y_B + Y_C + Y_0)} = U_1.$$

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

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_0. \quad (27)$$

Примем  $\dot{U}_1 = \dot{U}_\phi$ , тогда с учетом сдвига фаз ЭДС источника

$$\dot{U}_2 = a^2 \dot{U}_\phi, \quad \dot{U}_3 = a \dot{U}_\phi,$$

где  $a$  – фазный множитель, учитывающий сдвиг фаз ЭДС относительно друг друга

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где  $j$  – поворотный множитель (поворот вектора на  $90^\circ$  против хода стрелки часов).

Токи определяются:

$$\dot{I}_B = (\dot{U}_2 - \dot{U}_0) Y_B = (a^2 \dot{U}_\phi - \dot{U}_\phi) Y_B;$$

$$\dot{I}_C = (\dot{U}_3 - \dot{U}_0) Y_C = (a \dot{U}_\phi - \dot{U}_\phi) Y_C;$$

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_0 Y_0.$$

Суммируя эти токи с учетом (28) и приняв  $Y_B = Y_C = Y_{из}$ , получим

$$I_3 = U_\phi (Y_0 - 3Y_{из}),$$

отсюда следует

$$Y_0 = \frac{I_3}{U_\phi} + 3Y_{из}. \quad (29)$$

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

$$Y_{\text{из}} = \frac{I_3 - I_0}{U_{\phi}}. \quad (30)$$

или, при наличии напряжения смещения нейтрали, по выражению

$$Y_{\text{из}} = \frac{I_0}{U_0}, \quad (31)$$

где  $I_0$  – ток замыкания на землю нулевого провода, измеренный амперметром;  $U_0$  – напряжение смещения нейтрали, измеренное вольтметром между нулевым проводом и землей.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{из}} &= \frac{1}{Y_{\text{из}}}, \\ Z_0 &= \frac{1}{Y_0}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Таким образом, для определения сопротивления изоляции  $Z_{\text{из}}$  и нулевого провода  $Z_0$  относительно земли (корпуса) необходимо измерить  $I_3$ ,  $I_0$  и  $U_0$ . Измерение этих параметров можно произвести в следующем порядке (см. рис. 15):

1. Вольтметром измеряют напряжения всех трех фаз сети по отношению к земле, их значения должны быть примерно одинаковыми и равными фазному

$$U_1 \approx U_2 \approx U_3 \approx U_0.$$

Одновременно следует измерить напряжение  $U_0$  между нулевым проводом и землей. Если на одной из фаз напряжение близко к нулю, а на других оно стремиться к линейному, что свидетельствует о наличии однофазного замыкания на землю, то перед дальнейшими измерениями это повреждение должно быть устранено.

2. Амперметром измеряется ток однофазного замыкания на землю (корпус) каждой фазы поочередно при отключенном вольтметре

$$I_1 \approx I_2 \approx I_3 \approx I_{\text{озн}},$$

а также ток короткого замыкания  $I_0$  нулевого провода на землю.

3. По выражениям (29) – (32) определяется сопротивление изоляции  $Z_{\text{из}}$  и

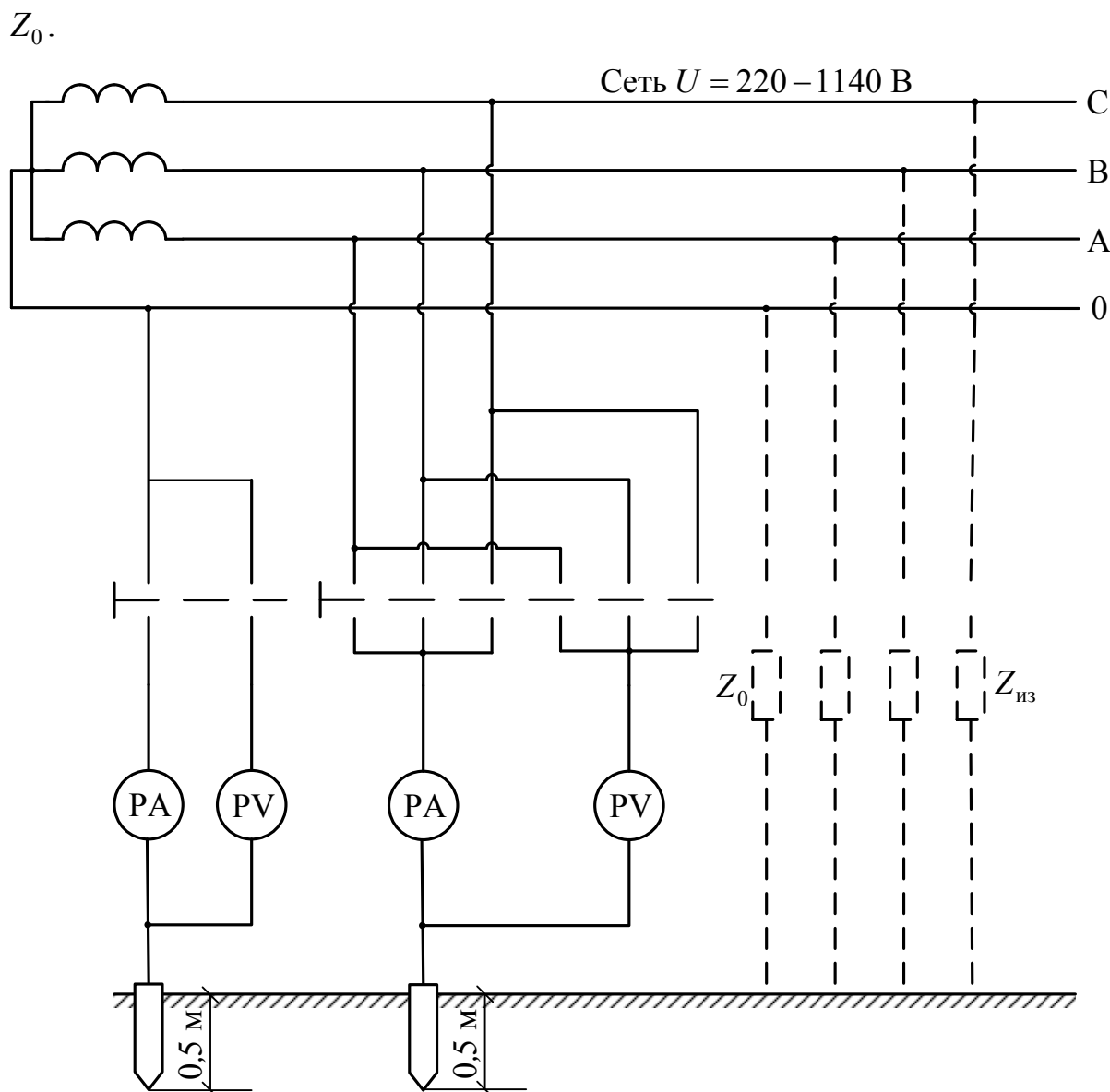


Рис. 15. Схема измерения параметров изоляции сети

Безопасность сети при прикосновении к токоведущей части будет обеспечиваться, если фактические величины  $Z_{из}$  и  $Z_0$  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. 14 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.

Приведенная методика 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.д.

Асимметрия сопротивления изоляции фаз по отношению к земле и асимметрия напряжений в целом ухудшают условия электробезопасности. Ниже показано, что большую опасность представляет прикосновения к фазе, обладающей большим сопротивлением по сравнению с другими фазами, это положение вытекает из известных основ электротехники. Расчет тока через человека и параметров изоляции сети при асимметрии произведем, исходя из описанного ниже.

При прикосновении к фазе ток через человека будет найден

$$I_h = (\dot{U}_1 - \dot{U}_0) Y_h, \quad (33)$$

где  $\dot{U}_1$  – фазная ЭДС сети;  $\dot{U}_0$  – напряжения смещения нейтрали;  $Y_h$  – проводимость тела человека.

Напряжение смещения нейтрали определится (прикосновение к фазе)

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1(Y_A + Y_h) + \dot{U}_2 Y_B + \dot{U}_3 Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_h}. \quad (34)$$

Учитывая сдвиг фаз фазных ЭДС относительно друг друга, выражение (34) примет вид

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_\phi (Y_A + Y_h) + \dot{U}_\phi Y_B a^2 + \dot{U}_\phi Y_C a}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_h}.$$

Для упрощения преобразования примем, что емкость фаз сети по отношению к земле равны нулю, т.е.  $C_A = C_B = C_C = 0$ , а проводимость тела человека – чисто активная, т.е.  $Y_h = G_h$ , тогда

$$U_0 = U_\phi \frac{G_A + G_h + a^2 G_B + a G_C}{G_A + G_B + G_C + G_h}. \quad (35)$$

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  $G_A = nG_B = nG_C$  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. Когда  $n < 1$ , проводимость 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. Если  $n = \infty$ , то режим однофазного замыкания фазы А на землю.

При  $G_A = nG_B = nG_C = nG_{из}$  выражение (35) с учетом (28) примет вид

$$\begin{aligned} U_0 &= U_\phi \frac{G_A + G_h + a^2 G_B + a G_C}{G_A + G_B + G_C + G_h} = U_\phi \frac{G_{из}(n + a^2 + a) + G_h}{G_{из}(n + 2) + G_h} = \\ &= U_\phi \frac{G_{из} \left( n - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + G_h}{G_{из}(n + 2) + G_h} = U_\phi \frac{G_{из}(n + 1) + G_h}{G_{из}(n + 2) + G_h}. \end{aligned} \quad (36)$$

Заменим  $G_{из}$  на  $1/R_{из}$  и  $G_h$  на  $1/R_h$  в (36). После преобразований получим

$$U_0 = U_\phi \frac{(n-1)R_h + R_{из}}{(n+2)R_h + R_{из}}. \quad (37)$$

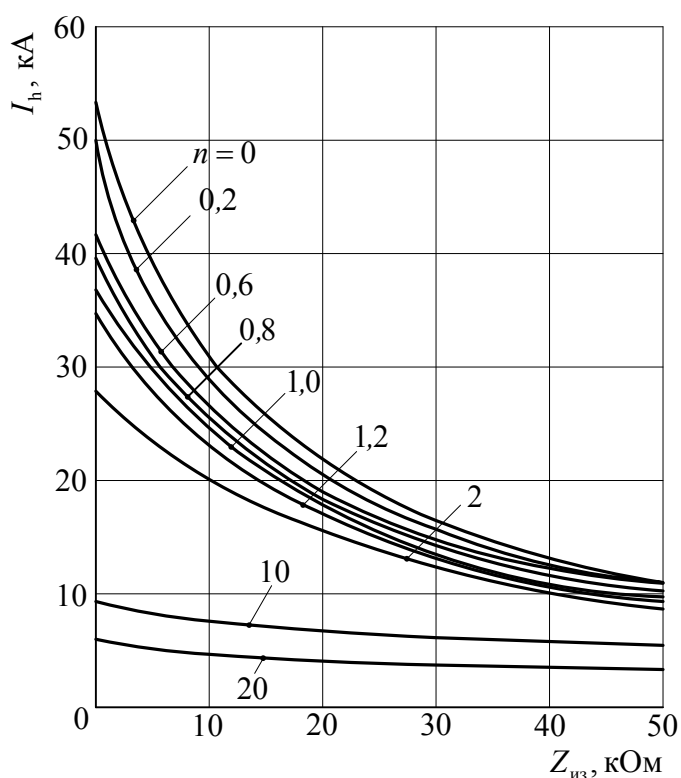
Тогда ток через тело человека при асимметрии изоляции сети определится по (33) после преобразований

$$I_h = (\dot{U}_1 - \dot{U}_0)Y_h = \frac{3U_\phi}{(n+2)R_h + R_{из}}.$$

С учетом реактивных (емкостных) составляющих сопротивлений ток через человека будет определяться

$$I_h = \frac{3U_\phi}{(n+2)R_h + Z_{из}}. \quad (38)$$

Зависимость тока через человека, прикоснувшегося к фазе сети с асимметрией изоляции, от сопротивления изоляции сети при различной асимметрии представлены на [рис. 16](#).



**Рис. 16. Зависимость тока прикосновения к фазе от сопротивления изоляции при различной асимметрии  $n = 0 \dots 20$**

Минимально необходимое сопротивление изоляции сети  $Z_{\min}$  (кОм), каждой из двух фаз по отношению к земле при прикосновении к третьей фазе определится из выражения (38)

$$Z_{\min} = \frac{3U_\phi}{I_{h\text{ доп}}} - (n+2)R_h,$$

где  $I_{h\text{ доп}}$  – предельно допустимый ток для человека, мА;  $R_h$  – сопротивле-

ние тела человека, соответствующее  $I_{\text{h доп}}$ , кА.

Пример. Определить минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети напряжением 380/220 В при прикосновении к фазе при  $n = 0,8$ . Ток через человека должен быть ограничен до  $I_{\text{h доп}} = 50$  мА при времени воздействия 1 с (см. табл. 2)

$$Z_{\min} \geq \frac{3 \cdot 220}{50} - (0,8 + 2)1 = 10,4 \text{ кОм}.$$

Наибольшую опасность однофазного прикосновения при асимметрии представляет прикосновение к фазе, к которой не подключена нагрузка и не подключен провод фазы сети, например, при перегорании предохранителя (см. рис. 17), где  $n = 0$ . Тогда

$$Z_{\min} = \frac{3 \cdot 220}{50} - (0 + 2)1 = 11,2 \text{ кОм}.$$

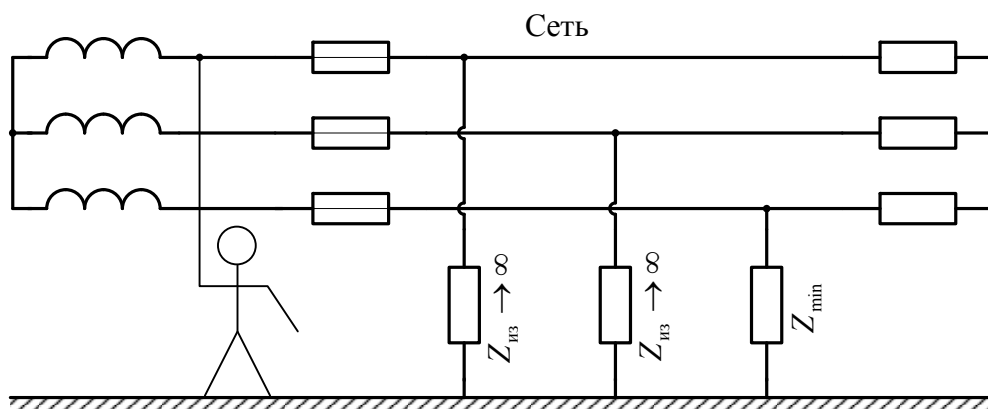


Рис. 17. Сеть с асимметрией сопротивления изоляции

В этом примере величина допустимого тока 50 мА для человека ограничивается изоляцией сети  $Z_{\min}$ , время его действия до 1 с должно ограничиваться защитным отключением.

Исходя из (38), допустимая асимметрия изоляции сети определится

$$n_{\text{доп}} = \frac{3U_{\phi}}{I_{\text{h доп}} R_{\text{h}}} - \frac{Z_{\text{из}}}{R_{\text{h}}} - 2.$$

## 5.2. ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ

В четырехпроводных трехфазных сетях с изолированной нейтралью без зануления, которые нашли широкое применение в передвижных элек-

троустановках, питающихся от автономных источников (ПУЭ) особую опасность представляют прикосновения к нулевому проводу, 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.

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 являются 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

$$U_0 = \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0} U_\phi, \quad (39)$$

где  $a$ ,  $a^2$  – фазные множители;  $Y_A$ ,  $Y_B$ ,  $Y_C$ ,  $Y_0$  – полные проводимости

изоляции, соответственно, фаз А, В, С и нулевого провода сети по отношению к земле равные

$$\left. \begin{aligned} Y_A &= G_A + j\omega C_A, Y_B = G_B + j\omega C_B, \\ Y_C &= G_C + j\omega C_C, Y_0 = G_0 + j\omega C_0, \end{aligned} \right\}$$

где  $G_A, G_B, G_C, G_0$  – активные проводимости изоляции фаз сети и нулевого провода;  $C_A, C_B, C_C, C_0$  – емкости изоляции фаз и нулевого провода по отношению к земле;  $\omega$  – угловая частота тока.

В случае прикосновения к нулевому проводу между нулевым проводом и землей появляется проводимость  $Y_h$ , равная проводимости тела человека, тогда напряжение смещения нейтрали определится

$$\dot{U}_0 = \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0} U_\phi,$$

а ток через тело человека будет найден

$$I_h = U_\phi Y_h \frac{Y_A + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (40)$$

Асимметрию сопротивлений изоляции фаз будем характеризовать величиной  $n$ , аналогично, что и при исследовании асимметрии изоляции в трехфазных трехпроводных сетях с изолированной нейтралью (см. подраздел 5.1).

Для упрощения преобразований примем  $C_A = C_B = C_C = 0$ ;  $C_0 = 0$ ;  $Y_A = G_A$ , тогда, учитывая (28), после преобразования при  $G_A = nG_B = nG_C = nG$  выражение (40) примет вид

$$I_h = U_\phi Y_h \frac{G(n-1)}{G(n-2) + G_h + G_0}. \quad (41)$$

Заменив проводимости в выражении (41) на соответствующие им сопротивления, т.е.

$$G_h = \frac{1}{R_h}; G_{из} = \frac{1}{R_{из}}; G_0 = \frac{1}{R_0}.$$

Тогда ток через человека при его прикосновении к нулевому проводу определится

$$\dot{I}_h = \frac{U_\phi Z_0 (n-1)}{R_h Z_0 (n+2) + Z_0 Z_{из} + R_h Z_{из}}. \quad (42)$$

Анализ формулы (42) позволяет получить важные для практики эксплуатации сетей сведения:

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

В случае  $n=0$ , что соответствует обрыву одной из фаз сети, перегорание предохранителя, одно- и двухфазная нагрузка, максимальный ток через тело человека, прикоснувшегося к нулевому проводу, определяется по выражению

$$I_h = \frac{U_\phi Z_0}{2R_h Z_0 + Z_0 Z_{из} + R_h Z_{из}}. \quad (43)$$

Зависимости  $I_h = f(Z_{из})$  для различных значений  $Z_0$  при  $R_h = 6$  кОм представлены на рис. 18 (время воздействия тока более 1 с). На рис. 19 представлены зависимости  $I_h = f(Z_{из})$  при  $R_h = 1$  кОм (времени воздействия тока  $t_{возд} \leq 1$  с). Точкой "а" на рис. 18 и 19 отмечены минимально необходимые сопротивления изоляции при различных  $R_0 = Z_0$ .

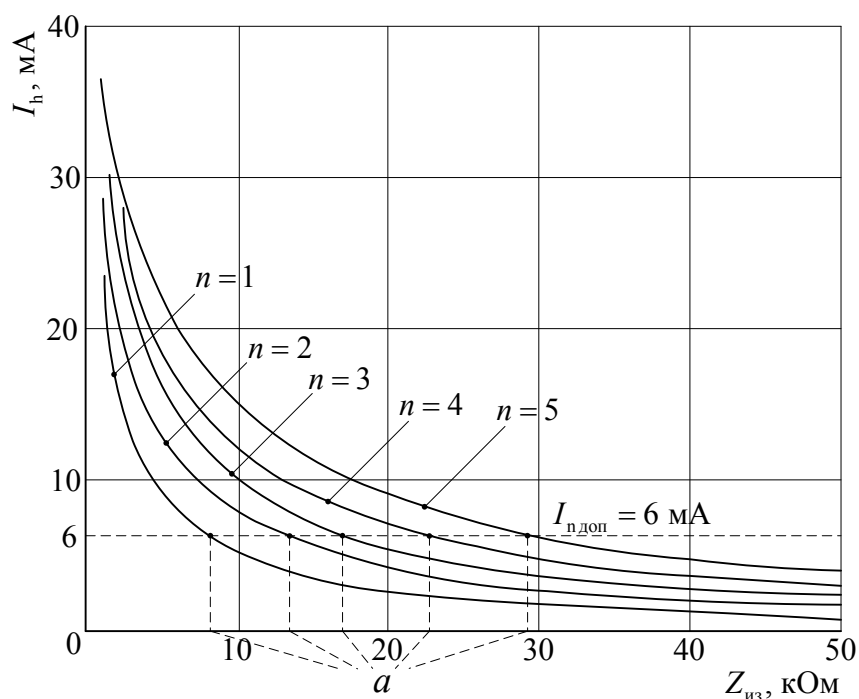


Рис. 18. Зависимость  $I_h = S(Z_{из})$  при  $R_h = 6$  кОм (времени воздействия тока  $t_{возд} > 1$  с)

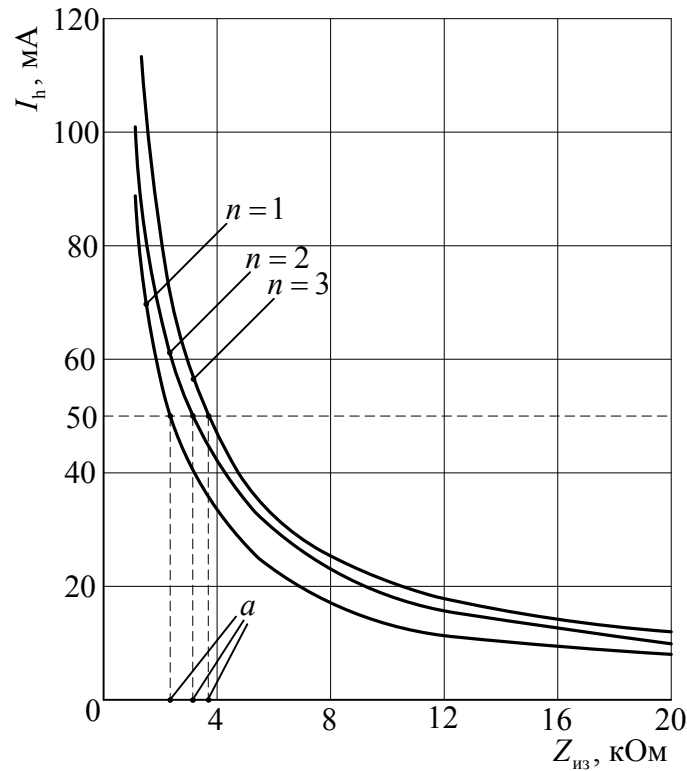


Рис. 19. Зависимость  $I_h = S(Z_{из})$  при  $R_h = 1 \text{ кОм}$  (времени воздействия тока  $t_{возд} \leq 1 \text{ с}$ )

При  $Z_{из} = 0$ , что соответствует режиму однофазного замыкания одной из фаз на землю, ток через тело человека определится

$$I_h = \frac{U_\phi(n-1)}{R_h(n+2)}, \quad (44)$$

а в случае одновременного обрыва второй фазы  $n = 0$  ток через человека при прикосновении к нулевому проводу достигает максимального значения и определится по выражению

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_h}. \quad (45)$$

Зависимость  $I_h = f(n)$  при  $Z_{из} = 0$  для  $R_h = 6 \text{ кОм}$  и  $R_h = 3 \text{ кОм}$  представлены на рис. 20. При снижении  $n$  от единицы до нуля ток через человека стремительно увеличивается от 0 до 36,7 мА при  $R_h = 6 \text{ кОм}$  и от 0 до 73,3 мА при  $R_h = 3 \text{ кОм}$ , 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  $R_h = 6 \text{ кОм}$ , 36,7 мА при  $R_h = 3 \text{ кОм}$  и 110 мА при  $R_h = 1 \text{ кОм}$ .

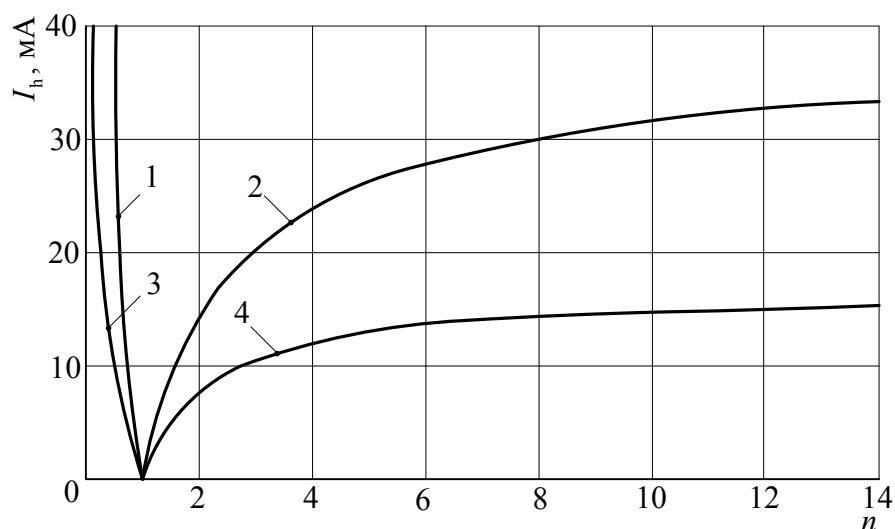


Рис. 20. Зависимость тока через человека, прикоснувшегося к нулевому проводу, от показателя асимметрии изоляции фаз в сети напряжением 380/220 В: 1, 2 – при  $R_h = 3 \text{ кОм}$ ; 3, 4 –  $R_h = 6 \text{ кОм}$

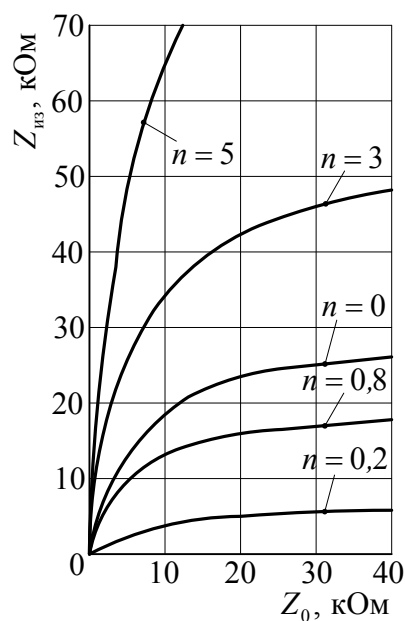


Рис. 21. Минимально необходимое сопротивление изоляции фаз при различных значениях  $n$  ( $I_{\text{доп}} = 6 \text{ мА}$ , прикосновения к нулевому проводу в четырехпроводной сети с изолированной нейтралью)

Минимально необходимое сопротивление изоляции фаз сети, которое может ограничить ток через человека до допустимых значений может быть определено из выражения (42), т.е.

$$Z_{\min} \geq \frac{U_{\phi} Z_0 (n-1) - I_{\text{h доп}} R_{\text{h}} Z_0 (n+2)}{I_{\text{h доп}} (Z_0 + R_{\text{h}})}. \quad (46)$$

На [рис. 21](#) представлены зависимости  $Z_{\min} = f(Z_0)$  для различных значений показателя асимметрии  $n$  при  $R_{\text{h}} = 6 \text{ кОм}$  и  $I_{\text{доп}} = 6 \text{ мА}$ .

## 6. ПРИМЕНЕНИЕ СИМВОЛИЧЕСКОГО МЕТОДА В АНАЛИЗЕ СЕТЕЙ НА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Анализ зависимости величины тока через человека, прикоснувшегося к фазе или к нулевому проводу в трех- и четырехпроводной сети трехфазного переменного тока, от любого изменяющегося параметра изоляции сети можно произвести, применив символический метод расчета цепи переменного тока, который подробно рассматривается в курсе теоретических основ электротехники. В основе символического метода расчета положена запись физических величин электрических цепей в виде показательных функций

$$\begin{aligned}\bar{U} &= Ue^{j(\omega t + \alpha)}, \\ \bar{I} &= Ie^{j(\omega t + \beta)},\end{aligned}$$

или в алгебраической форме

$$\begin{aligned}\bar{U} &= U \cos(\omega t + \alpha) + jU \sin(\omega t + \alpha), \\ \bar{I} &= I \cos(\omega t + \beta) + jI \sin(\omega t + \beta).\end{aligned}$$

В последнем выражении действительная и мнимая части числа будут иметь знак "-", так как значение синуса и косинуса в третьем квадранте системы координат имеют знак "-".

Векторы показательных функций даны на [рис. 22](#).

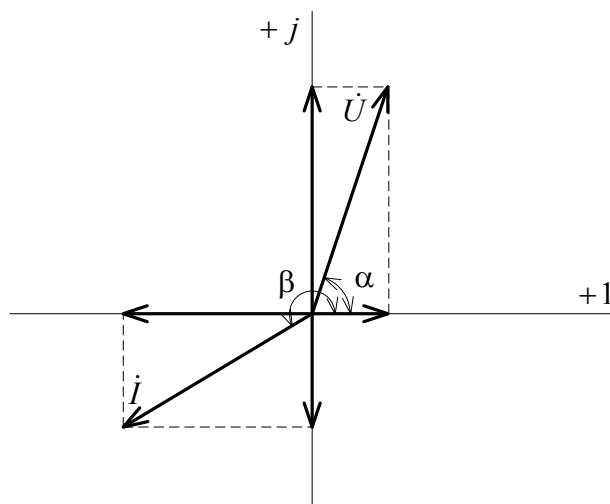


Рис. 22. Векторы показательных функций

Система фазных ЭДС сети напряжением 380/220 В в комплексной форме запишется по [рис. 23](#). Действительная и мнимая оси координат

ориентированы так, что ЭДС фазы А  $E_A$  совпадает с положительным направлением действительной оси, тогда

$$\dot{E}_A = 220 \text{ В},$$

$$E_B = 220 \cos 240^\circ + j 220 \sin 240^\circ \text{ В},$$

$$E_C = 220 \cos 120^\circ + j 220 \sin 120^\circ \text{ В}.$$

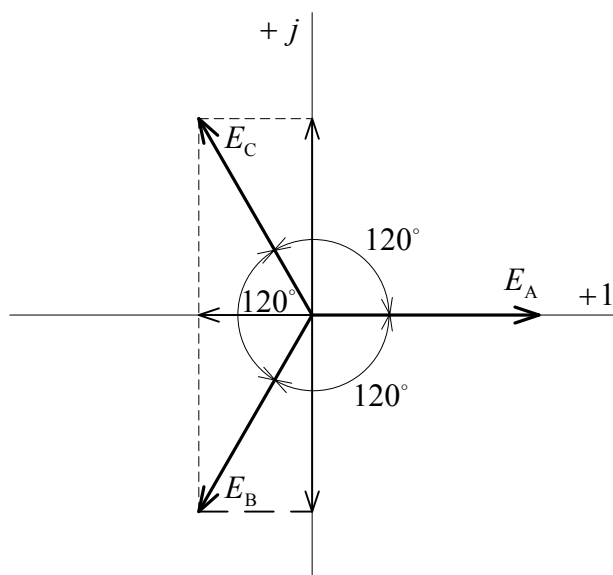


Рис. 23. Векторы фазных ЭДС

Учитывая, что

$$\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}; \sin 120^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\cos 240^\circ = -\frac{1}{2}; \sin 240^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2};$$

запишем

$$\dot{E}_A = 220 \text{ В};$$

$$\dot{E}_B = -110 - j190 \text{ В}; \quad jA = -190;$$

$$\dot{E}_C = -110 + j190 \text{ В}; \quad jA = 190,$$

где  $jA$  – проекция вектора на мнимую ось.

Напомним, что  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица,  $j^2 = -1$ .

Таким образом, при записи физической величины в комплексной форме отражена проекция модуля физической величины на горизонтальную (действительную) ось и проекция на вертикальную (мнимую) ось.

Напряжение смещения нейтрали  $U_0$  (между нулевой точкой и землей) при прикосновении к фазе (например, к фазе А) определяется (см. рис. 24) методом узловых потенциалов:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_A(Y_A + Y_h) + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0 + Y_h}. \quad (47)$$

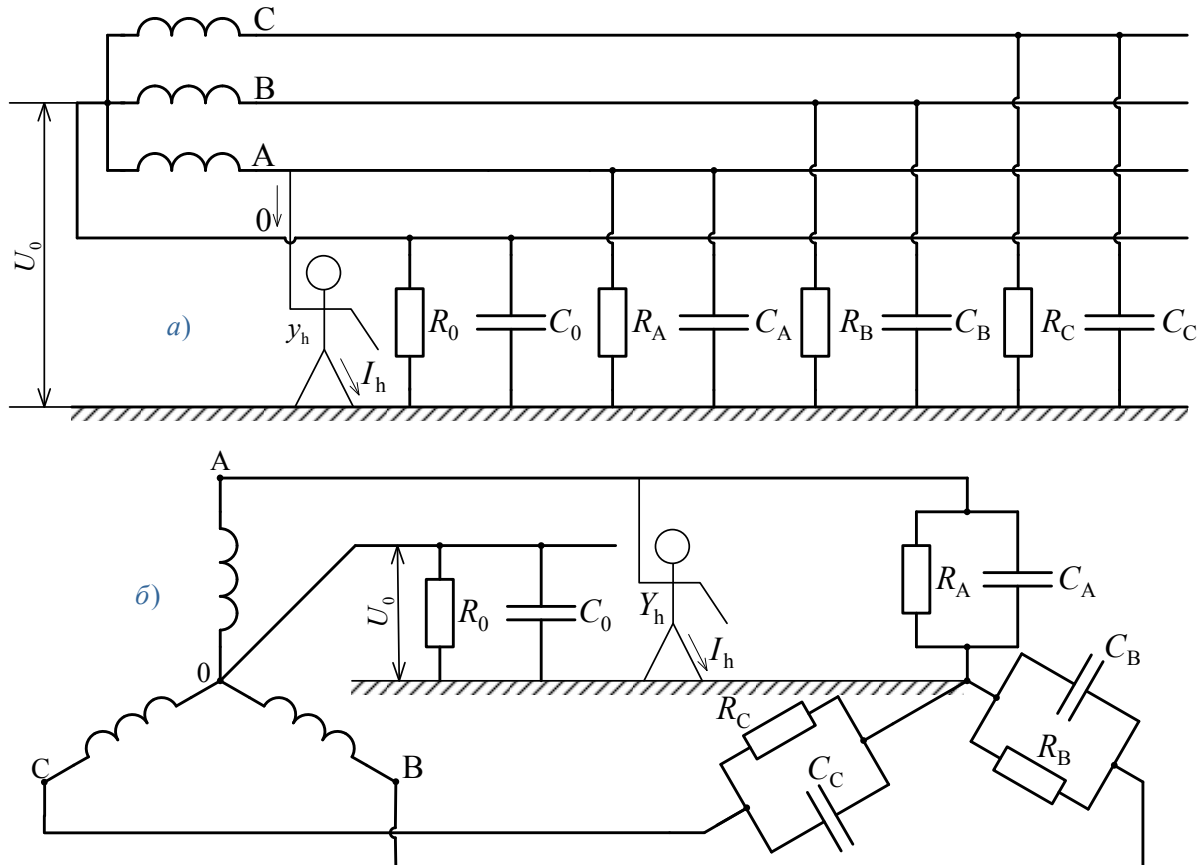


Рис. 24. Прикосновение к фазному проводу в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью:

а) схема сети; б) ее эквивалентная схема

Ток через человека, прикоснувшегося к фазе, определится

$$\dot{I}_h = (\dot{E}_A - \dot{U}_0) Y_h. \quad (48)$$

В случае прикосновения к нулевому проводу напряжение смещения нейтрали определится

$$U_0 = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0 + Y_h}. \quad (49)$$

Тогда ток через человека будет равен

$$\dot{I}_h = \dot{U}_0 Y_h.$$

Числовой пример. Определить ток через человека, прикоснувшегося к фазе сети (см. рис. 24), где  $R_A = R_B = R_C = 4 \text{ кОм}$ ,  $C_A = C_B = C_C = 1 \text{ мкФ}$ ,  $R_0 = 2 \text{ кОм}$ ,  $R_h = 1 \text{ кОм}$ , напряжение сети  $380/220 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Решение: ЭДС равны

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= 220 \text{ В}; \\ \dot{E}_B &= -110 - j190,5 \text{ В}; \\ \dot{E}_C &= -110 + j190,5 \text{ В}.\end{aligned}$$

Проводимость фазы А при прикосновении к ней человека

$$Y_{A1} = G_{A1} + jB_A,$$

где  $G_{A1}$ ,  $B_A$  – реактивное сопротивление изоляции фазы А по отношению к земле равное

$$\begin{aligned}G_{A1} &= \frac{1}{R_{A1}} = \frac{R_A + R_h}{R_A R_h} = \frac{4+1}{4 \cdot 1} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ См}, \\ B_A &= \frac{1}{X_A} = \frac{1}{3,185} = 0,314 \cdot 10^{-3} \text{ См},\end{aligned}$$

где  $X_A$  – реактивное сопротивление изоляции фазы А по отношению к земле равное

$$X_A = \frac{1}{2\pi f C_A} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1} = 3,185 \text{ кОм}.$$

Тогда

$$Y_A = 1,25 \cdot 10^{-3} + j0,314 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Проводимости изоляции фаз В и С

$$\begin{aligned}G_B &= G_C = \frac{1}{R_B} = \frac{1}{4} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \\ B_B &= B_C = B_A = 0,314 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \\ Y_B &= Y_C = 0,25 + j0,314 \cdot 10^{-3} \text{ См}.\end{aligned}$$

Проводимость нулевого провода

$$G_0 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{2} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$B_0 = \frac{1}{X_0} = \frac{1}{0,797} = 1,255 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

где

$$X_0 = \frac{1}{2\pi f C_0} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4} = 0,797 \text{ кОм};$$

$$Y_0 = G_0 + jB_0 = 0,5 \cdot 10^{-3} + j1,255 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Напряжение смещения нейтрали определится по (47)

$$\dot{U}_0 = \frac{220}{2,5 + j2,197}.$$

Для того, чтобы освободиться от комплексного числа в знаменателе, надо умножить числитель и знаменатель на сопряженный комплекс знаменателя, т.е.

$$\dot{U}_0 = \frac{220(2,25 - j2,197)}{(2,25 + j2,197)(2,25 - j2,197)} = \frac{220(2,25 - j2,197)}{2,25^2 + 2,197^2} = 50,1 - j48,9 \text{ В}.$$

Тогда ток через человека определится

$$\dot{I} = (\dot{E}_A - \dot{U}_0)Y_h = (220 - 50,1 + j48,9)1 = 169,9 + j48,9 \text{ мА},$$

где  $Y_h = 1/R_h = 1/(1 \cdot 10^3) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$

Сила (модуль) тока через человека будет найдена

$$I_h = \sqrt{169,9^2 + 48,9^2} = 177 \text{ мА}.$$

## 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 35 КВ

Однофазные замыкания на землю (ОЗН) в сетях напряжением 6 – 35 кВ представляют особую опасность. Хотя токи замыкания на землю малы, вследствие изолированной нейтрали, однако опасность исходит от перенапряжений в электрической сети, которые могут возрасти в несколько раз по сравнению с номинальным напряжением, что приводит к пробоям изоляции обмоток оборудования. По данным статистики из всех электрических повреждений в сетях 6 – 35 кВ однофазные замыкания на землю составляют 72 %. Часто однофазные замыкания на землю сопровождаются выходом из строя (пробой изоляции) высоковольтных двигателей, силовых трансформаторов, кабелей, трансформаторов напряжения и т.д.

### 7.1. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ 6 – 35 КВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ НАПРЯЖЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ФННП)

Контроль изоляции в сетях 6 – 35 кВ осуществляется в некоторых случаях устаревшими пятистержневыми трансформаторами напряжения НТМИ, тремя однофазными трансформаторами ЗНОМ – 6, 10 и 35 кВ или ЗНОЛ. Практика эксплуатации этих трансформаторов свидетельствует о их многочисленных повреждениях вследствие возникновения в некоторых режимах опасных феррорезонансных колебаний, в результате которых появляются недопустимо большие токи в обмотках высокого напряжения.

Перенапряжения достигают высоких значений особенно при возникновении в месте замыкания перемеживающейся дуги. В ряде случаев феррорезонансные явления приводят к ложным срабатываниям устройств контроля изоляции и защиты от ОЗН.

Исследователями предлагались различные усовершенствования защиты оборудования и самих трансформаторов напряжения (ТН) от перенапряжений, в частности, для защиты трансформаторов напряжения предложено включение резисторов между нейтральной точкой высокого напряжения трансформатора и землей.



Взамен морально устаревших ТН типа НТМИ, ЗНОМ, ЗНОЛ разработаны антиферрорезонансные ТН типа ЗНОЛ 06-6 и ЗНОЛ 06-10, НАМИ. Это трехфазные группы, представляющие собой конструктивно отдельные однофазные трансформаторы на напряжение 6 и 10 кВ, которые предназначены для установки в комплектные распределительные устройства и служат для питания электрических измерительных приборов, цепей защиты и сигнализации в электроустановках переменного тока частотой 50 и 60 Гц (см. рис. 25). Взамен трансформаторов ЗНОМ–35 разработаны трансформаторы ЗНОЛЭ-35 (см. рис. 26). В обозначениях трансформаторов напряжения: 3 – трехфазная группа однофазных трансформаторов; Н – трансформатор напряжения; Т – трехфазный; О – однофазный; М – с естественным масляным охлаждением; И – для контроля изоляции; Л – литой корпус; Э – элегазовая изоляция.

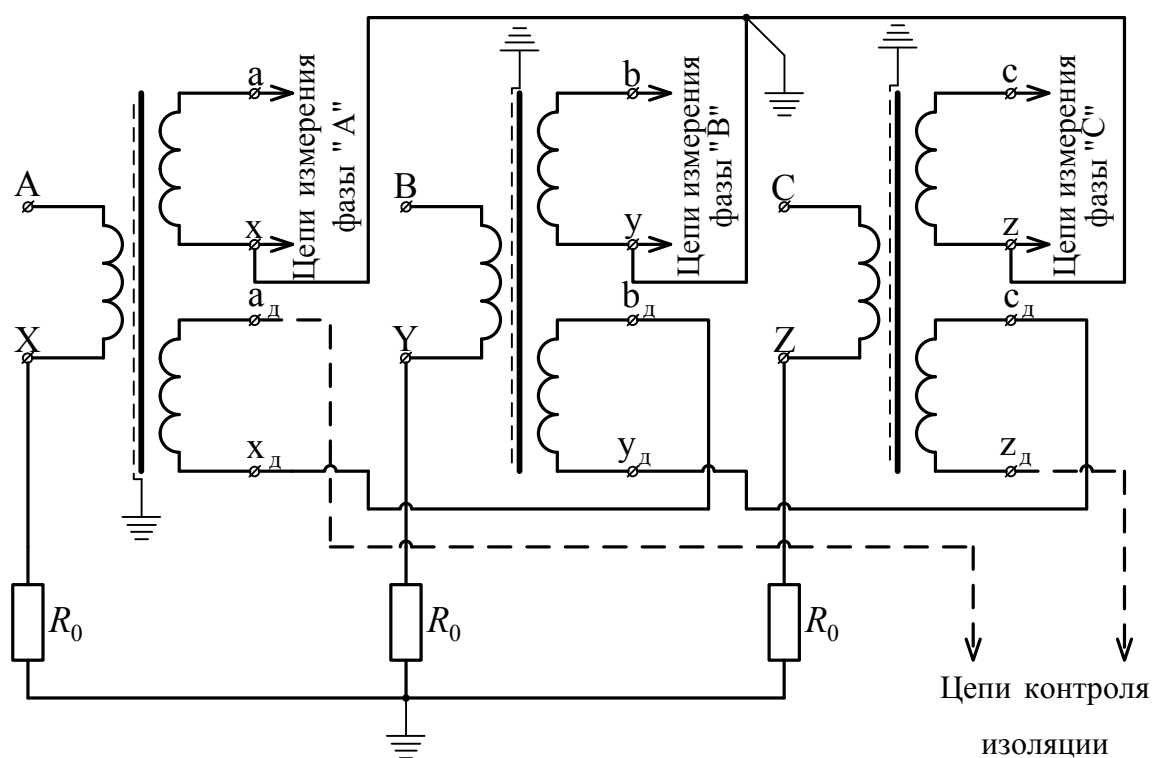


Рис. 25. Схема трехфазной трансформаторной группы ЗНОЛ 06-6 и ЗНОЛ 06-10

Пятистержневые трехфазные трансформаторы напряжения и трансформаторы ЗНОЛ имеют три обмотки на фазу, одна из которых является первичной и две – вторичные. Одна вторичная обмотка соединяется в звез-

ду и используется для питания вольтметров контроля изоляции и параллельных катушек других измерительных приборов (см. рис. 27). Вторая обмотка соединяется в разомкнутый треугольник и используется для сигнализации однофазного замыкания на землю, она является фильтром напряжения нулевой последовательности (ФННП). К ее зажимам подключают реле, которое срабатывает при появлении однофазного замыкания на землю, безразлично, где произошло замыкание – на шинах подстанции или в любой отходящей от подстанции линии. Один из вольтметров, подключенный к фазам вторичной обмотки, соединенной в звезду, покажет нуль (или от нуля до  $U_\phi$ ). В этой фазе произошло замыкание на землю. Два других вольтметра покажут линейное напряжение (или от  $U_\phi$  до  $U_\Delta$  в зависимости от величины сопротивления, через которое произошло замыкание на землю).

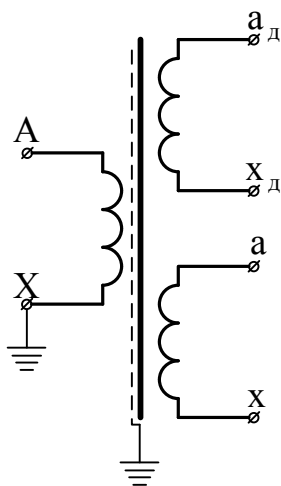


Рис. 26. Схема одной ячейки группы трансформаторов ЗНОЛЭ–35

В качестве фильтров напряжения нулевой последовательности вместо трансформаторов НТМИ и ЗНОЛ могут использоваться три однофазных трансформатора напряжения ЗНОМ, вторичные обмотки которых соединяются в открытый треугольник (см. рис. 28).

Следует отметить, что контроль изоляции сети с помощью ФННП является не селективным, поэтому первоначальный поиск места замыкания на землю осуществляется попеременным отключением отходящих от подстанции кабельных и воздушных линий.

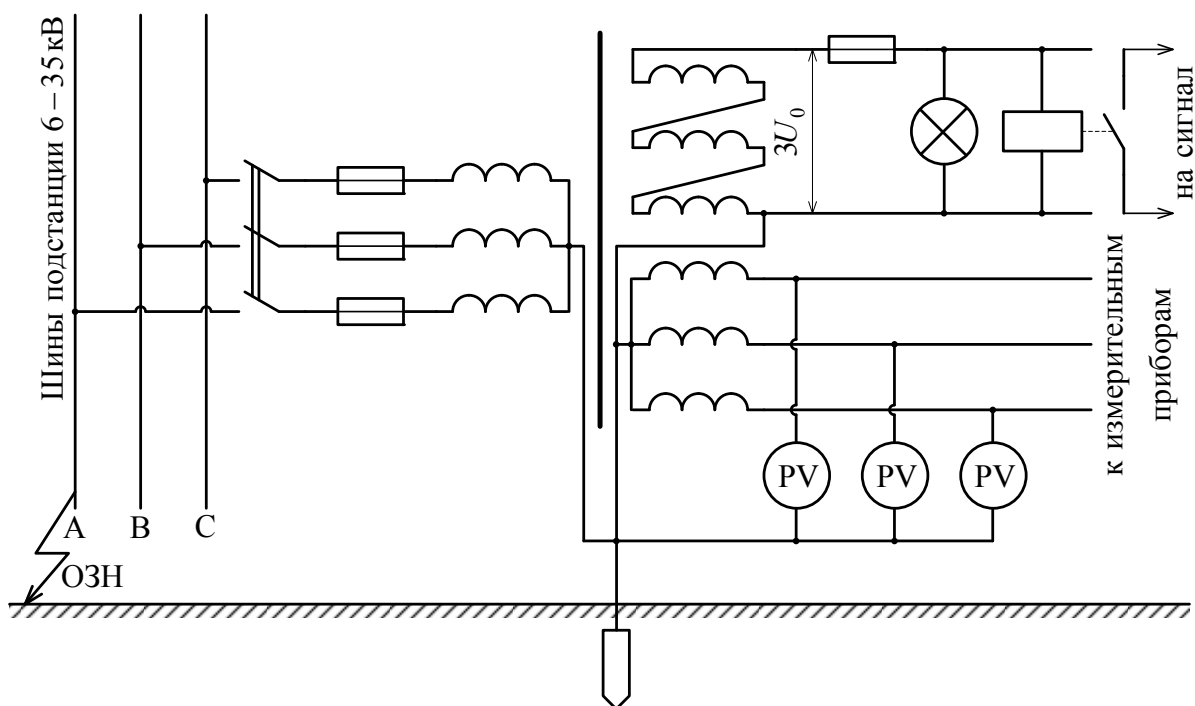


Рис. 27. Схема включения вольтметров для контроля изоляции сети через трансформаторы напряжения

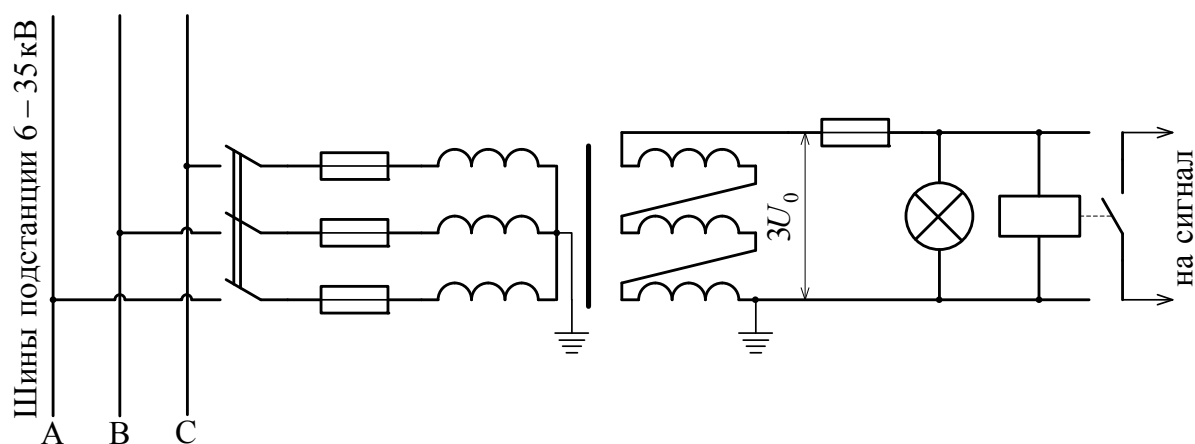


Рис. 28. Схема контроля изоляции сети с помощью трех однофазных трансформаторов напряжения ЗНОМ

Фильтры напряжения нулевой последовательности реагируют на асимметрию изоляции сети, что имеет место при ОЗН. В некоторых случаях при эксплуатации силовых трансформаторов оперативный персонал сталкивается, казалось бы, с однофазным замыканием на землю в обмотках силового трансформатора, хотя при контрольных замерах отмечается, что величины сопротивления изоляции обмоток трансформатора в норме, но имеет место ее асимметрия. Если при подключении отходящих от подстанции линий сопротивления изоляции сети симметрируются, такое явление

считается нормальным, и эксплуатация трансформатора допустима.

## 7.2. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ 6 – 35 кВ С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРОВ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (ФТНП)

В практике эксплуатации сетей 6 – 35 кВ для контроля изоляции сети по отношению к земле наряду с ФННП широко применяются ФТНП на базе трансформаторов тока ТЗЛ-70, ТЗЛМ-70, ТЗР-65 и трансформаторов тока ТНП с подмагничиванием.

У этих трансформаторов тока, в отличие от обычных трансформаторов тока, предназначенных для измерительных приборов и релейной защиты, первичные и вторичные токи не пропорциональны. В связи с этим трансформаторы тока в ФТНП не характеризуются коэффициентом трансформации, как обычные –  $K_{\text{тт}} = I_1 / I_2$ . У трансформаторов тока нулевой последовательности выходное напряжение  $U_2$  не имеет прямой пропорциональности с первичным током  $I_1$ .

Контроль изоляции фильтром тока нулевой последовательности основан на фиксировании несимметрии магнитных полей токов трех фаз кабеля (шин) при однофазном замыкании на землю. На [рис. 29](#) трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП) охватывает все три жилы кабеля и заземляющий четвертый провод.

При нормальной работе сумма магнитных потоков всех трех жил кабеля равна нулю. В случае однофазного замыкания на землю, например, на корпус передвижной установки (экскаватора), сумма магнитных потоков будет равна результирующему потоку за счет появления  $I_{\text{озн}}$

$$\Phi_{\text{рез}}^{\text{I}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3.$$

Однако при возвращении тока  $I_{\text{озн}}$  по заземляющей жиле кабеля наводится встречный поток  $\Phi_{\text{рез}}^{\text{II}}$ , равный потоку  $\Phi_{\text{рез}}^{\text{I}}$ . Потоки  $\Phi_{\text{рез}}^{\text{I}}$  и  $\Phi_{\text{рез}}^{\text{II}}$  взаимно уничтожаются, реле не срабатывает, хотя существует ОЗН. Поэтому заземляющий провод перед тем как заземлить, пропускают через окно трансформатора тока. Создается магнитный поток  $\Phi_{\text{рез}}^{\text{III}}$ , и реле срабатывает, сигнализируя о замыкании на землю. Если электроустановка зазем-

лена через корпус (например, экскаватор стоит на сыром грунте), и ток ОЗН не возвращается по заземляющей жиле, тогда реле срабатывает за счет  $\Phi_{рез}^I$ .

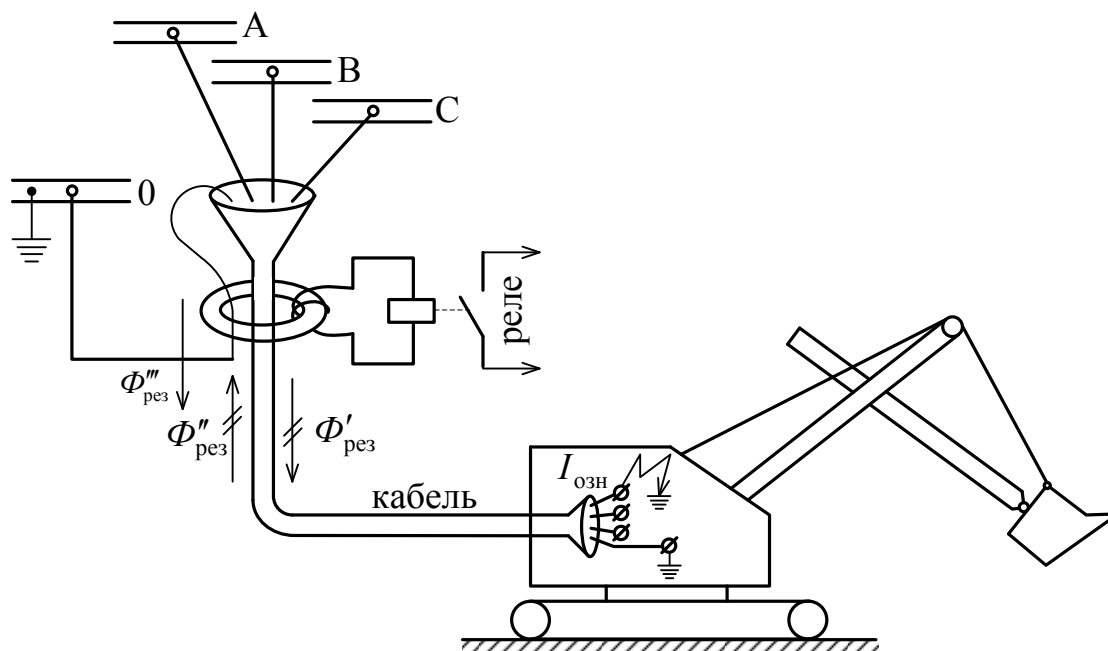


Рис. 29. Схема контроля изоляции с помощью ФТНП

В коротких сетях, где мала емкость сети по отношению к земле, а, следовательно, и мал ток ОЗН, контроль изоляции затруднен. В этом случае для повышения чувствительности контроля изоляции применяют трансформаторы с подмагничиванием типа ТНП, которые имеют две вторичные обмотки, одна из которых рабочая для питания реле, вторая – подмагничивающая, которая подключается к трансформатору напряжения на 100 В.

На рис. 30 представлены кривые зависимости намагничивания трансформатора. При подмагничивании током  $I_{\Pi}$  появление незначительного тока  $I_{озн}$  (см. рис. 30, б) вызывает резкое увеличение выходного напряжения  $U_{вых}$  трансформатора, тем самым повышается его чувствительность к току ОЗН.

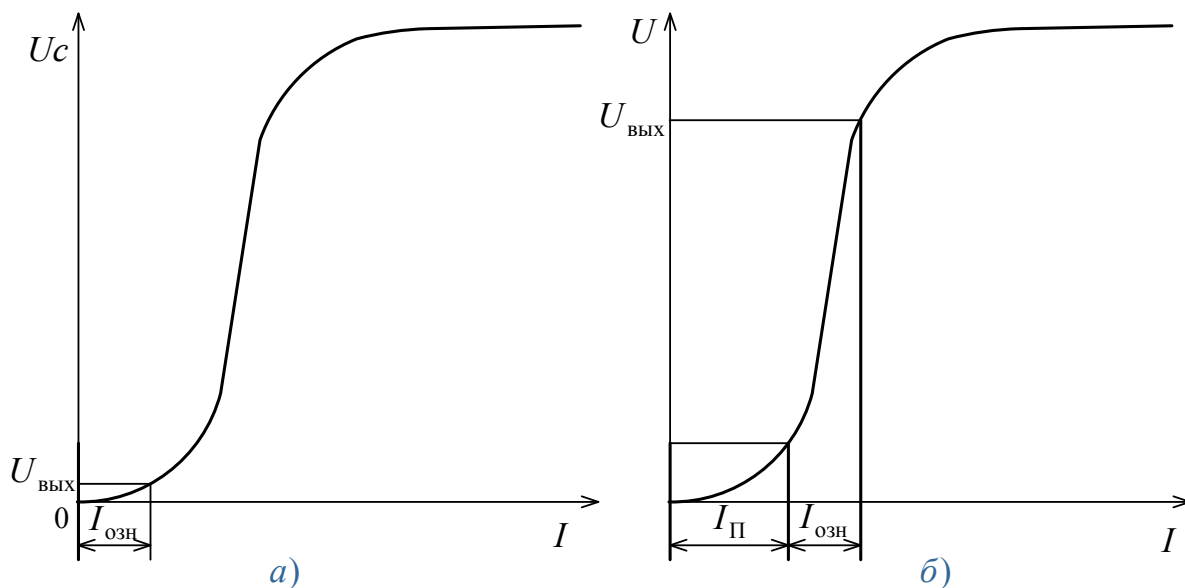


Рис. 30. Работа трансформатора тока: а – без подмагничивания; б – с подмагничиванием

При ОЗН в сетях с изолированной нейтралью ток однофазного замыкания на землю появляется во всех отходящих линиях по величине, зависящей от сопротивления изоляции той или другой линии, а по напряжению – в зависимости от расположения точки замыкания на землю (см. рис. 31). Емкостная проводимость изоляции в сетях 6 – 35 является преобладающей и во много раз больше активной проводимости. Поэтому при расчетах тока ОЗН в большинстве случаев учитывается только емкостная проводимость.

Алгебраическая сумма собственных токов ОЗН отходящих линий равна общему току ОЗН всей сети:

$$I_{\text{ОЗН}} = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + \dots + I_{cn}, \quad (50)$$

где  $n$  – число отходящих от подстанции линий.

*Следует отметить, что контроль изоляции с помощью ФТНП является селективным в ограниченных случаях* – при большом количестве отходящих от подстанции линий с примерно одинаковыми длинами (одинаковыми емкостями по отношению к земле). Если количество отходящих линий мало (до 6) и, особенно, при их различных длинах (емкостях), то селективность нарушается. В практике эксплуатации сетей, кроме того, происходит частое включение и отключение линий, изменение их длин, при этом, соответственно должны каждый раз изменяться уставки срабатывания исполнительных реле. В этом случае обеспечение селективности

контроля изоляции является совершенно невозможным.

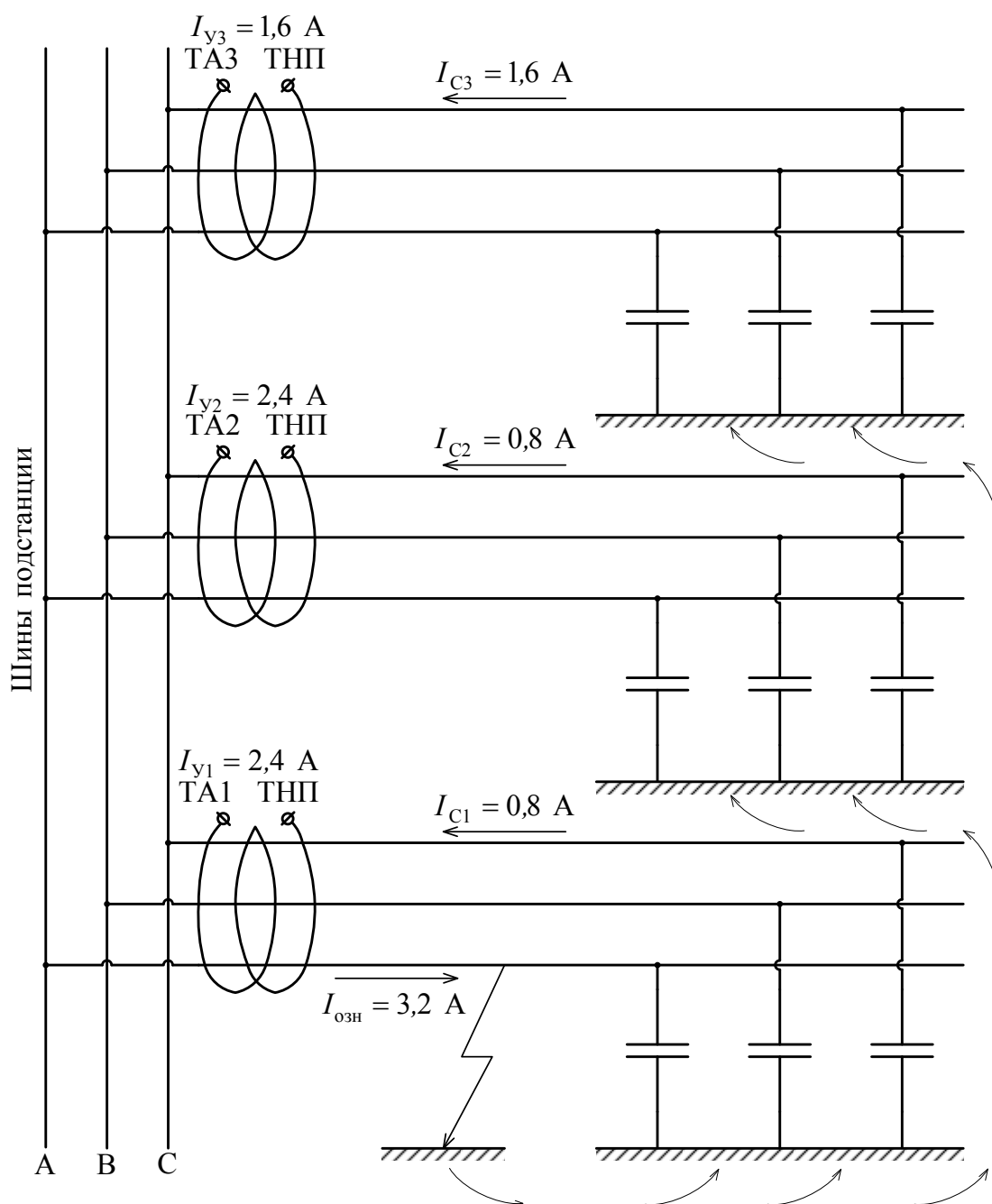


Рис. 31. Трехфазная трехпроводная сеть с изолированной нейтралью.  
Распределение ОЗН по отходящим ЛЭП:  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$  – собственные токи  
отходящих линий

Пусть в сети напряжением 10,5 кВ (см. рис. 31) ток однофазного замыкания на землю  $I_{озн} = 3,2$  А, который распределился по отходящим от подстанции линиям:

$$I_{c1} = 0,8 \text{ А}; I_{c2} = 0,8 \text{ А}; I_{c3} = 1,6 \text{ А},$$

т.е.

$$I_{\text{озн}} = I_{\text{с1}} + I_{\text{с2}} + I_{\text{с3}} = 0,8 + 0,8 + 1,6 = 3,2 \text{ А}.$$

Без учета коэффициента надежности ( $K_{\text{н}} = 1,1 \div 1,3$ ) и коэффициента броска тока при ОЗН в сети ( $K_{\text{б}} = 2 \div 3$  в реактивированных сетях – с установкой дугогасящего реактора и  $K_{\text{б}} = 5 \div 6$  в не реактивированных сетях – без реактора) уставки срабатывания реле определяются

$$I_{\text{y1}} = I_{\text{озн}} - I_{\text{с1}} = 3,2 - 0,8 = 2,4 \text{ А};$$

$$I_{\text{y2}} = I_{\text{озн}} - I_{\text{с2}} = 3,2 - 0,8 = 2,4 \text{ А};$$

$$I_{\text{y3}} = I_{\text{озн}} - I_{\text{с3}} = 3,2 - 1,6 = 1,6 \text{ А}.$$

Очевидно, что при ОЗН в ЛЭП-1 ток через трансформатор тока ТТНП-1 будет больше, чем собственный ток  $I_{\text{с1}}$ , в результате реле в этой линии сработает, но сработает и реле в ЛЭП-3, так как через ТТНП – 3 пройдет ток, равный току уставки  $I_{\text{y3}} = I_{\text{с3}}$ . Реле ЛЭП-3 сработает. Хотя в этой линии ОЗН нет – ложное срабатывание. В практике эксплуатации сетей следует обращать особое внимание на работу этого способа контроля изоляции.

Таким образом, контроль изоляции с помощью ФННП, где контролируется факт появления напряжения нулевой последовательности  $3U_0$ , и с помощью ФТНП, где контролируется факто появления тока нулевой последовательности  $3I_0$ , является неселективным или ограниченно селективным, такой контроль называется однофакторным. Селективный контроль изоляции является, как правило, многофакторным. При многофакторном контроле изоляции контролируется два или более параметра, например,  $3U_0$ ,  $3I_0$  и угол сдвига фаз между ними. Такими устройствами многофакторного контроля изоляции являются устройства РЗН-3, УЗЗН-1м, ЗЗП-1м, РФ-1, РФ-2 и др. В многофакторных устройствах разные параметры контролируются одновременно и с регулируемой чувствительностью. Настройку этих устройств, как правило, производят двухлучевым осциллографом.



### 7.3. РАСЧЕТ ТОКА ОЗН В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 6 – 35 кВ

Оценка численной величины тока ОЗН всей сети и собственных токов ОЗН отходящих линий требуется как для решения вопросов величин сопротивления заземления электроустановок, так и для расчета защиты от замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ.

Ток ОЗН  $I_{\text{озн}}$  в амперах на землю (корпус) можно приближенно определить по эмпирической формуле Л. Н. Баптиданова и В. И. Тарасова (погрешность до 15 %)

$$I_{\text{озн}} = \frac{U_{\text{л}}(35l_{\text{к}} + l_{\text{в}})}{350}, \quad (51)$$

где  $U_{\text{л}}$  – линейное напряжение сети, кВ;  $l_{\text{к}}$  – сумма длин всех электрически связанных кабельных линий сети (данной ступени напряжения), км;  $l_{\text{в}}$  – сумма длин всех электрически связанных воздушных линий сети (данной ступени напряжения), км.

Собственный ток ОЗН кабельной линии, отходящей от подстанции, можно определить по выражению:

$$I_{\text{ск}} = \frac{U_{\text{л}} l_{\text{к}}}{10},$$

где  $l_{\text{к}}$  – длина кабеля в данной линии, км.

Собственный ток ОЗН воздушных линий, отходящей от подстанции, определяется:

$$I_{\text{озн}} = \frac{U_{\text{л}} I_{\text{в}}}{350},$$

где  $I_{\text{в}}$  – длина воздушной линии, км.

Более точный расчет тока ОЗН с учетом емкости всех основных элементов сети, а также подключенного оборудования, можно производить по формуле:

$$I_{\text{озн}} = 3U_{\text{ф}} w (C_{\text{в}} l_{\text{в}} + C_{\text{к}} l_{\text{к}} + C_{\text{э}} N_{\text{э}} + C_{\text{тр}} N_{\text{тр}} + C_{\text{дв}} N_{\text{дв}} + \dots) 10^{-6} \quad (52)$$

где  $U_{\text{ф}}$  – фазное напряжение сети, В;  $C_{\text{в}}$ ,  $C_{\text{кл}}$  – емкости на фазу по отношению к земле 1 км, соответственно воздушной и кабельной линии;  $l_{\text{в}}$ ,  $l_{\text{кл}}$  – суммарные длины воздушной и кабельной линии, км;  $w = 2\pi f$  – угловая

частота тока, рад/с;  $C_3$ ,  $C_{тр}$ ,  $C_{дв}$  – емкости на фазу электрооборудования, соответственно, экскаваторов, стационарных и передвижных трансформаторов, двигателей.

Величина тока  $I_{озн}$  будет определена тем точнее, чем большее количество элементов сети будет учтено в этой формуле.

Величину тока ОЗН электросети в целом и собственные токи можно определить по удельным емкостным токам замыкания на землю по выражению

$$I_{озн} = i_b l_b + i_k l_k + i_n N_n + \dots,$$

где  $i_b$ ,  $i_k$  – удельная величина емкостного тока замыкания на землю, соответственно, 1 км воздушной и кабельной линий, А/км;  $l_b$ ,  $l_{кл}$  – длина соответственно воздушной и кабельной линии, км;  $i_n$  – удельный емкостной ток замыкания на землю элемента сети (трансформатора, двигателя, выключателя и т.п.), А;  $N_n$  – количество элементов электросети, принимаемых к расчету, шт.

Данные о величинах удельных емкостей и емкостных токов замыкания на землю по элементам электрических сетей приводятся в справочной литературе, некоторые из них приведены в табл. 7, 8, 9, 10, 11.

Таблица 7

Удельные емкости на фазу и токи замыкания на землю для воздушной линии с высотой подвеса проводов  $h = 6$  м

Сечение провода линии, мм <sup>2</sup>	Линия с заземляющим проводом		Линия без заземляющего провода	
	$C_{уд}$ пФ/км	$I_{уд}$ , мА/км	$C_{уд}$ пФ/км	$I_{уд}$ , мА/км
1	2	3	4	5
16	5,04	16,4	4,43	14,5
25	5,15	16,8	4,50	14,7
35	5,21	17,0	4,55	14,9
50	5,30	17,3	4,63	15,1
95	5,48	17,9	4,75	15,5

Таблица 8

Удельные емкостные токи (А/км) замыкания на землю для воздушных сетей (усредненные значения)

Линия	Номинальные напряжения сети, кВ		
	6	10	35
Одноцепная без троса	0,017	0,027	0,095
Одноцепная с тросом	0,020	0,033	0,310
Двухцепная	0,014	0,023	0,78

Таблица 9

Удельные емкости на фазу и токи замыкания на землю бронированных трехжильных кабелей с бумажной пропитанной изоляцией

Сечение жил кабеля $s$ , мм <sup>2</sup>	Удельная емкость жилы кабеля, пФ/м	Емкостные токи замыкания на землю для кабельных сетей, мА/км		
		Рабочее напряжение сети, кВ		
		6	10	35
3×16	115	370	—	—
3×25	140	470	370	—
3×35	160	540	430	—
3×50	180	630	490	—
3×70	210	730	570	3500
3×95	240	850	660	3900
3×120	270	950	740	4600
3×150	315	1070	820	5000
3×185	360	1180	900	—
3×240	400	1310	1000	—

Таблица 10

Удельные емкости и токи замыкания на землю токоведущих жил по отношению к заземленному экрану кабелей марки КШВГ

Сечение жил кабеля $s$ , мм <sup>2</sup>	Удельная емкость жилы кабеля, пФ/м	Удельный емкостной ток кабельной линии при напряжении 6 кВ, мА/км
3×15+1×10	290	950
3×35+1×10	330	1080
3×50+1×16	360	1180
3×70+1×16	430	1400
3×95+1×25	490	1600
3×120+1×35	530	1730
3×150+1×35	590	1930

Таблица 11

Удельные емкости на фазу и токи замыкания на землю отдельных элементов электросети

Элементы	Емкость, пФ	Емкостной ток для сети 6 кВ, мА
1	2	3
Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором мощностью до 260 кВт	9 – 12	30 – 40
Асинхронные электродвигатели с фазным ротором мощностью 250 – 630 кВт	10 – 14	33 – 46
Синхронные двигатели мощностью 425 – 525 кВт	15 – 20	49 – 65

1	2	3
Трансформаторные подстанции с трансформаторами мощностью 10 – 10 кВА	0,43 – 0,55	1,4 – 1,8
Экскаваторы:		
ЭКГ – 4, 6	12,5 – 16	41 – 52
ЭВГ – 8	24 – 36	78 – 98
ЭШ – 14/65	67 – 88	220 – 288
Переключательные пункты ЯКНО, КРН	0,5	1,6

#### 7.4. КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ОЗН В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 6 – 35 КВ

Компенсация емкостной составляющей значительно снижает ток ОЗН и устраняет негативные явления, связанные с ним.

По величине тока ОЗН сети решается вопрос о компенсации емкости сети по отношению к земле.

Компенсация емкостной составляющей тока  $I_{\text{ОЗН}}$  является обязательной, если в сети напряжением

$$U = 6 \text{ кВ } I_{\text{ОЗН}} \geq 30 \text{ А};$$

$$U = 10,5 \text{ кВ } I_{\text{ОЗН}} \geq 20 \text{ А};$$

$$U = 15,75 - 20 \text{ кВ } I_{\text{ОЗН}} \geq 15 \text{ А};$$

$$U = 35 \text{ кВ } I_{\text{ОЗН}} \geq 10 \text{ А}.$$

По выражению (51) можно установить, насколько дополнительно можно увеличить длину воздушных и кабельных линий, не превосходя величин токов ОЗН без компенсации емкостной составляющей или решить вопрос о необходимости установки компенсирующего устройства при увеличении длины воздушных и кабельных линий и при увеличении тока  $I_{\text{ОЗН}}$  выше, чем допустимо.

Для компенсации емкостной составляющей тока ОЗН используются дугогасящие катушки (ДГК) или дугогасящие реакторы (ДГР), выпускае-

мые отечественной промышленностью серийно, индуктивность последних является регулируемой.

На рис. 32 представлена схема сети с изолированной нейтралью напряжением 6 – 35 кВ, где нейтраль трансформатора (или генератора) соединена с землей (заземляющим устройством) через ДГР. Основное назначение ДГР – свести до минимума ток ОЗН в точке замыкания путем компенсации емкостной составляющей. Аналогично осуществляется компенсация емкости сети по отношению к земле в трехфазных сетях до 1140 В с изолированной нейтралью с автоматическим регулированием индуктивности дросселя реле утечки, либо отпайками в зависимости от длины линии и ее разветвленности. Дугогасящий реактор – это искусственная индуктивная нагрузка в контуре нулевой последовательности. За счет компенсации емкостной составляющей тока ОЗН, а она является преобладающей по сравнению с активной составляющей, улучшаются условия гашения дуги, и в большинстве случаев предотвращаются переходы однофазных замыканий на землю в двух- и трехфазные короткие замыкания, значительно снижаются перенапряжения при перемежающихся ОЗН и феррорезонансных колебаниях.

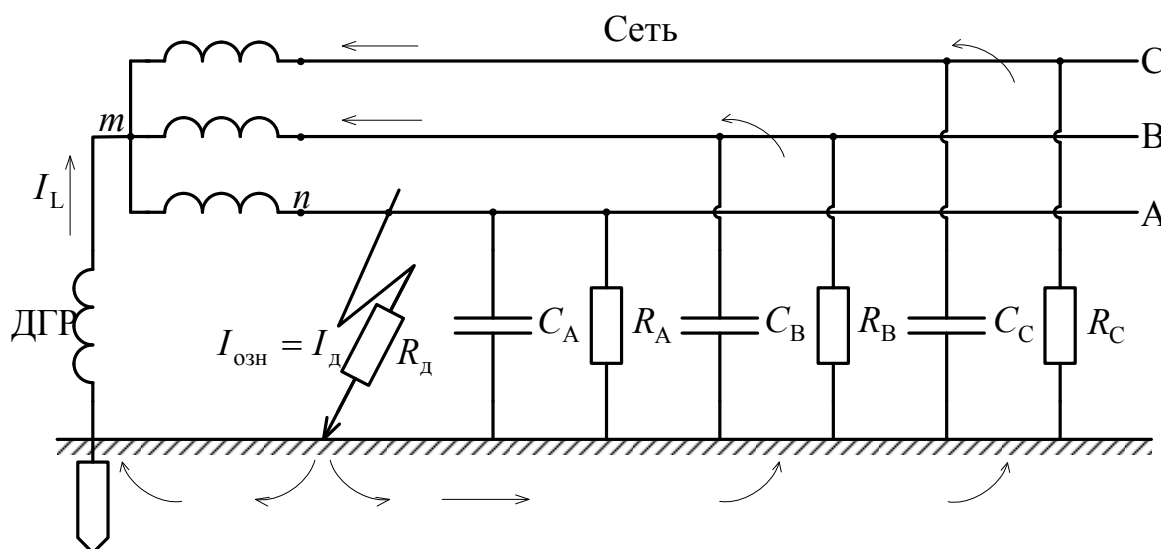
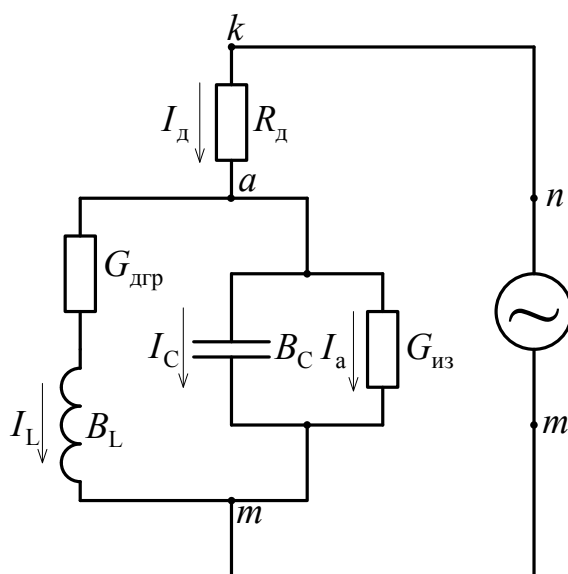


Рис. 32. Однофазное замыкание на землю в компенсированной сети  
6 – 35 кВ

Для компенсации емкости сети индуктивность ДГР не должна быть любой. Полная компенсация емкости имеет место при резонансной настройке, когда индуктивная проводимость реактора  $b_L$  равна емкостной

проводимости сети  $b_c$  по отношению к земле, т.е. должен быть резонанс токов в параллельно соединенных между собой индуктивности реактора  $L$  и емкости сети  $C$ . При резонансе токов участок цепи параллельно соединенных  $L$  и  $C$  оказывает току ОЗН бесконечно большое сопротивление, тогда через последовательно соединенное с этим участком сопротивление дуги  $R_\delta$  в точке ОЗН будет протекать минимальный ток ОЗН только за счет активной проводимости изоляции сети и реактора. Для тока нулевой последовательности на [рис. 33](#) представлена схема замещения эквивалентная схеме изображенной на [рис. 32](#).



[Рис. 33](#). Схема замещения

Условием резонанса токов является равенство  $B_L = B_C$ , тогда полная проводимость участка  $am$  ([см рис. 33](#)) определяется

$$Y_{am} = \sqrt{(G_{дрг} + G_{из})^2 + (B_L - B_C)^2} = G_{дрг} + G_{из},$$

т.е. проводимость участка  $am$  минимально, следовательно, сопротивление – максимально, поэтому ток однофазного замыкания будет снижен до минимальной величины. Без учета сопротивления проводов сети и обмоток силового трансформатора можно записать

$$R_{общ} = R_\delta + \frac{1}{G_{дрг} + G_{из}} = R_\delta + R_{am} = R_{max},$$

тогда

$$I_{\delta} = \frac{U_{\phi}}{R_{\max}} = I_{\min}.$$

Следует иметь ввиду, что, если ток через дугу – минимальный, то ток через емкость сети и ток через ДГР достигают значительно больших величин. В этой связи, для того, чтобы уменьшить перенапряжения между нейтральной точкой и землей, а также между сетью и землей при резонансной настройке ДГР, величину индуктивности  $L$  реактора не доводят до явления резонанса (построенный резонанс).

Пример расчета тока, протекающего через изоляцию сети, дугогасящий реактор и точку замыкания на землю в сети 6,3 кВ.

Пусть емкость сети по отношению к земле  $C_{\text{из}} = 32$  мкФ, активное сопротивление изоляции  $R_{\text{из}} = 20$  кОм. Нейтраль трансформатора сети соединена с землей через ДГР, реактивное сопротивление которого  $X_L = 76$  Ом, активное сопротивление ДГР  $R_p = 67$  Ом, ДГР мощностью  $S = 75$  кВА рассчитан на ток до 36 А. Сопротивление дуги замыкания на землю  $R_3 = 30$  Ом.

Расчет произведем по схеме приведенной на [рис. 33](#). Для компенсации емкости сети следует установить сопротивление реактора, т.е.

$$X_L = X_C = \frac{10^6}{2\pi f C_{\text{из}}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 32} = 99,5 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление изоляции сети определяется

$$X_{\text{из}} = \frac{1}{Y_{\text{из}}} = \frac{1}{\sqrt{G_{\text{из}}^2 + B_{\text{из}}^2}},$$

где  $G_{\text{из}}$  – активная проводимость изоляции сети, См;  $B_{\text{из}}$  – реактивная проводимость изоляции сети, См.

Далее

$$G_{\text{из}} = \frac{1}{R_{\text{из}}} = \frac{1}{20 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$B_{\text{из}} = \frac{1}{X_{\text{из}}} = \frac{1}{X_c} = \frac{1}{99,5} = 100,5 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Y_{\text{из}} = \sqrt{G_{\text{из}}^2 + B_{\text{из}}^2} = \sqrt{(5 \cdot 10^{-5})^2 + (100,5 \cdot 10^{-4})^2} = 100,5 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$



$$Z_{из} = \frac{1}{Y_{из}} = \frac{1}{100,5 \cdot 10^{-4}} = 99,5 \text{ Ом}.$$

Для компенсации емкости необходимо, чтобы реактивная проводимость реактора была равна реактивной проводимости изоляции сети, т.е.

$$B_p = B_{из} = 100,5 \cdot 10^{-4} \text{ См},$$

тогда

$$X_p = \frac{1}{B_p} = \frac{1}{100,5 \cdot 10^{-4}} = 99,5 \text{ Ом}.$$

Параметры параллельного участка *am* (см. рис. 33) равны

$$G_{am} = G_{из} + G_p = 0,00005 + 0,00465 = 0,0047 \text{ См};$$

$$y_{am} = \sqrt{g_{am}^2 + b_{am}^2} = \sqrt{g_{am}^2 + (b_{из} - b_p)^2} = g_{am} = 0,0047 \text{ См};$$

$$z_{am} = \frac{1}{y_{am}} = \frac{1}{0,0047} = 213 \text{ Ом},$$

где

$$g_p = \frac{R_p}{z_p^2} = \frac{67}{120^2} = 0,00465 \text{ См}.$$

Следует иметь ввиду, что  $Z_{am} = R_{am}$ , тогда полное сопротивление цепи замыкания на землю определяется

$$Z_{общ} = R_d + R_{am} = 30 + 213 = 243 \text{ Ом}.$$

Ток в точке замыкания на землю

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_{общ}} = \frac{3642}{243} = 15 \text{ А}.$$

Напряжение между землей и сетью, а также на ДГР определяется

$$U_{доп} = I_d Z_{ам} = 15 \cdot 213 = 3195 \text{ В}.$$

Токи, проходящие через изоляцию сети и ДГР, будут найдены

$$I_{из} = \frac{U_{ам}}{Z_{из}} = \frac{3195}{99,5} = 32,1 \text{ А};$$

$$I_p = \frac{U_{ам}}{Z_p} = \frac{3195}{120} = 26,6 \text{ А}.$$

Сети с изолированной нейтралью, в связи с малыми токами замыка-

ния на землю, применяются в тех случаях, где предъявляются повышенные требования к пожаро- и взрывобезопасности (нефте- и газовые производства, лакокрасочные производства, мукомольные и сахарные заводы, углеобогатительные фабрики и комплексы, подземные выработки, шахты особо опасные по газу и пыли, мануфактурные производства, суконные фабрики и т.п.).

### 7.5. КОМПЕНСАЦИЯ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОЗН В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6 – 35 КВ

При развитых кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ на современных промышленных предприятиях и в городских сетях в ряде случаев ОЗН достигает 200 – 400 А. Поэтому компенсация только емкостной составляющей тока ОЗН уже не является достаточным способом снижения  $I_{\text{озн}}$ , а, следовательно, надежным условием работы таких сетей. В этой связи возникла необходимость компенсации активной составляющей тока ОЗН наряду с емкостной.

Для компенсации активной составляющей ОЗН предложены два способа – пассивный и активный [10]. Пассивный способ основан на создании искусственной несимметрии в сети, а активный – введением в сеть дополнительных напряжений.

Для реализации первого способа разработаны статические устройства, которые подключаются к сети (см. рис. 34) к отстающей фазе по отношению к фазе, замкнувшей на землю, подключается дополнительная емкость  $\Delta C$ ; к опережающей фазе подключается индуктивность  $\Delta L$ .

В схеме на рис. 34  $C$  и  $R$  – емкость фаз и сопротивление утечек изоляции относительно земли;  $R_3$  – сопротивление в месте замыкания; ОК и ДО – обмотка компенсации и дополнительная обмотка дугогасящего реактора;  $\Delta L$  и  $\Delta C$  – индуктивность и емкость, подключаемые для компенсации активной составляющей;  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$  – фазные напряжения источника питания;  $\dot{U}_0$  – напряжение нейтрали;  $I_0$  – остаточный ток;  $\dot{U}_d$  – напряжение, вводимое в сеть для компенсации активной составляющей;  $I_{\Delta C}$  и  $I_{\Delta L}$  – токи, обусловленные емкостью  $\Delta C$  и индуктивностью  $\Delta L$ .

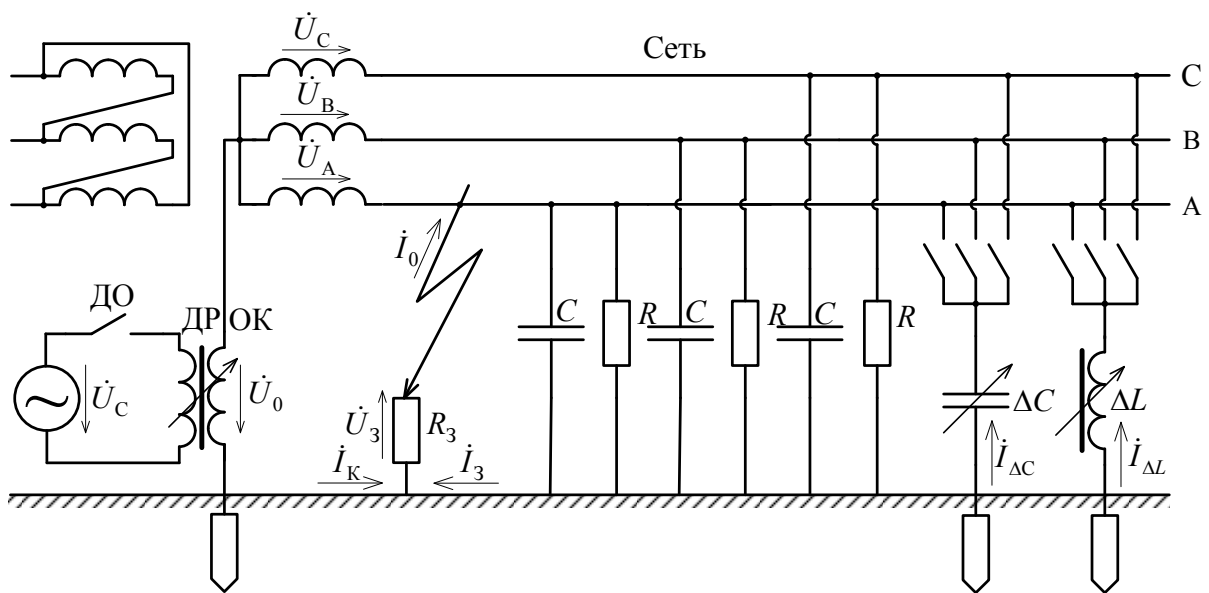


Рис. 34. Трехфазная схема замещения сети

Например, при замыкании фазы А на землю (см. рис. 34) емкость подключается к фазе В, а индуктивность к фазе С.

При реализации второго способа компенсации активной составляющей тока ОЗН в нейтраль сети через дугогасящий реактор или однофазный трансформатор напряжения вводится дополнительное напряжение  $\dot{U}_д$ , совпадающее с фазным напряжением поврежденной фазы либо опережающее его на определенный угол.

Пассивный способ компенсации может быть сравнительно просто реализован в электрических сетях напряжением до 1000 В. Однако его использование в электросетях напряжением 6, 10 и 35 кВ связано с рядом технических трудностей.

Эти трудности возникают в связи со сложностью регулирования емкости при соответствующих классах высоких напряжений. Если индуктивность можно регулировать как плавно, так и ступенчато, то емкость изменять плавно простыми средствами не представляется возможным. Использование быстродействующих полупроводниковых высоковольтных выключателей является довольно сложной технической задачей.

При активном способе компенсации требуется регулирование величины вводимого напряжения  $U_д$ , что является относительно простой техни-

ческой задачей, хотя и при этом способе имеют место определенные трудности.

Рассмотренные способы компенсации активной составляющей тока ОЗН являются перспективными направлениями и служат предметом дальнейших исследований и конструирования устройств коммутации и регулирования.

## 7.6. ГАЛЬВАНИЧЕСКИ СВЯЗАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Интенсивное внедрение в промышленное производство разнообразной полупроводниковой техники обусловило широкое распространение гальванически связанных сетей переменного и постоянного тока. В настоящее время многими организациями решаются вопросы экономической целесообразности применения полупроводниковой техники, управления и надежности преобразовательных устройств. Несомненно, что особое внимание должно быть уделено и вопросам обеспечения безопасности персонала, обслуживающего такие устройства и сети [11]. Наряду с обеспечением безопасности персонала возникает необходимость разработки технических и организационных мероприятий, обеспечивающих снижение вероятности выхода из строя электрооборудования, взрывов, пожаров и других негативных явлений, которые могут наносить существенный социальный и материальный ущерб предприятию, коллективу и обществу. Поэтому гальванически связанные системы переменного и постоянного тока должны быть в широком смысле слова – электробезопасны.

Вопросы электробезопасности рассматриваются в органической взаимосвязи с аспектами экономичности и надежности гальванически связанных систем.

Известно, что условия обеспечения электробезопасности при прикосновении к корпусу и токоведущим частям сети с изолированной нейтралью находятся в тесной взаимосвязи между собой. Исходным критерием является допустимый ток или напряжение прикосновения.

Действительно, заземление должно обеспечивать защиту персонала при прикосновении к корпусу оборудования, случайно оказавшегося под напряжением, при условии отсутствия или неработоспособности реле

утечки. Защитное отключение (ЗО) должно обеспечивать безопасность при прикосновении к токоведущим частям. Вместе с тем, защитоспособность заземления и ЗО находятся в тесной взаимосвязи от сопротивления изоляции фаз относительно земли  $Z$ , поэтому величина  $Z$ , ограничивающая ток однофазного замыкания на землю, должна удовлетворять одновременно условиям эффективного действия ЗО и заземления. Следовательно, сопротивление изоляции сети по отношению к земле является определяющим фактором обеспечения электробезопасности. Вот почему важно нормирование этой величины, которое для сети в целом в настоящее время не осуществляется. Недооценка важности нормирования сопротивления изоляции сети и заземления по критерию электробезопасности в широко распространенных коротких сетях с гальванической связью и без нее при изолированной нейтрали источника ведет либо к неоправданным расходам средств на устройство заземления, либо в условиях высокоомных грунтов – на недостаточно обоснованные разрешения на отключение от требований Правил безопасности или же их прямое нарушение.

Анализ электробезопасности трехфазных сетей с изолированной нейтралью и гальванически связанных сетей переменного и постоянного тока показывает, что гальванически связанные сети представляют большую опасность при прикосновении к токоведущей части постоянного тока по сравнению с сетью только переменного или только постоянного тока. Опасность особенно возрастает при установке выпрямителя удаленного от питающего трансформатора, что имеет место в преобладающем большинстве случаев практики эксплуатации гальванически связанных сетей. Поэтому при эксплуатации гальванически связанных сетей жесткость требований безопасности должна быть увеличена.

При питании нагрузки постоянным током через выпрямитель от трансформатора встречаются три варианта схем электропитания [11]:

- встройка выпрямителей в трансформаторную подстанцию или расположение их в непосредственной близости к трансформатору, когда кабельная сеть переменного тока практически отсутствует;
- установка выпрямителей на машине или в непосредственной близости от токоприемника;

– промежуточное расположение выпрямителей между трансформаторной подстанцией и токоприемником.

Для определения минимально необходимого сопротивления изоляции  $Z_{из}$  сети, максимально допустимого сопротивления заземления  $R_3$ , предельной емкости сети  $C_{пр}$ , которые связаны с величинами тока утечки  $I_y$  и сопротивления утечки  $Z_y$ , проанализированы следующие выражения:

для схемы "а" (см. рис. 35)

$$Z_{из} = \frac{2,04U_{\phi}}{I_y} - 2Z_y; \quad (53)$$

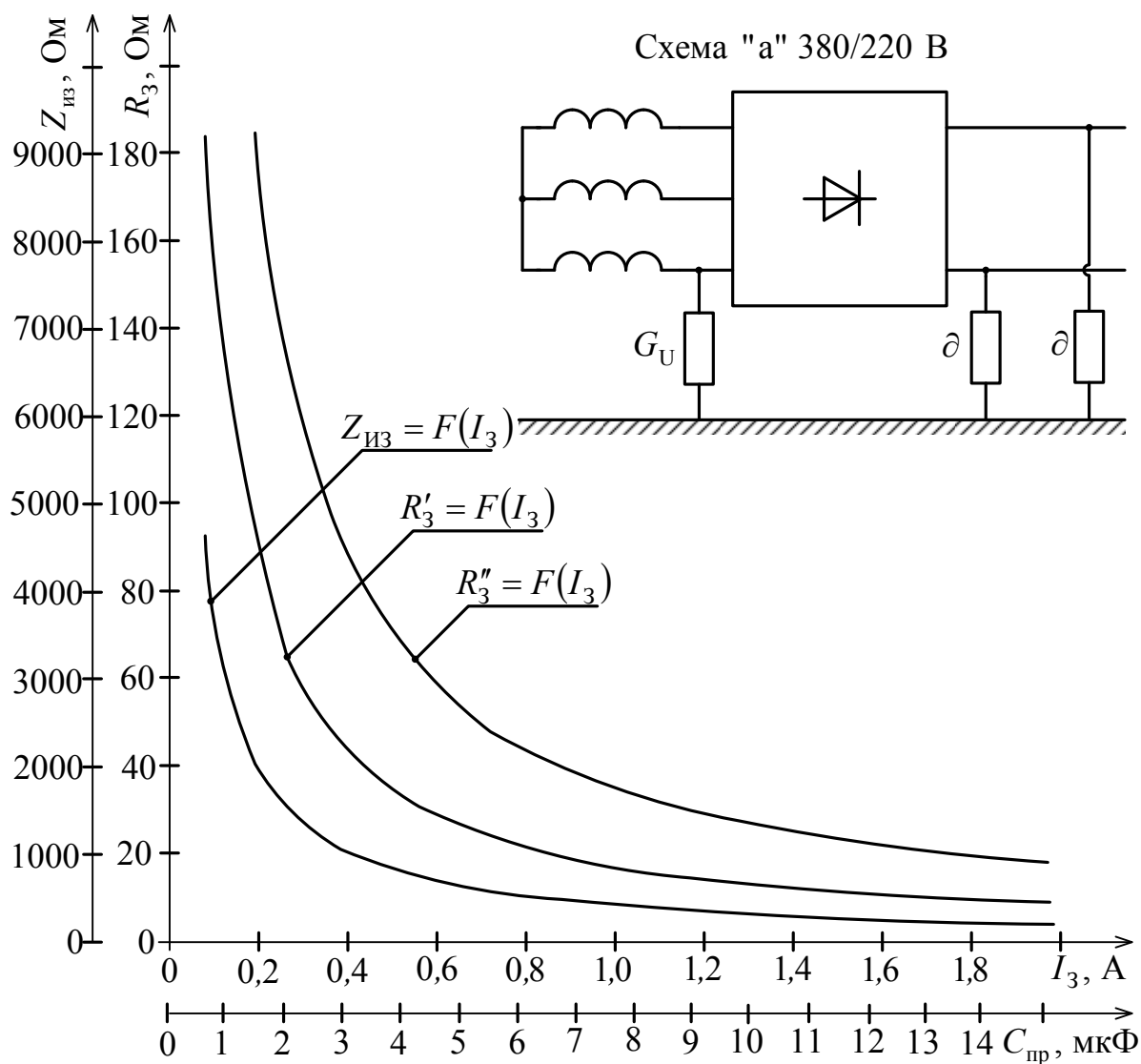


Рис. 35. Схема "а"

для схемы "б" (см. рис. 36)

$$Z_{из} = \frac{2,34U_{\phi}}{I_y} - 2Z_y; \quad (54)$$

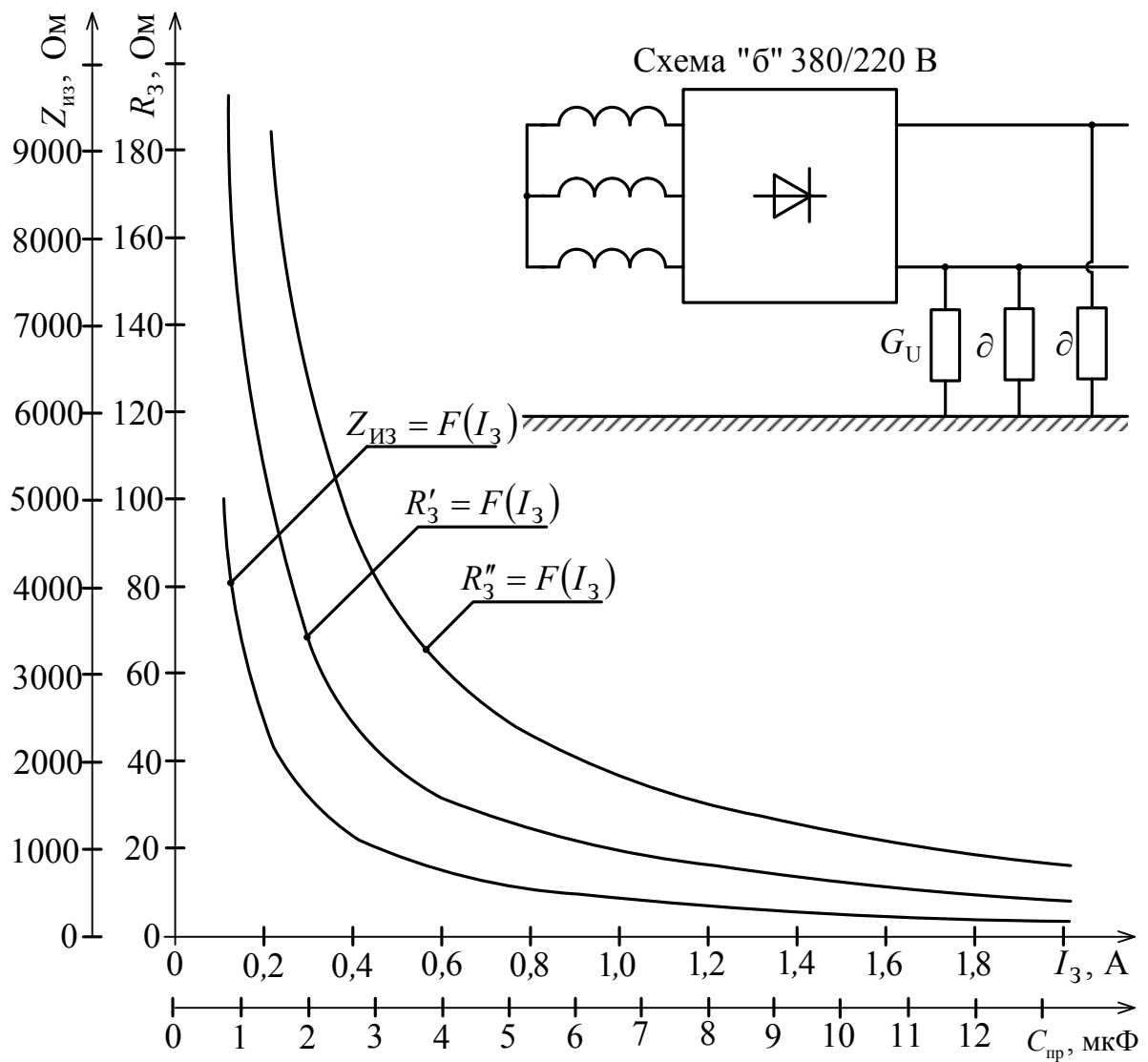


Рис. 36. Схема "б"

для схемы "в" (см. рис. 37)

$$Z_{из} = \frac{3U_{\phi}}{I_y} - 2Z_y; \quad (55)$$

для схемы "г" (см. рис. 38)

$$Z_{из} = \frac{3,57U_{\phi}}{I_y} - 2Z_y. \quad (56)$$

На схемах "а", "б", "в", "г" (см. соответственно рис. 35, 36, 37, 38):  
 $g$  – проводимость изоляции фазы переменного тока и полюса постоянного

тока приняты равными нулю;  $g_y$  – проводимость утечки.

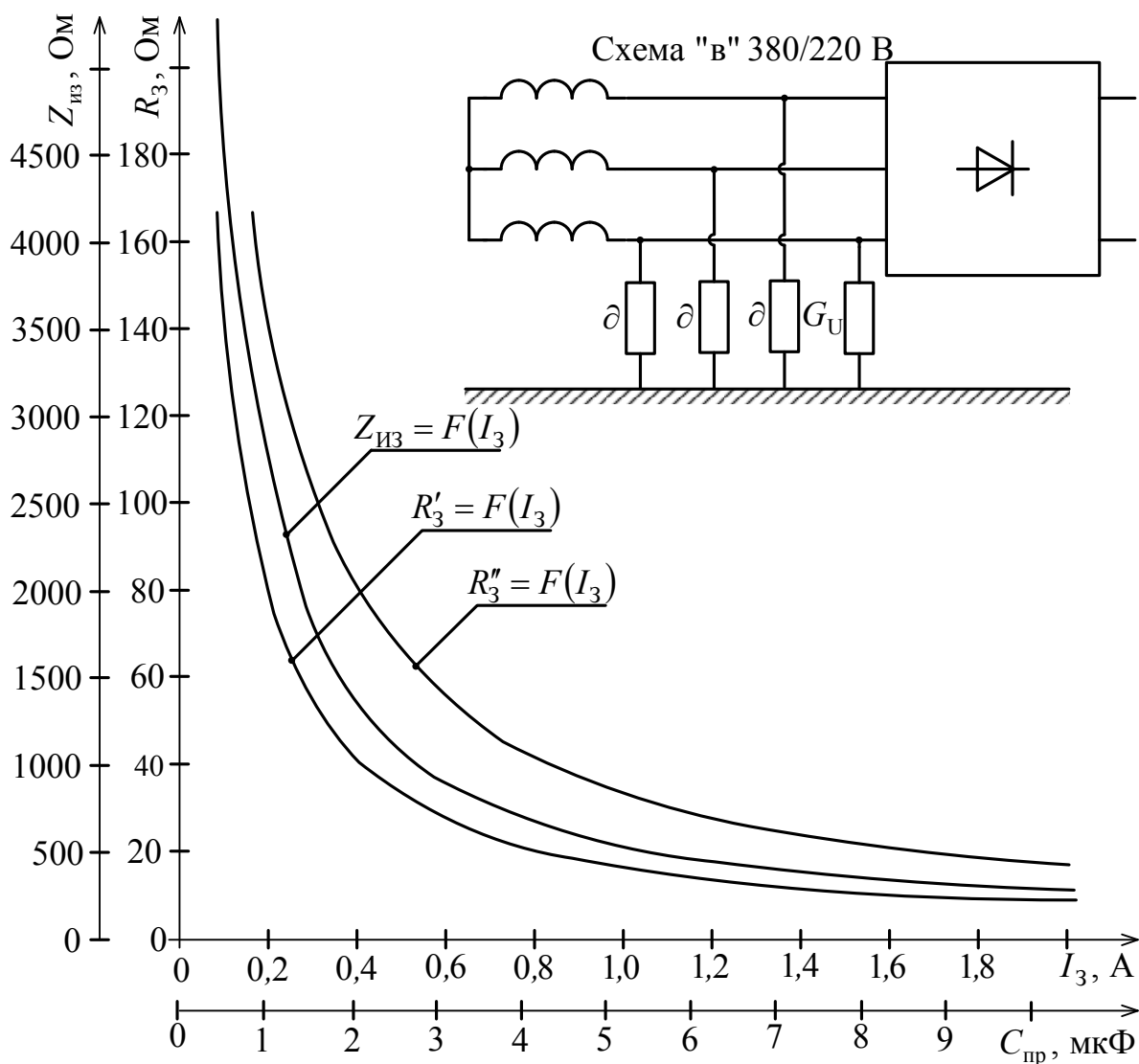


Рис. 37. Схема "в"

Оценить минимально необходимое сопротивление изоляции фазы всей сети  $Z_{из}$  включая сопротивление систем постоянного и переменного тока, в комплексной форме можно:

– из условия безопасности прикосновения к токоведущей части постоянного тока, что наиболее опасно в схеме "г" (см. рис. 38) (установлено, что допустимый ток, имеющий постоянную и переменную составляющие при прикосновении к одному из полюсов системы постоянного тока в 1,3 раза ниже допустимого переменного тока частотой 50 Гц), заменив (56) сопротивление утечки сопротивлением тела человека  $R_h$ , а ток утечки допусти-



мым током для человека  $I_{\text{h доп}}$ , получим:

$$Z_{\text{из}} = R_{\text{из}} - jX'_{\text{эКВ}} = \frac{3,57U_{\Phi}}{I_{\text{h доп}}} - 2R_{\text{h}}, \quad (57)$$

где  $R_{\text{эКВ}}$  и  $X_{\text{эКВ}}$  – эквивалентные активное и реактивное (емкостное) сопротивления изоляции фаз гальванически связанной сети относительно земли;  $j$  – поворотный множитель;

– из условия безопасности прикосновения к корпусу оборудования при пробое изоляции и отсутствии или неработоспособности реле утечки, заменив в (57) ток утечки током однополюсного замыкания на корпус  $I_3$ , а  $R_y$  – сопротивлением  $R_3$ , ограничивающим ток через человека до допустимой величины (при длительности воздействия 1 – 3 с допустимый для человека ток равен  $6/1,3 = 4,6$  мА), запишем:

$$Z_{\text{из}} = R_{\text{эКВ}} - jX_{\text{эКВ}} = \frac{3,57U_{\Phi}}{I_3} - 2R_y. \quad (58)$$

Переход от  $R_{\text{эКВ}}$  и  $X_{\text{эКВ}}$  в выражениях (57) и (58) к фактическим значениям сопротивления изоляции  $R_{\text{из}}$  и  $X_{\text{из}}$ , соединенным в реальных условиях параллельно, произведем методом проводимостей фаз в следующем порядке:

$$\begin{aligned} G &= \frac{R_{\text{эКВ}}}{Z^2}; \\ Y &= \frac{1}{Z^2}; \\ B &= \sqrt{Y^2 - G^2}; \\ R_{\text{из}} &= \frac{1}{G}; \\ X_{\text{из}} &= \frac{1}{B}. \end{aligned}$$

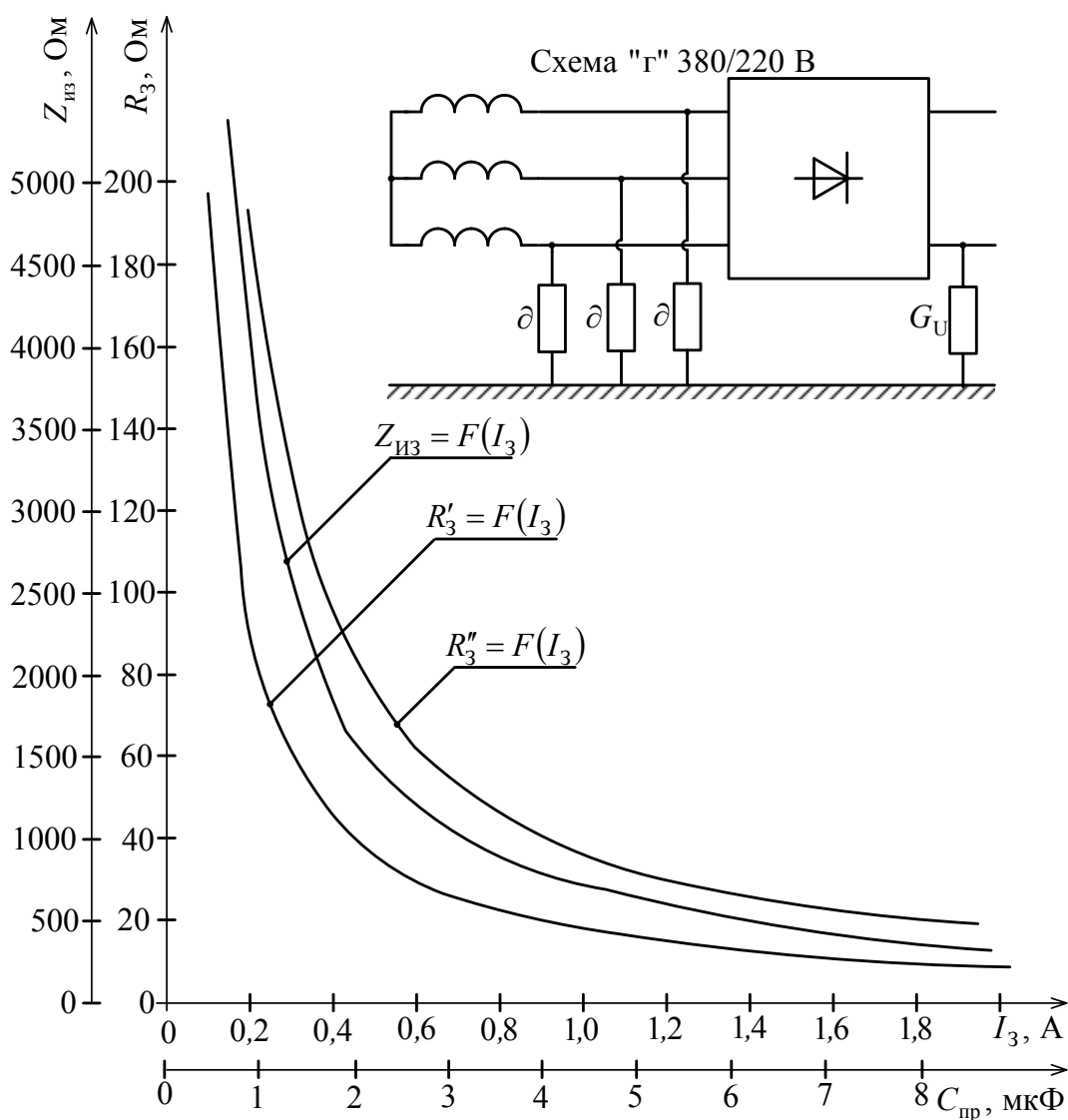


Рис. 38. Схема "Г"

Емкость фазы относительно земли равна

$$C = \frac{1}{\omega X_{из}},$$

где  $\omega$  – угловая частота.

Минимально необходимое (критическое) сопротивление изоляции чети  $R_k$  из условия (57) и (58) при полностью скомпенсированной емкости равно модулю  $Z$ . Предельное значение емкости  $C_{пр}$  определится, если  $C \geq C_{пр}$ , то при любом значении  $R_{из}$ , безопасность прикосновения не обеспечивается

$$C_{np} = \frac{1}{wZ}.$$

Рассчитанные по предлагаемой методике параметры изоляции обеспечивают предельный уровень безопасности, при нормировании должны быть увеличены на 20 – 25 % с учетом несимметрии изоляции фаз сети, достигающей в реальных условиях эксплуатации 18 – 20 %.

Предлагается нормирование сопротивления изоляции сети и заземления электроустановок осуществлять от исходных (базовых) параметров – допустимого тока для человека и реального значения тока однополюсного замыкания на землю.

Принимая значения допустимого напряжения для человека  $U_{\text{hдоп}} = 36 \text{ В}$  и тока  $I_{\text{hдоп}} = 6 \text{ мА}$  при частоте тока 50 Гц и длительности воздействия более 1 с и, задаваясь произвольно значениями тока  $I_{\text{озн}}$ , получим соответствующие максимально допустимые значения сопротивления заземления  $R_3$ , минимально необходимое сопротивление изоляции сети  $Z_{\text{из}}$  и предельное значение емкости  $C_{\text{пр}}$ .

Результаты расчета для схем "а", "б", "в", "г" представлены в табл. 12 13, 14, 15 и на рис. 35, 36, 37, 38, где  $R_3^I$  – минимально необходимое сопротивление заземления при  $U_{\text{hдоп}} = 18 \text{ В}$ ;  $R_3^{II}$  – минимально необходимое сопротивление заземления при  $U_{\text{hдоп}} = 36 \text{ В}$ . Сеть напряжением 380/220 В.

Таблица 12

Расчетные значения параметров для схемы "а"

$I_3, \text{ А}$	2	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,15	0,1
$C_{\text{пр}}, \text{ мкФ}$	9	12	18	22,5	30	36	60	90	120	180
$R_3^{II}, \text{ Ом}$	18	24	36	45	60	72	120	180	240	360
$Z_{\text{из}}, \text{ Ом}$	206	275	413	516	688	826	1376	2064	2752	4128
$C_{\text{пр}}, \text{ мкФ}$	15,5	11,6	7,7	6,2	4,63	3,86	2,31	1,54	1,15	0,77

Анализ гальванически связанных сетей свидетельствует о том, что наиболее благоприятные условия эксплуатации имеют место при электро-снабжении с установкой выпрямительного устройства в непосредственной

близости к питающей подстанции, т.е. целесообразно максимальное сокращение протяженности кабельной сети переменного тока до выпрямителей. Исследователями рекомендуется [11] длина кабельной сети переменного тока не должна превышать 10 м.

Таблица 13

Расчетные значения параметров для схемы "б"

$I_3, A$	2	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,15	0,10
$C_{пр}, мкФ$	9	12	18	22,5	30	36	60	90	120	180
$R_3^II, Ом$	18	24	36	45	60	72	120	180	240	360
$Z_{из}, Ом$	239	319	478	598	798	958	1596	2394	3192	4788
$C_{пр}, мкФ$	13,3	9,98	6,65	5,32	3,99	3,33	1,99	1,33	0,99	0,66

Таблица 14

Расчетные значения параметров для схемы "в"

$I_3, A$	2	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,15	0,10
$C_{пр}, мкФ$	9	12	18	22,5	30	36	60	90	120	180
$R_3^II, Ом$	18	24	36	45	60	72	120	180	240	360
$Z_{из}, Ом$	303	404	506	758	1010	1212	2020	3030	4040	6060
$C_{пр}, мкФ$	10,5	7,88	6,29	4,2	3,15	2,63	1,58	1,05	0,78	0,52

Таблица 15

Расчетные значения параметров для схемы "г"

$I_3, A$	2	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,15	0,10
$C_{пр}, мкФ$	9	12	18	22,5	30	36	60	90	120	180
$R_3^II, Ом$	18	24	36	45	60	72	120	180	240	360
$Z_{из}, Ом$	358	483	725	906	1208	1450	2416	3624	4832	7248
$C_{пр}, мкФ$	8,84	6,59	4,39	3,51	2,64	2,19	1,32	0,88	0,65	0,44

## 8. 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 1140 В, т.е. напряжения второй ступени в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем напряжение, первой ступени:  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ . Линейное напряжение  $U_{\text{л}}$  получается между двумя линейными проводами, а фазное напряжение  $U_{\text{ф}}$  – между линейным и нулевым проводами (см. рис. 39). 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 является 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 ПУЭ в сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 220 – 1140 В. Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора (точка "0" на рис. 39) или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (трансформаторы тока, реакторы и т.п.)

*Занулением в электроустановках до 1140 В в сетях трехфазного тока называется* преднамеренное соединение частей электроустановок с нулевым многократно заземленным проводом (с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора).

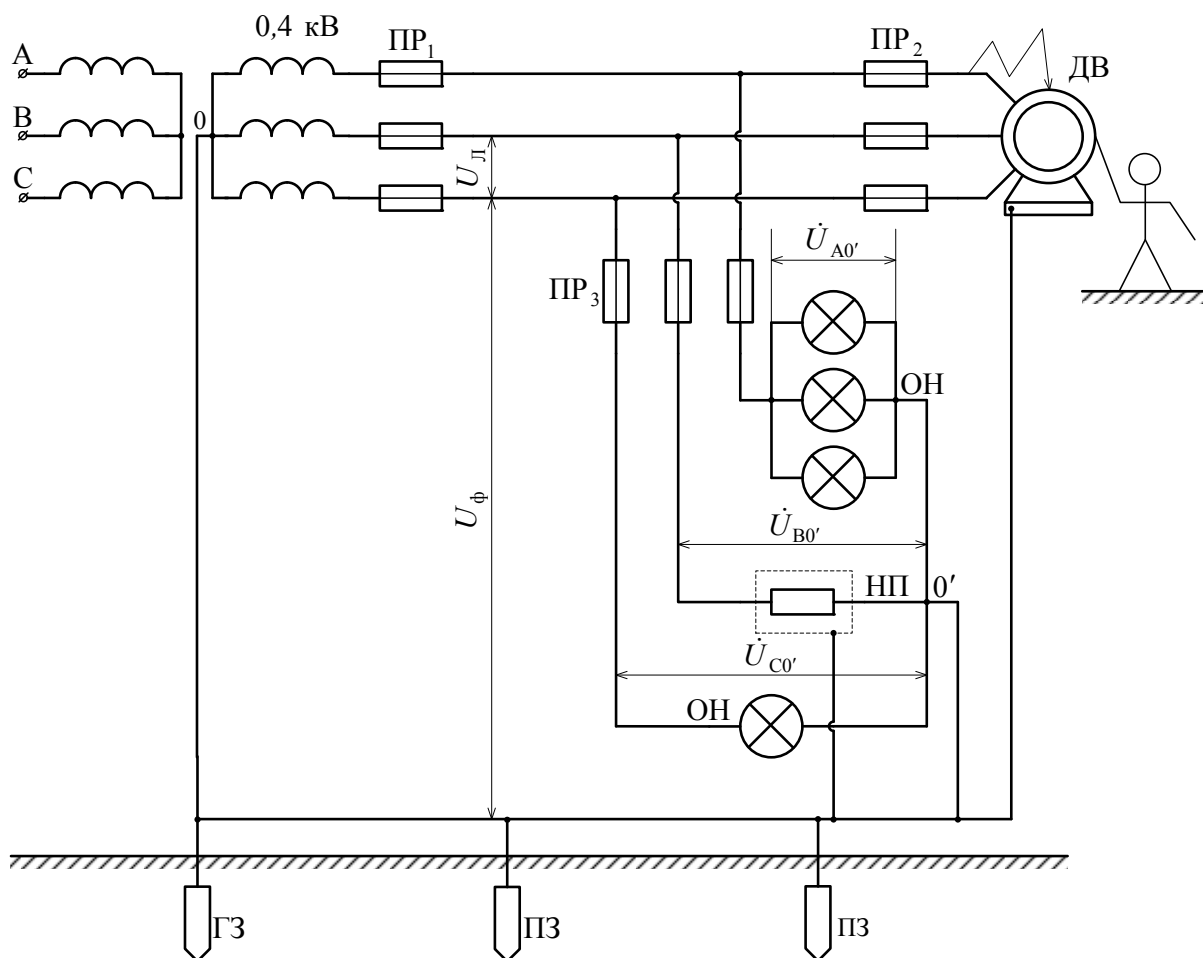


Рис. 39. Сеть с глухозаземленной нейтралью. Зануление. ПР<sub>1</sub>, ПР<sub>2</sub>, ПР<sub>3</sub> – группа предохранителей; ДВ – двигатель; ОН – осветительная нагрузка; НП – нагревательный прибор; ГЗ – главный заземлитель; ПЗ – повторный заземлитель

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 электрифицированных машин, нормально не находящихся под напряжением. Если произойдет однополюсное короткое замыкание одной фазы на корпус электроустановки (на рис. 39 – замыкание на корпус электродвигателя), 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. Зануление предназначено 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). На [рис. 39](#) цепь короткого замыкания создана: линейный провод – корпус электромашины – нулевой провод (земля) – обмотка трансформатора (генератора). 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 (на [рис. 39](#) – предохранителей).

Расцепители тепловых реле в автоматических выключателях или пускателях, в силу их инерционности (время срабатывания 60 – 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 разрушениями 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 (перегорания плавких вставок, отключения выключателей, срабатывание максимально-токовых реле).

Для обеспечения надежности перегорания плавкой вставки предохранителя согласно [ПУЭ](#) 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:

$$\frac{I_{кз}^{(1)}}{I_{ном. пл.вст}} \geq 3. \quad (59)$$

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.

$$\frac{I_{\text{кз}}^{(1)}}{I_y} \geq 1,5. \quad (60)$$

При проверке величины кратности  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  по отношению к току плавкой вставки или уставке автомата или реле рекомендуется руководствоваться ПУЭ.

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 однофазных к.з. защита не срабатывает и не отключает аварийный участок сети, что особенно опасно (пожар, разрушение электроустановки, возгорание проводки и т.п.). Примерное соотношение токов при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлено на рис. 40.

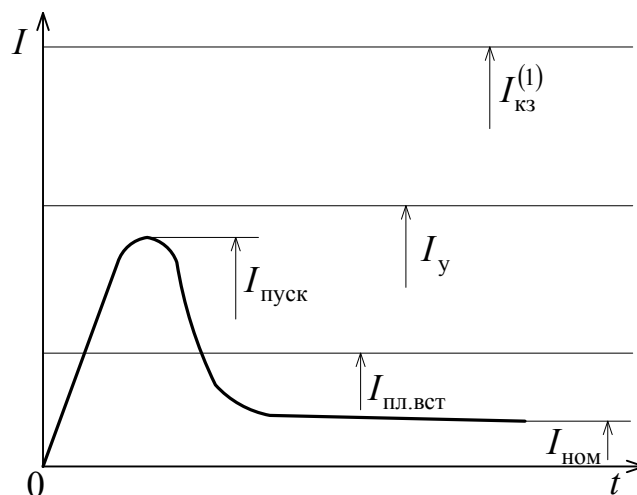


Рис. 40. Соотношение токов

Для проверки работоспособности МТЗ необходимо определить величину  $I_{\text{кз}}^{(1)}$ , для чего требуется знать сопротивление петли “фаза-нуль”  $Z_{\text{ф.о.}}$ . Это сопротивление обычно определяют прибором М-417, МЗС-200,



методом амперметра-вольтметра или расчетом.

Метод амперметра-вольтметра (см. рис. 41) 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, накладывает перемычки, имитирующие короткие замыкания. Однако, такие измерения не часты, а точность их велика (можно использовать приборы высокого класса точности), применение рассматриваемого метода вполне оправдано.

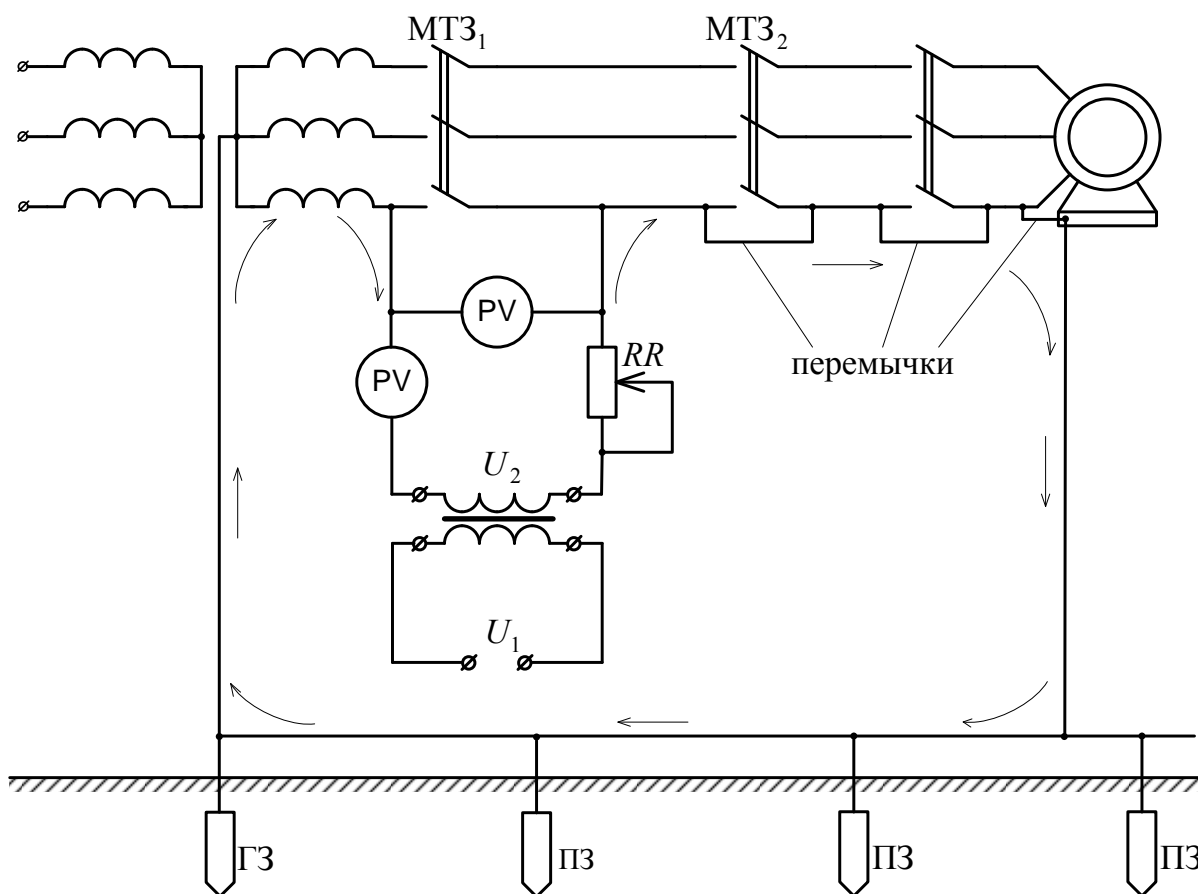


Рис. 41. Схема измерения сопротивления петли “фаза-нуль”

Величина  $U_1$  может быть принята равной 220 В, ток и напряжение по петле регулируется реостатом  $RR$ , значение напряжения  $U_2$  не должно превышать 36 В. По показаниям вольтметра  $U_x$  и амперметра  $I_x$  определяют сопротивление  $Z_{\phi.0}$  петли “фаза-нуль”:

$$Z_{\phi.0.} = \frac{U_x}{I_x}.$$

Расчетным путем  $Z_{\phi.0.}$  определяется

$$Z_{\phi.0.} = Z_n + \frac{Z_{тр}}{3},$$

где  $Z_n$  – суммарное сопротивление фазного  $Z_\phi$  и нулевого провода  $Z_0$

$$Z_n = Z_\phi + Z_0 = LR_\phi + jLX_\phi + LR_0 + jLX_0,$$

где  $L$  – длина линии от трансформатора до точки однофазного к.з.;  $R_\phi$ ,  $X_\phi$  – активное и реактивное сопротивление единицы длины фазного провода;  $R_0$ ,  $X_0$  – активное и реактивное сопротивление единицы длины нулевого провода;  $Z_{тр}$  – сопротивление трансформатора, питающего сеть, принимается по справочной литературе или определяется по выражению

$$Z_{тр} = \frac{U_{кз} U_n}{100\sqrt{3} I_n},$$

где  $U_{кз}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;  $U_n$ ,  $I_n$  – номинальные линейные напряжения и ток трансформатора, (В), (А).

При известном  $Z_{\phi 0}$  ток однофазного к.з. определится:

$$I_{кз}^{(1)} = \frac{U_\phi}{Z_{\phi 0}}.$$

Пример эксплуатационного расчета и выбора плавких вставок предохранителей и уставок максимального расцепителя автоматического выключателя.

Пусть асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет мощность  $P_n = 40$  кВт,  $U_n = 380$  В,  $I_{ном} = 80$  А,  $I_{пуск} / I_{ном} = 5$ .

Если двигатель защищается предохранителями, то ток плавкой вставки будет найден:

$$I_{пл.вставки} = \frac{I_{пуск}}{2,5} = \frac{5I_{ном}}{2,5} = \frac{5 \cdot 80}{2,5} = 160 \text{ А}.$$

Тогда ток

$$I_{кз}^{(1)} \geq 3I_{пл.вставки} = 3 \cdot 160 = 480 \text{ А},$$

а сопротивление петли “фаза-нуль” должно быть не более

$$Z_{\phi.0} \leq \frac{U_{\phi}}{I_{\text{кз}}^{(1)}} \leq \frac{220}{480} \leq 0,46 \text{ Ом}.$$

При защите электродвигателя автоматическими выключателями ток вставки определится по формуле:

$$I_y = (1,1 \div 1,3) I_{\text{пуск}} = 1,1 \cdot 5 I_{\text{ном}} = 1,1 \cdot 5 \cdot 80 = 440 \text{ А}.$$

Тогда ток  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  должен быть не менее

$$I_{\text{кз}}^{(1)} \geq 1,5 I_y \geq 1,5 \cdot 440 \geq 660 \text{ А},$$

а сопротивление петли “фаза-нуль” должно быть не более

$$Z_{\phi.0} \leq \frac{U_{\phi}}{I_{\text{кз}}^{(1)}} \leq \frac{220}{660} \leq 0,33 \text{ Ом}.$$

Очевидно, что защите двигателя с помощью предохранителей отдаётся предпочтение, так как при использовании автомата требуется значительно больший ток однофазного к.з., а сопротивление петли “фаза-нуль” – значительно меньше, чем при защите предохранителями. Если допустить, что сопротивление фазного и нулевого проводов равны, то сопротивление нулевого провода при защите автоматом должно быть

$$\frac{0,33}{2} = 0,165 \text{ Ом}.$$

Таких величин сопротивления в практике эксплуатации достичь не просто.

*3. Зануление предназначено 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 (см. рис. 39). В том и других случаях потребители работают ненормально и могут выйти из строя.

Термины “неравномерная нагрузка по фазам” и “несимметричная нагрузка” несколько отличаются друг от друга. Равномерная нагрузка это такая нагрузка, при которой модули проводимостей (или сопротивлений) фаз нагрузки равны, т.е.  $Y_A = Y_B = Y_C$  (или  $Z_A = Z_B = Z_C$ ). Симметричная

нагрузка – это такая нагрузка, при которой комплексы проводимостей (или сопротивлений) фаз нагрузки равным между собой, т.е.  $Y_A = Y_B = Y_C$  (или  $Z_A = Z_B = Z_C$ ). 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 понятий. При несимметричной нагрузке, хотя и равномерной, существенное различаются потери мощности по фазам, имеет место неравномерный нагрев обмоток нагрузки и т.д. Более правильным и объемным термином является “несимметричная нагрузка” по сравнению с термином “неравномерная нагрузка”.

На рис. 42 представлена векторная диаграмма фазных ЭДС трансформатора (генератора)  $\bar{E}_A, \bar{E}_B, \bar{E}_C$  и фазных напряжений  $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$  при несимметричной нагрузке,  $\bar{U}_0$  – напряжение смещения нейтрали.

В треугольнике  $ОАО'$  (см. рис. 42)  $ОА = ОО' + О'А$ , т.е.  $\bar{E}_A = \bar{U}_0 + \bar{U}_A$  или в комплексной форме  $\dot{E}_A = \dot{U}_0 + \dot{U}_A$ , откуда

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_0. \quad (61)$$

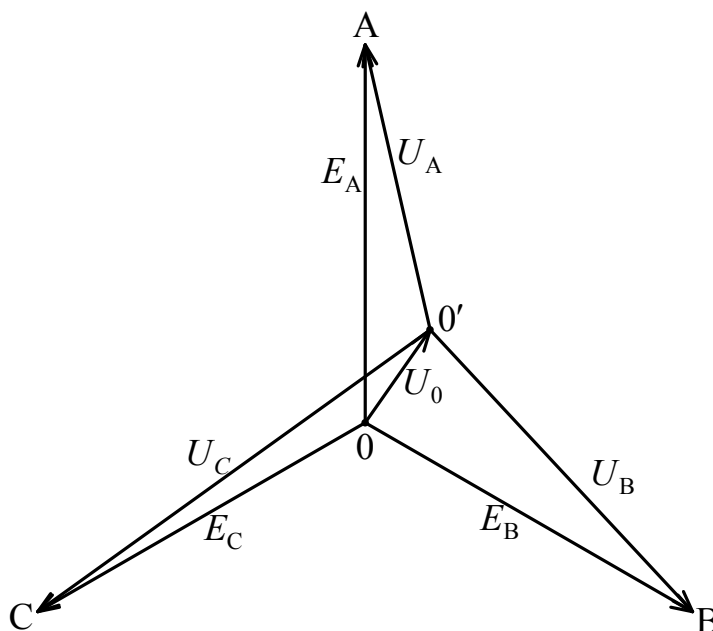


Рис. 42. Векторная диаграмма фазных ЭДС трансформатора и напряжений при несимметричной нагрузке

Аналогично

$$\dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_0, \quad (62)$$

$$\dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_0. \quad (63)$$

Для нормальной работы нагрузки необходимо, чтобы фазные напряжения на ее сопротивлениях были равны, т.е.  $\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C$ , а это возможно при  $\dot{U}_0 = 0$  согласно (61) – (63).

Напряжение смещения нейтрали определяется методом узловых потенциалов ( $U_0$  – это напряжение между нейтральными точками трансформатора 0 и нагрузки 0', см. рис. 39 и 42):

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}, \quad (64)$$

где  $Y_0$  – проводимость нулевого провода.

Очевидно, что напряжение смещения нейтрали будет равно нулю, если  $Y_A = Y_B = Y_C = Y$ :

$$\dot{U}_0 = \frac{(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C)Y}{3Y + Y_0} = 0.$$

Так как сумма ЭДС в числителе равна нулю, следовательно, фазные напряжения на нагрузке равны между собой, т.е.  $U_A = U_B = U_C$ .

Напряжение на фазах нагрузки можно выровнять также уменьшением сопротивления нулевого провода. Если  $Z_0 \rightarrow 0$ , то  $Y_0 = 1/Z_0 \rightarrow \infty$ , тогда по (64)  $U_0$  стремиться к нулю, т.е. напряжение 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 рабо-

чим проводником в электроустановках до 1140 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 1140 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 и корпусу электроустановки

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, не 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 (см. рис. 39), ток через тело человека определяется:

$$I_h = \frac{U_{\Phi}}{R_h},$$

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 1140 В позволит значительно повысить уровень электробезопасности в электроустановках, однако ПУЭ регламентирует 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.

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

где  $Z_0$  – сопротивление цепи нулевого провода (собственно нулевого провода и земли, проводимость которой параллельно проводимости

нулевого провода) от электроустановки до питающего трансформатора или генератора.

Фазное напряжение источника  $U_{\Phi}$  распределяется на сопротивлении  $Z_{\Phi}$  фазного проводника до корпуса электроустановки (см. рис. 39) и на сопротивлении цепи нулевого проводника  $Z_0$ , т.е. можно записать

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

Отсюда

$$Z_0 = \frac{U_{\Phi}}{I_{\text{кз}}^{(1)}} - Z_{\Phi}.$$

Падение напряжения на фазном проводе

$$U_{\Phi} - 36 = I_{\text{кз}}^{(1)} Z_{\Phi}.$$

Падение напряжения в нулевом проводе

$$36 = I_{\text{кз}}^{(1)} Z_0.$$

Поделив эти последние равенства друг на друга найдем:

$$Z_{\Phi} \geq \frac{(U_{\Phi} - 36)Z_0}{36}. \quad (65)$$

При напряжении сети 380/220 В

$$Z_{\Phi} \geq \frac{(220 - 36)Z_0}{36} \geq 5,1Z_0.$$

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/ 127 В – в 2,6 раза, а в сети 660/380 В – в 9,6 раза меньше.

Обеспечить такие уровни проводимости нулевого провода в практике эксплуатации удастся 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 аварийной ситуации приведены в табл. 16.

Таблица 16

Допустимые величины токов и напряжений

$t_e, \text{с}$	$U_{\text{доп}}, \text{В}$	$I_{\text{н доп}}, \text{мА}$	$t_e, \text{с}$	$U_{\text{доп}}, \text{В}$	$I_{\text{н доп}}, \text{мА}$
0,1	500	500	0,7	70	70
0,2	250	250	0,8	65	65
0,3	165	165	0,9	55	55
0,4	125	125	1,0	50	50
0,5	100	100	более 1,0	36	6
0,6	85	85			

В табл. 16  $t_e$  – время воздействия.

## 8.1. СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1140 В

Разработанные в 70-х годах прошлого века Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) рекомендации по классификации заземляющих устройств закреплены в нашей стране с середины 90-х годов государственным стандартом ГОСТ Р50571.2.94 (МЭК 364-3-93). Новые требования включены в 1, 6 и 7 главы ПУЭ 7-го издания. Для перечисленных в ПУЭ [1] электроустановок нормативно запрещено использовать систему заземляющего устройства TN-C, вместо нее регламентируются новые системы TN-C-S и TN-S, в которых нулевой рабочий и нулевой защитный проводники работают раздельно.

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 Т означает прямое соединение открыты 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 защитного и нулевого рабочего проводников. Буква С 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.

#### Типы систем заземляющих устройств

ГОСТ Р 50571.2-94 (МЭК 364-3-93) регламентирует следующие системы заземляющих устройств: TN, TT, IT.

Условные графические изображения на электрических схемах нулевых рабочих и нулевых защитных проводников приведены в табл. 17.

Таблица 17

#### Условные графические изображения защитных проводников на схемах

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

*Система TN.* Нейтраль трансформатора или другого источника питания соединена с землей в одной или нескольких точках (многократное заземление). Все доступные прикосновению открытые части (корпус) электроустановки, которые могут оказаться под напряжением, соединяются с заземлителем с помощью PEN-проводника или PE- и N-проводников.

PEN-проводник присоединяется к заземленной нейтрали вторичной обмотки трансформатора или генератора и выполняет функции нулевого

защитного проводника (РЕ-проводника) и нулевого рабочего проводника (N-проводника). PEN-проводник может иметь повторное заземление в других точка сети (магистральный заземляющий провод, см. [рис. 39](#)). Проводимость PEN-проводника, идущего от нейтрали трансформатора или генератора должна быть не менее 50 % проводимости вывода фаз.

Нулевой защитный проводник (РЕ-проводник) – это проводник, соединяющий зануляемые части (корпуса) электроприемников с заземленной нейтралью трансформатора или генератора в сетях переменного трехфазного тока или с заземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

В качестве защитных проводников (PEN-проводников и РЕ-проводников) должны быть в первую очередь использованы специально предусмотренные для этой цели проводники, в том числе жилы кабелей, изолированные провода в общей оболочке с фазными проводами, стационарно проложенные неизолированные или изолированные проводники. В качестве PEN- или РЕ- проводника между нейтралью и щитом распределительного устройства следует использовать: при выводе фаз шинами – шину на изоляторах – при выводе фаз кабелем (проводом) – жилу кабеля (провода).

Допускается использовать в качестве PEN- или РЕ-проводников (для PEN-проводника допускается, но не рекомендуется!) следующие проводники, конструкции и элементы, если они обеспечивают непрерывность цепи заземления, а PEN-проводники удовлетворяют требованиям проводимости рабочего тока:

- алюминиевые оболочки кабелей;
- металлические конструкции и опорные конструкции шинопроводов;
- стальные трубы электропроводок;
- металлические конструкции зданий или сооружений (фермы, колонны и т.п.);
- арматуру железобетонных конструкции и фундаментов зданий;
- металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, кроме трубопроводов горючих и взрывчатых веществ и смесей, канализации и центрального отопления.

В зависимости от устройства нулевого рабочего и нулевого защитного

проводников система TN подразделяется на три типа: TN-C, TN-C-S, TN-S.

*Система заземления и зануления TN-C* широко распространена в промышленных, городских и сельских электросетях как трехфазная четырехпроводная сеть с глухим заземлением нейтрали с занулением. В настоящее время система TN-C является основной в питающих и распределительных сетях низкого напряжения промышленных предприятий и является основой для системы заземления и зануления TN-C-S.

В системе TN-C функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводников выполняет один проводник по всей сети (см. рис. 43). В четырехпроводных сетях переменного трехфазного тока с занулением и в трехпроводных сетях постоянного заземления нейтрали или средней точки постоянного тока является обязательным. Части электроустановок, нормально не находящиеся под напряжением (корпус электроприемника), должны быть электрически соединены с заземленной нейтралью трансформатора или генератора в сетях переменного тока, с заземленной средней точкой источника питания в сетях постоянного тока, т.е. должны быть выполнено зануление. Заземление корпусов электроприемников без их зануления не допустимо в системе TN-C. В системе TN-C (также и в системе TN-C-S) предусматривается защита от сверхтоков (токи к.з., токи перегрузки) – максимально-токовая защита, выполняемая плавкими вставками предохранителей, максимальными расцепителями автоматических выключателей, тепловыми расцепителями и максимально-токовыми реле.

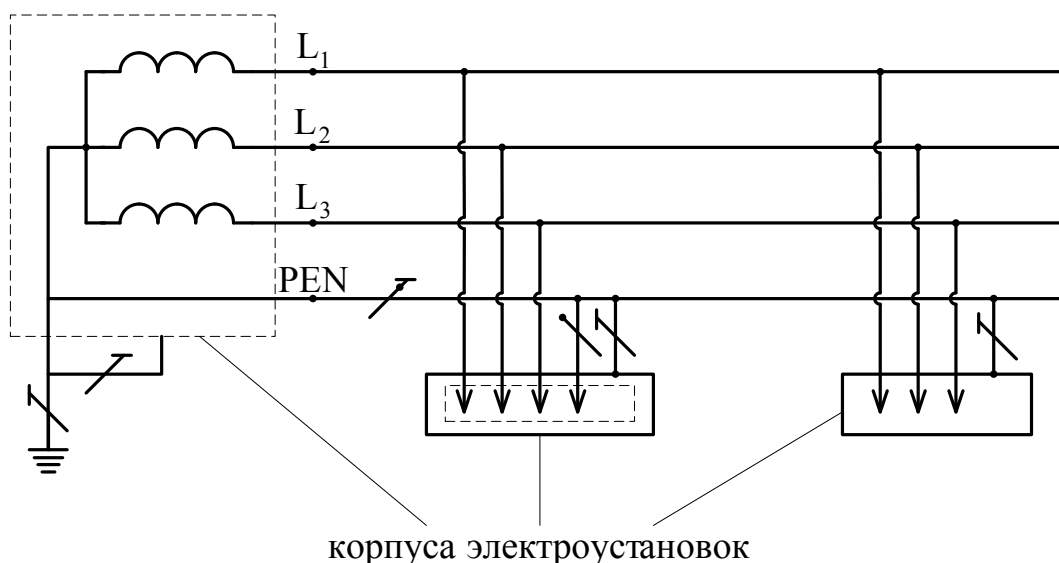


Рис. 43. Система заземления и зануления TN-C

*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 (см. рис. 44).

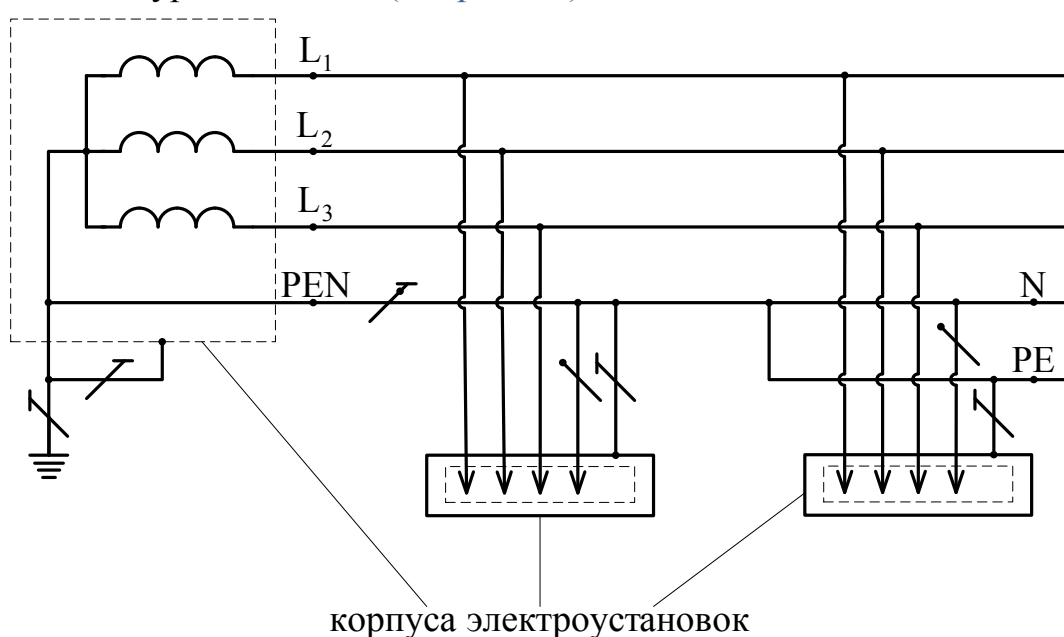


Рис. 44. Система заземления и зануления TN-C-S

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

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

Следует отметить, что система TN-C-S является наиболее перспектив-

ной 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.

Система заземления и зануления TN-S имеет N-проводник и РЕ-проводник, которые работают отдельно по всей системе. В этой системе устройства 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 (см. рис. 45), а в сетях постоянного тока – четырехпроводные сети (см. рис. 46). Это делает системы PN-S более дорогой и сложной.

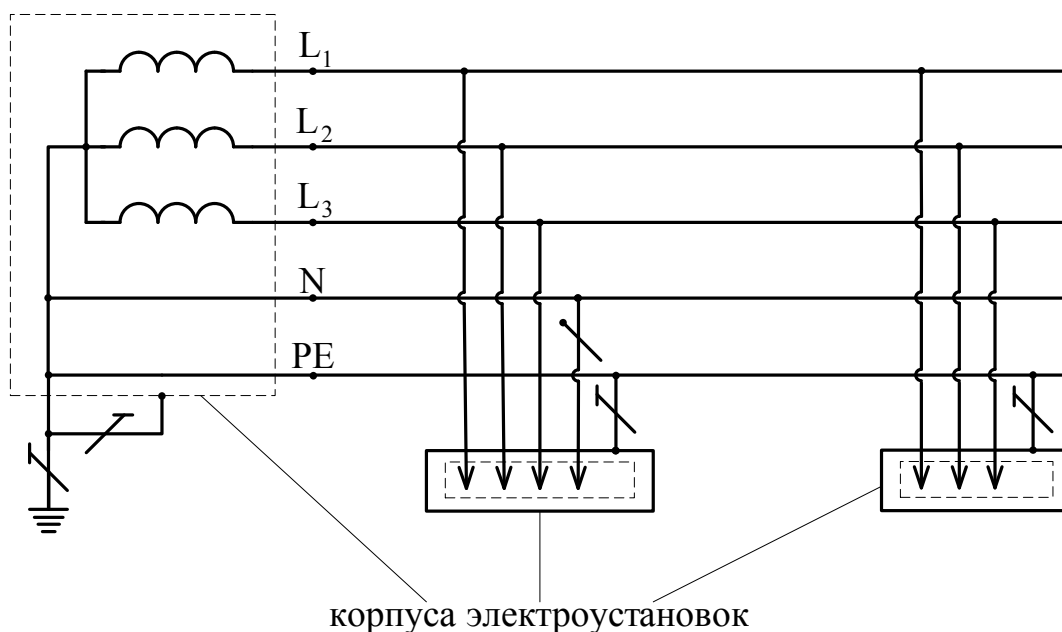


Рис. 45. Система заземления и зануления TN-S в сетях трехфазного переменного тока

Проводник N (см. рис. 45), вводимый во внутрь электроустановки, подключаемый к нейтральной точке нагрузки с целью выравнивания напряжения на фазах нагрузки и для канализации рабочего тока в нулевом проводе. РЕ-проводник подключается к корпусу нагрузки и является нулевым защитным проводником. Аналогичное подключение и функции про-

водников N и PE в системе TN-C-S (см. рис. 44).

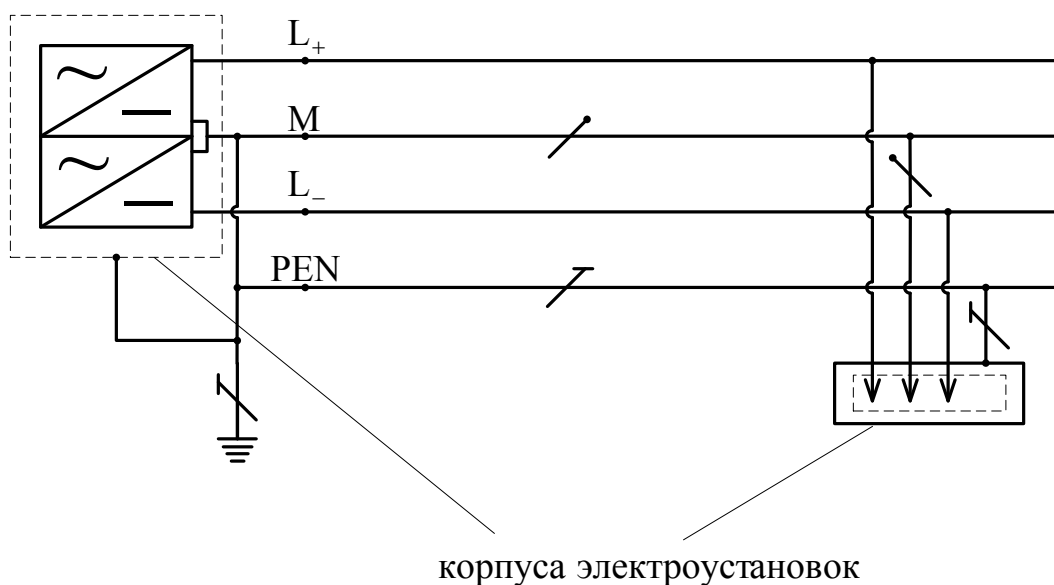


Рис. 46. Система заземления и зануления TN-S в сетях постоянного тока

*Система заземления IT* в трехфазных трехпроводных электросетях с изолированной нейтралью, а в установке постоянного тока с изолированной средней точкой. При этом в системе нейтраль трансформатора (генератора) не соединяется с заземляющим устройством или соединяется через предохранитель-разрядник или через аппарат, резистор с большим сопротивлением (см. рис. 47). Открытые токопроводящие части (корпуса) электроустановок присоединяются к заземлителю, не присоединенному к нейтрали трансформатора (генератора).

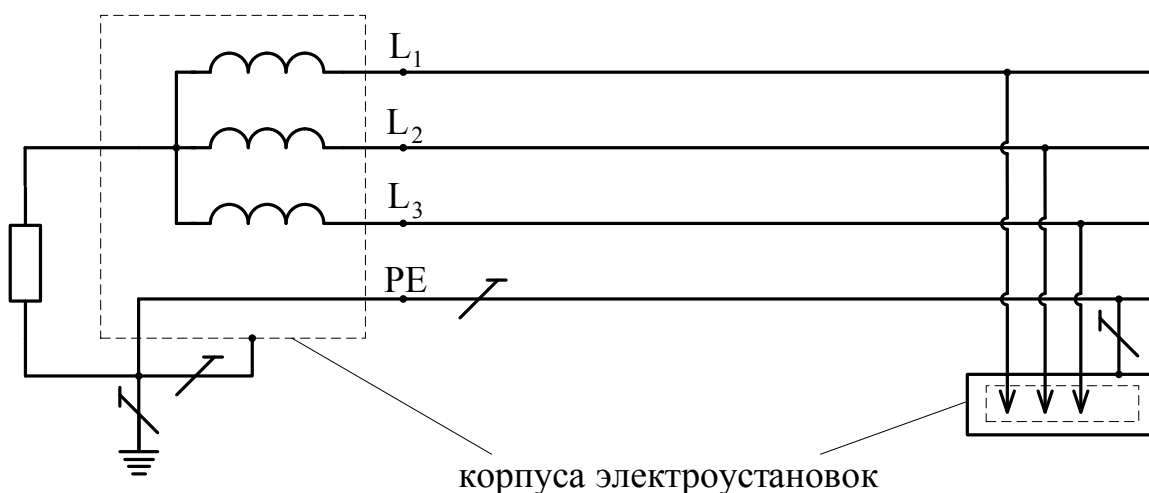


Рис. 47. Система заземления IT в трехфазных трехпроводных сетях с изолированной нейтралью

*К данной системе заземления относятся также трехфазные четы-*

*трехпроводные сети с изолированной нейтралью без зануления.* В этом случае нейтраль трансформатора (генератора) выводится четвертым проводом на изоляторах или четвертой изолированной жилой кабеля. Это нулевой рабочий проводник N, который не присоединяется к заземляющему устройству (см. рис. 48). Он служит для подключения однофазных потребителей и для выравнивания напряжения по фазам при несимметричной нагрузке. Расчет величины тока нулевого рабочего N-проводника производится по методике, изложенной выше. Нейтраль трансформатора (генератора) также может быть присоединена к заземляющему устройству через элемент с большим сопротивлением или через пробивной предохранитель-разрядник.

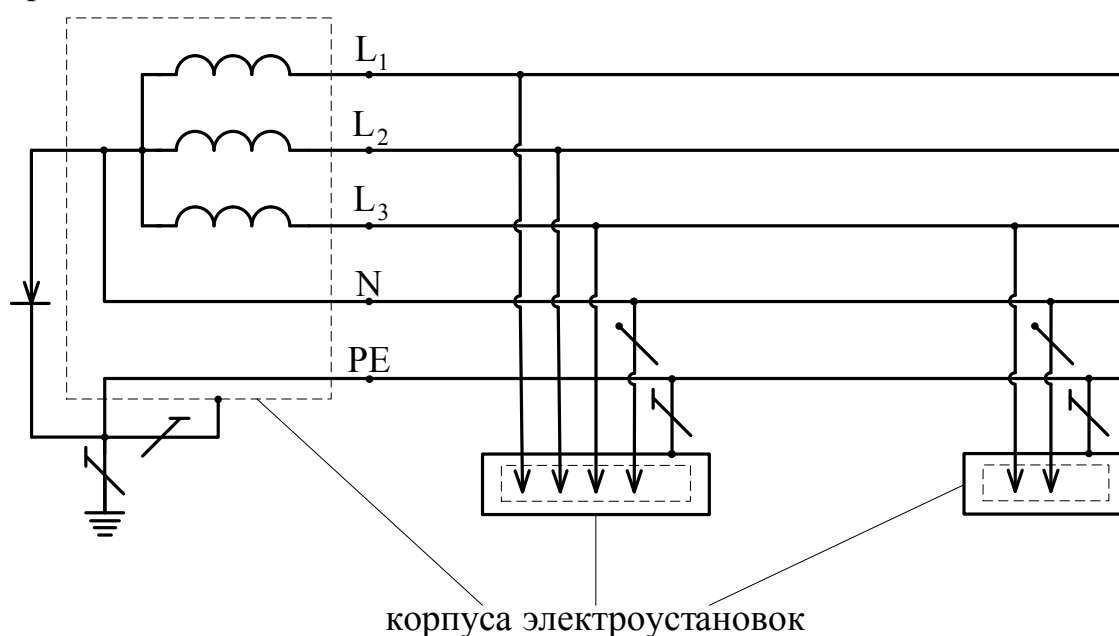


Рис. 48. Система заземления IT в трехфазных четырехпроводных сетях с изолированной нейтралью без зануления

В электросетях системы IT предусматривается защита от токов к.з., от токов перегрузки. Кроме того, в таких сетях должен предусматриваться непрерывный контроль изоляции сети по отношению к земле (по отношению к заземляющему устройству). Защита от замыканий на землю должна действовать на отключение в тех случаях, когда это необходимо для обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Расчет и измерения уставок срабатывания защиты  $R_{из}$ ,  $Z_{из}$  (минимально необходимые сопротивления изоляции), а также  $I_{озн}$  следует производить по методике, изло-

женной выше.

### Система заземления ТТ

В данной системе нейтраль трансформатора или генератора глухо заземлена, а открытые токопроводящие части корпуса оборудования присоединены к заземлителю, независимому от заземлителя нейтрали источника питания (см. рис. 49). В данной системе заземляющие устройства выполняются без связи между собой, таких устройств может быть несколько.

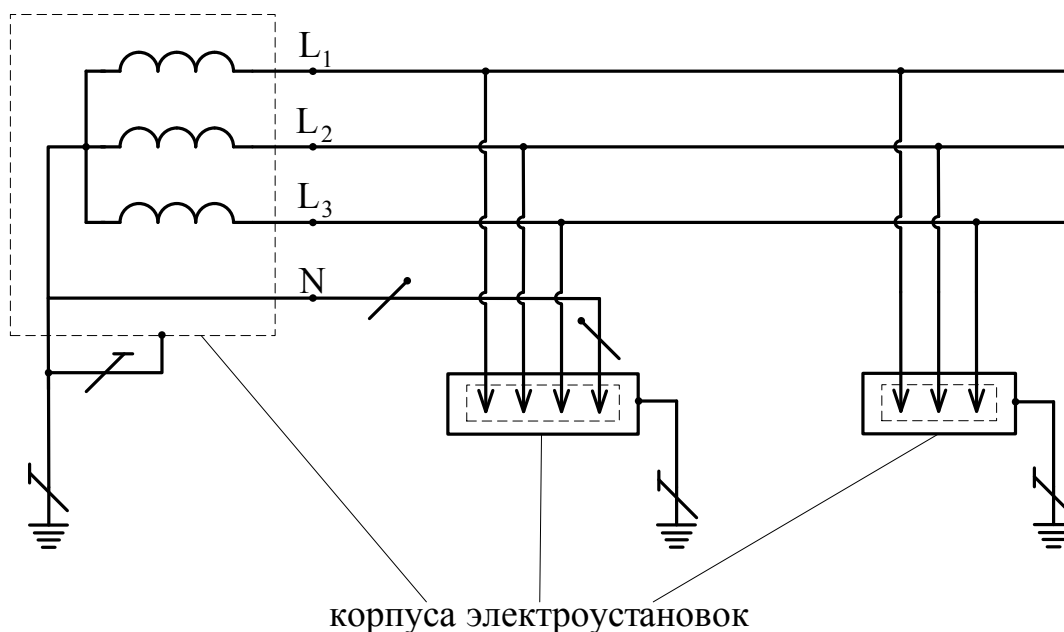


Рис. 49. Система заземления ТТ

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.

В некоторых случаях по ГОСТ Р 50669 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 (ПУЭ)



## 8.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

При рассмотрении режимов нейтрали электрических сетей отмечалось, что сети у которых нейтраль трансформатора (генератора) соединена с заземляющим устройством через большое сопротивление, относятся к сетям с изолированной нейтралью, а сети, нейтраль которых соединена с заземляющим устройством через малое сопротивление, считаются сетями с глухозаземленной нейтралью. Понятие “большое” и “малое” сопротивление не дают четкого представления о разграничении сетей по режимам нейтрали, поэтому ПУЭ введен коэффициент замыкания на землю, характеризующий эффективность заземления нейтрали. *Коэффициентом эффективности замыкания на землю* в трехфазной электрической сети называется отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз после замыкания на землю третьей фазы к разности потенциалов этими же фазами и землей в этой точке до замыкания на землю третьей фазы.

Коэффициент эффективности заземления нейтрали  $K_{эфф}$  может иметь значения от 1 до 1,73 при переходе от сети с глухозаземленной нейтралью, когда нейтраль трансформатора соединена с заземляющим устройством через сопротивление, равное нулю к сети с изолированной, когда нейтраль трансформатора вообще не соединена с заземляющим устройством. Граничным значением  $K_{эфф}$  является значение 1,4. *Электрической сетью с эффективно заземленной нейтралью называется* трехфазная сеть, в которой  $K_{эфф}$  не превышает 1,4. Коэффициент  $K_{эфф}$  показывает во сколько раз увеличивается при замыкании на землю одной из фаз напряжение двух других фаз по отношению к земле в точке замыкания на землю. Если напряжение двух других фаз увеличивается по отношению к земле при замыкании первой фазы более чем в 1,4 раза, то такая нейтраль заземлена не эффективно, а если напряжение возрастает меньше, чем в 1,4 раза, такая сеть имеет эффективно заземленную нейтраль. Режимы нейтрали – глухозаземленная и изолированная – являются двумя крайними состояниями режима нейтрали.

Если в практике эксплуатации требуется определить режим нейтрали в сети с трансформатором или генератором, тогда делают искусственное замыкание на заземляющее устройство, но такое замыкание следует выполнять через резистор, в противном случае, если окажется, что сеть с глухозаземленной нейтралью, ток может достигать больших значений, а это опасный аварийный режим. Можно использовать в сети 380/220 В резистор с сопротивлением 1 кОм, тогда ток через него будет

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{R} = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ А}.$$

Мощность резистора определяется

$$P = I_{\text{кз}}^2 R = 0,22^2 1000 = 48,4 \text{ Вт}.$$

Можно принять  $P = 50 \text{ Вт}$ .

Режим нейтрали можно определить без доступа к трансформатору (см. рис. 50)

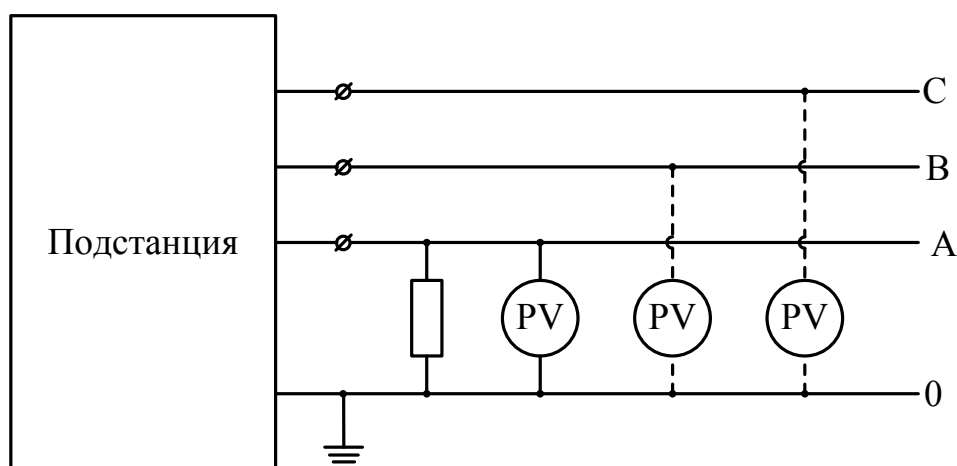


Рис. 50. Схема определения режима нейтрали сети

Сначала надо измерить напряжение всех трех фаз по отношению к земле. Если напряжения фаз не равны, следовательно, в сети есть замыкание на землю. Устраняется повреждение.

При примерном равенстве напряжений фаз сети по отношению к земле делают замыкание одной из фаз на землю через резистор  $R$  и измеряют напряжение на двух фазах, не имеющих замыкания на землю, это напряжение делят на  $U_{\phi}$  и определяют коэффициент  $K_{\text{эфф}}$ :

$$K_{\text{эфф}} = \frac{U_2}{U_{\phi}}$$

или

$$K_{\text{эфф}} = \frac{U_3}{U_{\phi}}.$$

По величине  $K_{\text{эфф}}$  определяют эффективность заземления нейтрали.

### 8.3. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С ЗАНУЛЕНИЕМ

Традиционными и основными способами защиты людей от поражения током в электросетях напряжением до 1140 В в течение многих лет были зануление электроустановок и максимально токовая защита (МТЗ), предназначенная работать на отключение при однофазном коротком замыкании на корпус электрооборудования. Как указывалось выше, целью зануления является увеличение тока  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  за счет снижения сопротивления петли “фаза-нуль”, т.е. увеличение тока  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  до величины, достаточной для срабатывания МТЗ. Кроме того, зануление должно способствовать снижению напряжения прикосновения за счет создания параллельного пути току на нейтраль источника по отношению прикоснувшемуся человека к корпусу, случайно оказавшегося под напряжением.

Однако, в ряде случаев ток однофазного к.з. (в некоторых отраслях промышленности до 55 % случаев – по данным ВНИИ Проектэлектромонтажа [13] не достигает уставки срабатывания МТЗ. Увеличение сечения фазных и нулевых проводов для снижения сопротивления петли “фаза-нуль” влечет за собой большие материальные затраты. Важным условием обеспечения электробезопасности, т.е. увеличение тока является быстрое отключение однополюсных к.з. Однако, быстродействие МТЗ возможно лишь при очень высоких кратностях тока к.з. (порядка 6-10 значений тока плавкой вставки и уставки автомата). Для удовлетворения этих условий также требуется увеличение сечения проводов.

Имеется и ряд других недостатков системы зануления с точки зрения электробезопасности персонала и технической безопасности, о чем пойдет

речь ниже.

Решение проблемы защиты людей в сетях с глухозаземленной нейтралью с занулением в настоящее время реализуется устройствами защитного отключения (УЗО). Юридическим обоснованием применения УЗО является ПУЭ [1], где говорится: “Защитное отключение рекомендуется применять в качестве основной или дополнительной меры защиты, если безопасность не может быть обеспечена путем устройства заземления или зануления, либо, если устройство заземления или зануления вызывает трудности по условиям выполнения или по экономическим соображениям”.

Идея принципа действия УЗО проста [14], [15]. Трансформатор тока утечки (ТТУ) (см. рис. 51), названный также дифференциальным трансформатором тока (ДТТ), обхватывает все проводники участвующие в питании электроустановки [14].

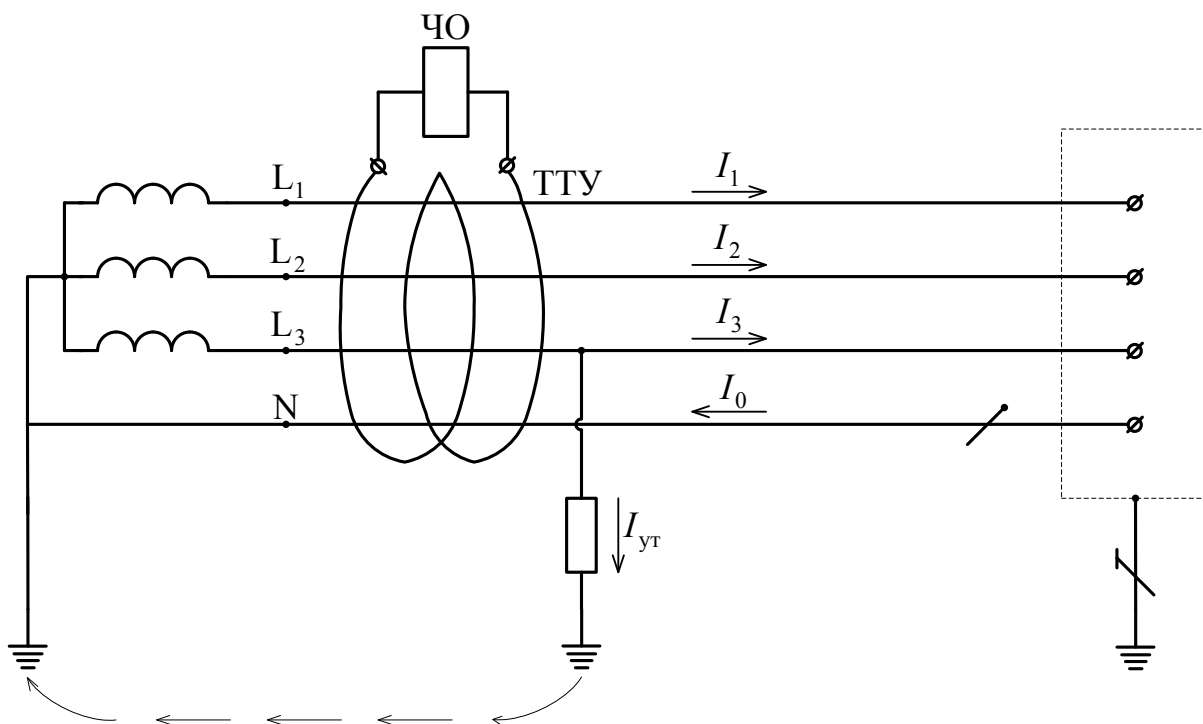


Рис. 51. Защита от тока утечки

При питании однофазной нагрузки через окно трансформатора ДТТ пропускают два провода – фазный и нулевой рабочий. В нормальном режиме работы сумма магнитных потоков проводников, создающих первичную обмотку этого трансформатора, равна нулю, т.е.

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_0 = 0.$$

При однофазной нагрузке

$$\Phi_1 - \Phi_0 = 0.$$

Небаланс магнитных потоков практически стремиться к нулю, его не принимаем во внимание.

При появлении утечки с любого провода ток утечки  $I_y$  пройдет мимо ТТУ на нейтраль силового питающего трансформатора. Сумма магнитных потоков проводов не будет равна нулю. Результирующий поток, пропорциональный току утечки, вызовет во вторичной обмотке ТТУ ток, который пройдет через чувствительный орган (ЧО). Этот ток пропорционален току утечки

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_0 = I_{yt}.$$

При однофазной нагрузке

$$I_1 - I_0 = I_{yt}.$$

Под действием тока ЧО подаст сигнал на отключение участка сети с появившейся утечкой.

Необходимо строго соблюдать следующее!

При использовании УЗО нулевой (четвертый) провод служить только как рабочий, т.е. исключительно для подключения однофазной нагрузки, но не для зануления. *Подключение нулевого провода к корпусам и нетоковедущим металлическим частям оборудования в зоне защиты (после ТТУ) недопустимо!* Металлические нетоковедущие части (корпуса) электроустановок, которые могут случайно оказаться под напряжением, вследствие нарушения изоляции токоведущих частей, должны быть заземлены. Заземляющие проводники в зоне защиты не должны иметь гальваническую (электрическую) связь с нулевым рабочим проводником. Нулевой рабочий проводник должен быть изолирован от земли по всей длине в зоне защиты.

Требования к изоляции нулевого проводника влечет к появлению пятипроводных участков сети (трехфазных, нулевой и защитный проводники). Однако, следует иметь в виду, что такие участки имеют ограниченную протяженность, в большинстве случаев заземление стационарного оборудования выполняется открытой заземляющей шиной.

УЗО (см. рис. 52) состоит из трех основных функциональных элементов: датчик тока утечки 1, коммутационное устройство 2 и исполнительный орган 3. Датчик тока утечки или трансформатор тока утечки ТТУ представляет собой тороидальный трансформатор тока, сердечник которого изготовлен из пермаллоя. Первичной одновитковой обмоткой ТТУ служат провода всех трех фаз и нулевой рабочий провод. Вторичная обмотка ТТУ обычно имеет большое число витков, расположенных по всему тороиду с постоянным шагом намотки. Исполнительный орган, часто это реле прямого действия, служит для преобразования сигнала, получаемого от ТТУ, в управляющее воздействие на отключение коммутационного аппарата. В зависимости от чувствительности УЗО исполнительный орган выполняют с усилителем или без него.

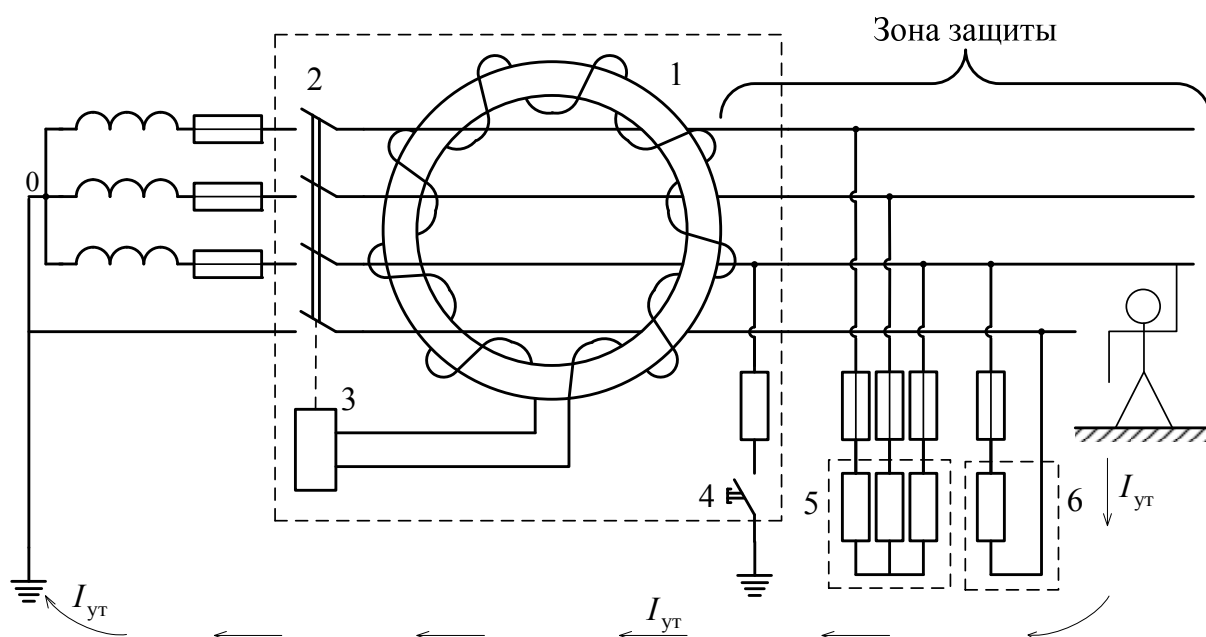


Рис. 52. Схема включения УЗО в трехфазную четырехпроводную сеть напряжением до 1140 В с нулевым рабочим проводом и заземлением корпусов электрического и технологического оборудования: 1 – датчик тока утечки (трансформатора тока утечки); 2 – коммутационное устройство; 3 – исполнительный орган (схема защиты по току утечки и привод коммутационного устройства); 4 – кнопка контроля исправности УЗО; 5 – трехфазный потребитель электроэнергии; 6 – однофазный потребитель электроэнергии

При отсутствии утечки тока УЗО находится в “ждущем” режиме. При

появлении тока утечки алгебраическая сумма мгновенных значений токов в фазных и нулевом рабочем проводах отличается от нуля на величину тока утечки. За счет этого появляется магнитодвижущая сила, создаваемая первичной обмоткой ТТУ, во вторичной обмотке ТТУ наводится ЭДС, за счет чего через исполнительный орган протекает ток, пропорциональный току  $I_{\text{ут}}$ . Исполнительный орган “выдает” управляющее воздействие на отключение коммутационного аппарата.

Очевидно, что при применении УЗО отпадает необходимость зануления электроустановок, а это путь перехода к трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения без зануления. Это обстоятельство повлекло в свою очередь разработку защит от токов утечки (ЗТУ) в нашей стране и отказ от системы зануления в ряде зарубежных стран (Англия, Австрия, Франция, Италия, Германия, США и другие).

Корпуса электроустановок должны быть лишь заземлены с сопротивлением, не превышающим значений расчетных, рассмотренных выше (см. рис. 6 и 9).

Уставка срабатывания ЗТУ должна определяться по допустимому току для человека, т.е. чувствительность ЗТУ определяется верхней границей допустимого тока утечки в зоне защиты. Опыт стран Западной Европы и США показывает, что токи срабатывания ЗТУ имеют значительный разброс. В этой рекомендации МЭК устанавливает, что заводы-изготовители должны гарантировать верхнюю границу отключающего тока утечки ЗТУ (международное обозначение  $I_{\Delta n}$ ), а срабатывание допускается при токе, равном половине этой величины, т.е.

$$I_{\text{сраб}} \geq \frac{I_{\Delta n}}{2}.$$

Величину тока утечки зоны защиты можно подсчитать или измерить. Методика измерения тока утечки изложена в разделе 4 (см. рис. 15). Рекомендуется установить уставку срабатывания ЗТУ в зависимости от номинального тока выключателя (см. табл. 18) по [14].

## Уставки срабатывания ЗТУ

Номинальный ток выключателя $I_{\text{ном}}$ , А	Номинальный отключающий ток ЗТУ, $I_{\Delta n}$ ,	Основное назначение ЗТУ
10 ÷ 16	0,006 ÷ 0,012	защита отдельных розеток, ручного инструмента
25 ÷ 40	0,3	защита бытовых и подобных им электроустановок от прямого и непрямого контакта
25 ÷ 63	0,3	защита электроустановок от непрямого контакта
40 ÷ 200	0,5	
200 ÷ 1000	2 ÷ 2,5	

Сопоставление номинального отключающего тока ЗТУ и номинального тока выключателя показывает, что отключающий ток ЗТУ составляет 0,1 ÷ 2 % номинального тока выключателя.

Для проверки работоспособности ЗТУ аппарат должен иметь кнопку проверки, при нажатии которой создается искусственная утечка с любой фазы на заземляющий проводник через резистор.

Следует иметь в виду, что никакая защита, типа ЗТУ, не может ограничить ток через человека, прикоснувшегося к фазному проводу или корпусу, случайно оказавшегося под напряжением. Ограничение тока через человека в сетях трех- и четырехпроводных с изолированной нейтралью осуществляется сопротивлением изоляции фаз сети по отношению к земле и сопротивлением заземления при прикосновении к корпусу. Защитное действие ЗТУ заключается в немедленном отключении и прекращении протекания тока, т.е. в защитном отключении. По нормам МЭК время воздействия тока следует ограничивать до 0,03 ÷ 0,04 с, что соответствует допустимому току более 500 мА (см. табл. 18). Технические возможности ЗТУ в настоящее время позволяют выполнить такие условия защиты человека.



Преимущество УЗО проявляется и в том, что не требуется отстройка от пусковых режимов 3-х фазных двигателей.

Селективность и ступенчатость защиты в системе электроснабжения до 1140 В обеспечивается подбором уставок УЗО по току утечки и времени срабатывания степеней защиты. Например, на головном участке линии (на трансформаторной подстанции) рекомендуется устанавливать УЗО, время срабатывания которого было бы на ступень выше, чем у УЗО на вводах в производственные или бытовые помещения. На подстанциях ток уставки УЗО может достигать  $500 \div 1000$  мА.

Отход от трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью с занулением к трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью без зануления позволит полнее использовать возможности УЗО и существенно повысить уровень электробезопасности персонала и технической электробезопасности.

## 9. ЗАЩИТА ОТ УТЕЧЕК ТОКА В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) предписывают в электроустановках до 1 кВ переменного тока с изолированной нейтралью питающей сети или с изолированным выводом источника однофазного тока при повышенных требованиях электробезопасности применять заземление в сочетании с контролем изоляции сети или защитное отключение. Защитное отключение рекомендуется (ПУЭ) применять в качестве основной или дополнительной меры защиты, если безопасность не может быть обеспечена путем устройства заземления.

Защитное отключение в сетях с изолированной нейтралью применяется при условиях повышенной опасности и при эксплуатации электроустановок в опасных средах (нефтеперерабатывающие, лакокрасочные, мукомольные, мануфактурные производства, углеобоганительные комплексы, хлопкоперерабатывающие производства, передвижные установки, торфяные разработки, шахты опасные и особо опасные и т.п.).

Возникающие однофазные замыкания на землю сопровождаются относительно небольшими токами, и электроустановки могут продолжать работать. Опасность возникает с точки зрения поражения человека, если утечка имеет место через его тело, или с точки зрения возникновения пожаров и взрывов в окружающей среде при появлении электрической дуги вне взрывозащищенных оболочек. Защита от утечек тока часто обеспечивает безопасность при междуфазных замыканиях, когда дуга короткого замыкания или проводники, замыкающиеся накоротко, касаются заземленных частей или корпусов оборудования.

Безопасность эксплуатации может быть обеспечена такой защитой, которая способна производить отключение сети как при однофазной утечке ( $R_c$  и  $R_c^{(1)}$ ), так и при симметричном снижении сопротивления изоляции всех трех фаз относительно земли до предельной допустимой величины  $r_{кр}$  (критического сопротивления изоляции).

Начиная с 40 – 50-х годов, в практике эксплуатации сетей с изолированной нейтралью широко применялись и применяются различные

защиты от утечек тока.

Из большого числа схем защиты от утечек тока рассмотрим те, которые положены в основу широко применяемых универсальных аппаратов контроля изоляции (УАКИ) [17], [19].

Схемы устройства (см. рис. 53) основана на использовании напряжения нулевой последовательности, которое появляется при утечке тока. В схеме на рис. 53,а резисторы  $R_0$  могут быть заменены емкостями  $C_0$  (см. рис. 53,б). На базе этой схемы разработаны устройства, которые названы асимметрами [16], в частности, асимметр РА-74/2, который применяется в некоторых случаях и в настоящее время.

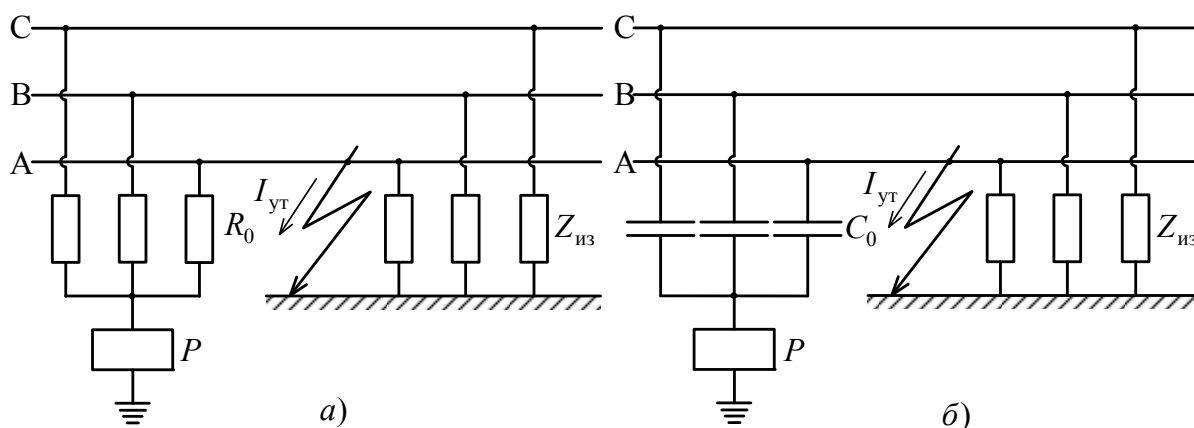


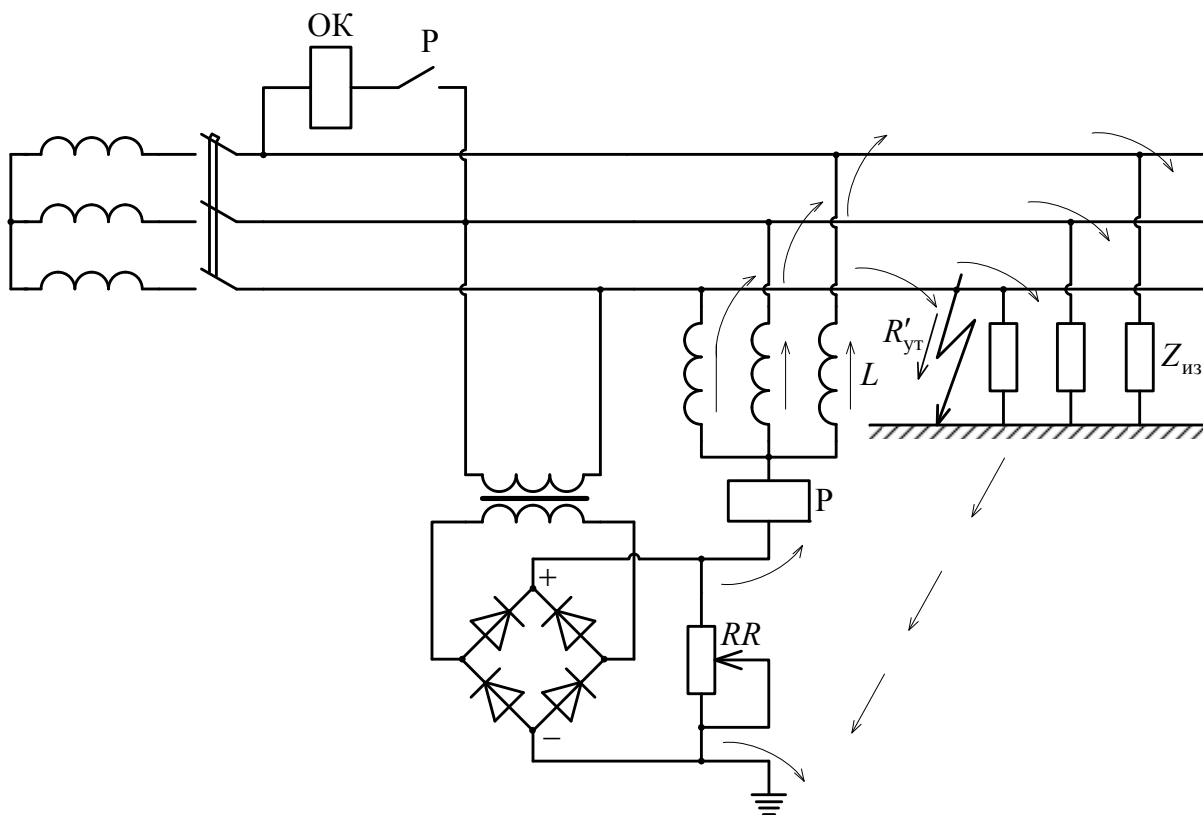
Рис. 53. Принципиальные схемы асимметров: а – с резисторами; б – с емкостями

Принцип действия асимметров основан на использовании напряжения нулевой последовательности, которое возникает при появлении несимметричной утечке  $R_c^I$  или  $R_c^{II}$  и оказывается приложенным к реле, включенному последовательно с сопротивлением фильтра  $R_0$  или  $C_0$ . Когда сопротивление утечки оказывается меньше отключающей величины, происходит срабатывание реле и отключение сети.

Одним из главных недостатков этой схемы является то, что она не реагирует на симметричное снижение сопротивления изоляции всех трех фаз до  $R_{кр}$ . В большинстве случаев эта схема используется как делитель напряжения для улучшения характеристик, применяемых в настоящее время.

Более совершенной защитой от утечек является защита, где исполь-

В схеме на [рис. 54](#) постоянный ток проходит по замкнутой цепи от полюса выпрямителя через катушку реле, дроссель  $L$ , через сопротивление изоляции на землю, дальше из земли к минусу выпрямителя. При снижении сопротивления изоляции или появлении утечки постоянный ток через реле достигнет или превысит величину уставки срабатывания, реле сработает и произойдет отключение сети автоматом при протекании тока по отключающей катушке ОК. Дроссель  $L$  пропускает постоянный ток выпрямителя, но препятствует прохождению переменного тока сети.



Широкое применение в практике конструирования реле утечки нашли схемы 3В (три выпрямителя), присоединяемые к сети (см. рис. 55).

$$R_c^I : R_c^{II} : R_{kp} = 1 : 2 : 3.$$

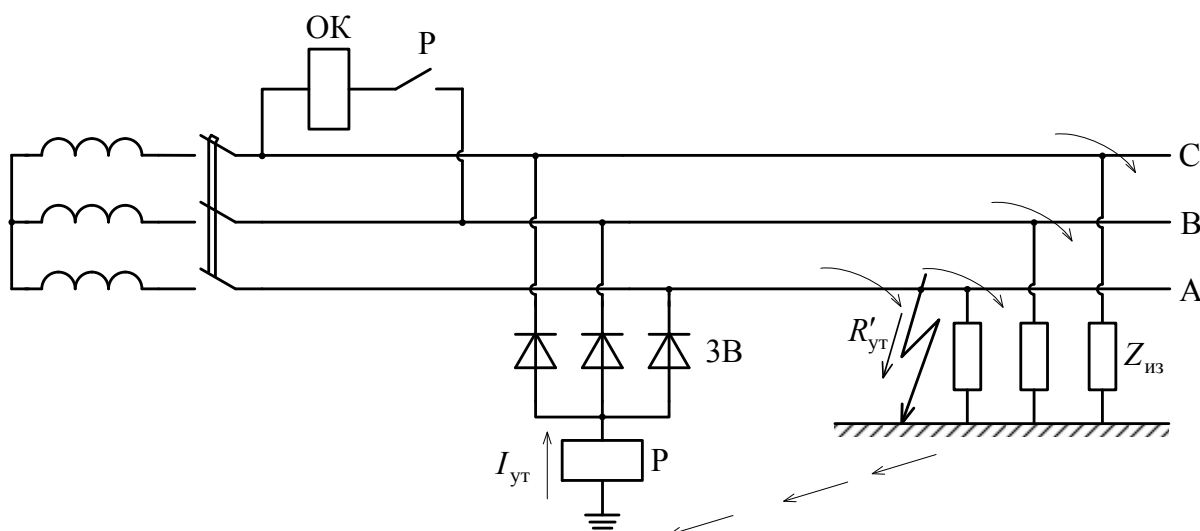


Рис. 55. Принципиальная схема 3В для контроля изоляции

Характеристики с таким соотношением отключающих сопротивлений названы каноническими.

В аппаратах с канонической характеристикой выбор величины устав- ки срабатывания  $R_c^I$  и  $R_c^{II}$  автоматически определяет величину критическо- го сопротивления  $R_{кр}$  и наоборот. В этой связи в разветвленных и протя- женных сетях, где сопротивление изоляции  $r$  относительно земли мало, приходится снижать величину критического сопротивления, а это влечет за собой снижение отключающих сопротивлений  $R_c^I$  и  $R_c^{II}$ , которые оказыва- ются меньшими, чем необходимо для обеспечения безопасности.

В этой связи был разработан ряд схем реле утечек, характеристики которых были *деформированы* – в этих схемах стало возможным повы- шать отключающие  $R_c^I$  и  $R_c^{II}$  и одновременно снижать величину  $R_{кр}$ , т.е. выбирать эти параметры независимо друг от друга. Одна из таких схем УАКИ изображена на рис. 56, позволяющая выбирать значения  $R_{кр}$  независимо от выбора отключающих значений  $R_c^I$  и  $R_c^{II}$ .

Схема УАКИ построена на базе делителя напряжения (он же фильтр напряжения нулевой последовательности) и схемы 3В [17]. В результате незначительных изменений параметров схема УАКИ оказалась способной создавать как канонические, так и деформированные характеристики с разной степенью деформации, т.е. имеющей отношение

Делитель напряжения в схеме УАКИ применен для повышения чувствительности, так как схемы (см. рис. 54 и 55) имеют недостаточную чувствительность из-за большого оперативного напряжения и, следовательно, высокого собственного сопротивления.

126

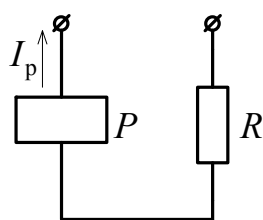


Рис. 57. Схема цепи замера сопротивления по [17]

Зависимость тока реле  $I_p$  от величины измеряемого сопротивления  $R$  при различном собственном сопротивлении реле в этой схеме показана на рис. 58. Аппарат с характеристикой А, где сопротивление реле велико, ток срабатывания реле  $I_{cp1} = 15$  мА, а аппарат с характеристикой В, где сопротивление реле мало, ток срабатывания реле  $I_{cp2} = 5$  мА при одинаковом в обоих случаях значениях сопротивления  $R$ , вызывающем срабатывание.

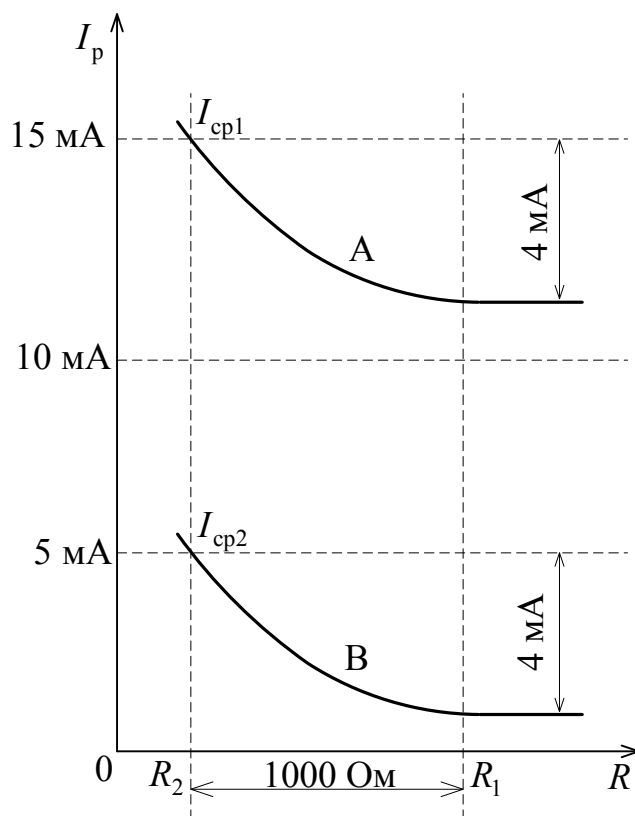


Рис. 58. Зависимость тока, протекающего через реле от величины сопротивления при замере по схеме рис. 57 по [17]

Из этих кривых следует, что в обоих случаях одинаковые изменения измеряемого сопротивления  $\Delta R = R_1 - R_2 = 1000$  Ом вызывают одинаковые по величине *абсолютные* повышения тока через реле  $P$ , равные 4 мА. Однако, из этих кривых видно, что одинаковые изменения  $R$  на величину

$\Delta R = 1000 \text{ Ом}$  вызовет неодинаковое *относительное* изменение проходящего через реле тока. Так во втором аппарате (характеристика В) ток увеличится с 1 до 5 мА, т.е. в пять раз, а в первом аппарате (характеристика А) – с 11 до 15 мА, т.е. в 1,37 раза. Очевидно, что при одинаковых погрешностях работы реле применение аппарата с малым внутренним сопротивлением (характеристика В) обеспечит по сравнению с  $R_c^I$  и  $R_c^{II}$  гораздо более точное и четкое срабатывание реле, чем при аппарате с большим внутренним сопротивлением (характеристика А). Таким образом, внутреннее сопротивление реле должно быть малым, но не вызывающим допустимый ток до появления утечки. Его относительное сопротивление должно уменьшаться в момент срабатывания. В этом суть деформации канонической характеристики.

Требования обеспечения чувствительности, таким образом, сводится к требованию обеспечения достаточно резкого относительного изменения тока через реле при данном изменении измеряемого сопротивления. А это зависит от соотношения величины собственного сопротивления схемы  $R_{cx}$  и измеряемого сопротивления  $R$ .

Если аппарат защиты от утечек тока имеет собственное сопротивление  $R_{cx}$  по величине больше, чем  $R_c$  при котором этот аппарат должен сработать, т.е., если ему присуще высокое значение отношения

$$n = \frac{R_{cx}}{R_c},$$

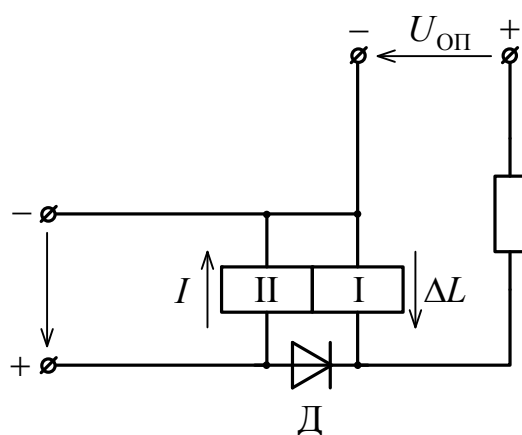
то применение такого аппарата невозможно обеспечить достаточно высокую чувствительность (четкость) работы защиты. Действительно, в этом случае значительные изменения измеряемой величины  $R$  приводят к небольшим изменениям тока замера в аппарате защиты. Действительно, в этом случае значительные изменения измеряемой величины  $R$  приводят к небольшим изменениям тока замера в аппарате защиты. Поэтому при больших значениях  $n$  аппарат защиты может сработать при сопротивлениях, значительно отличающихся от  $R_c$  или вообще отказать в работе.

В схеме УАКИ применена дифференциальная схема замера, изображенная на [рис. 59](#), в которой применено двухобмоточное реле. Обмотки



этого реле намотаны встречно, что показано на [рис. 59](#) стрелками. Первая из этих обмоток I является рабочей, включенной в цепь замера, вторая II – тормозной, питающейся от независимого источника тока. Величина тока в обмотке I зависит от величины измеряемого сопротивления  $R$ , а величина тока в обмотке II от  $R$  не зависит. При такой схеме реле срабатывает под действием результирующего тока  $I_{\text{ср}} = I_{\text{I}} - I_{\text{II}}$  (см. [рис. 60](#)), причем при изменении сопротивления на  $\Delta R = 1000$  Ом при параметрах, соответствующих характеристике А, ток в обмотке I изменится, как и в схеме [рис. 57](#), с 11 до 15 мА, однако относительное изменение тока, вызывающего срабатывание реле при  $I_{\text{II}} = 10 \text{ мА} = \text{const}$  окажется в этой схеме равным

$$\frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{I}} + I_{\text{II}}} = \frac{15 - 10}{11 - 10} = 5.$$



[Рис. 59. Схема дифференциального замера по \[17\]](#)

При применении такой схемы характеристика аппарата окажется такой же, как и аппарата В. Выпрямитель Д в этой схеме предупреждает срабатывание реле под действием тормозного тока, когда ток в рабочей обмотке мал или отсутствует (измеряемое сопротивление  $R$  велико).

Рассмотренный подробно способ деформации канонической характеристикой является не единственным. Существуют и другие способы деформации, один из которых, построенный на динисторе, рассмотрен ниже.

Защита от утечек на землю в сетях напряжением до 1000 В должна отвечать следующим основным требованиям:

- осуществлять непрерывный контроль токов утечки через изоляцию сети;

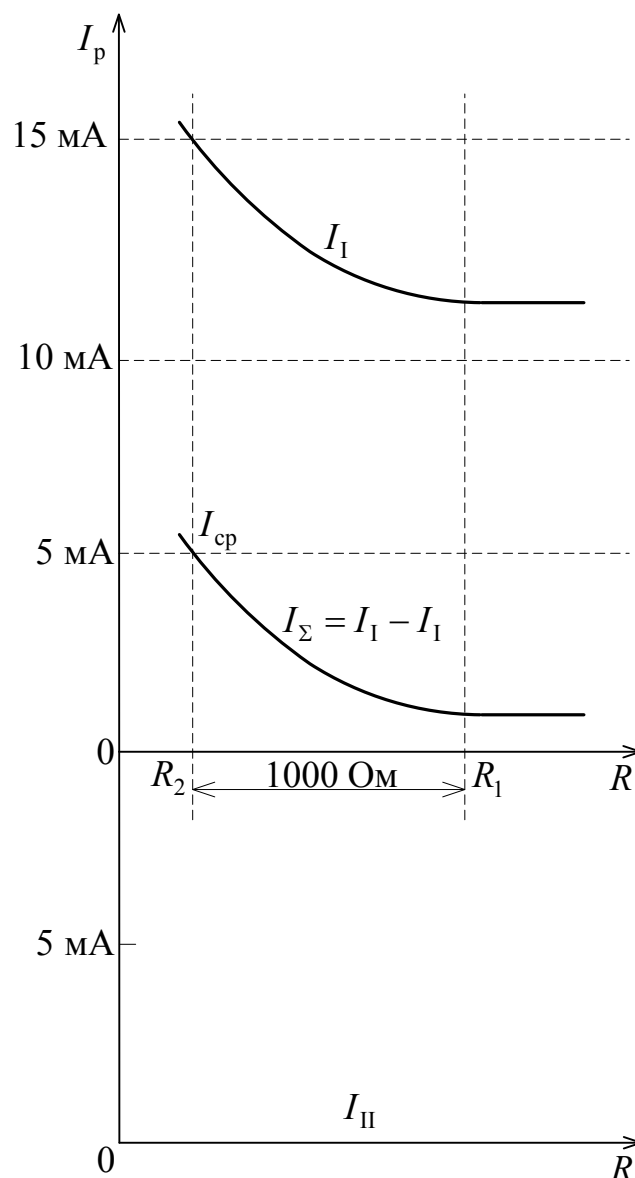


Рис. 60. Характеристики  $I_p = f(R)$  при замере тока утечки по схеме на рис.

59

- реагировать только на снижение активной составляющей изоляции сети;
- реагировать как на симметричное, так и на несимметричное снижение изоляции сети;
- обладать достаточной чувствительностью и необходимой надежностью;
- не реагировать на переходные процессы в сети, вызванные включением или отключением силовых потребителей;
- время срабатывания реле утечки и коммутационного отключающего

аппарата не должно превышать 0,2 с;

- по возможности осуществлять самоконтроль исправности аппарата;
- реле утечки должно автоматически срабатывать в случае прикосновения человека к токоведущим частям сети и при появлении тока утечки, который может вызвать открытое искрение в условиях взрывчатой и пожароопасной среды.

На рис. 56 приведена схема аппарата защиты в утечек типа УАКИ. Трехфазный выпрямитель питается от делителя напряжения  $R_1 - R_2$  и состоит из трех диодов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$ . Между общей точкой выпрямителей  $O_1$  и нулевой точкой звезды делителя напряжения  $O_2$  существует выпрямленное напряжение, являющееся оперативным в цепи защиты. При большом сопротивлении изоляции ( $R_{ут} \rightarrow \infty$ ) под действием этого напряжения вспомогательный ток  $I_v$  протекает по I и II обмоткам реле Р. Количество витков и сопротивления обмоток I и II выбирают так, чтобы при  $R_{ут} \rightarrow \infty$  и  $R_c^I \rightarrow \infty$  создаваемые этими обмотками магнитные потоки были равны. Учитывая, что обмотки включены встречно, результирующее их воздействие на реле равно нулю и реле находится в нейтральном состоянии.

При снижении сопротивления  $R_c^I$  или  $R_{ут}$  появится оперативный ток  $I_{оп}$ , проходящие через первую обмотку I, значение которого зависит от сопротивления изоляции сети. При дальнейшем уменьшении сопротивления изоляции сети оперативный ток увеличивается. При величине, равной току срабатывания реле Р, последнее срабатывает, замыкает свой контакт  $P_1$ , который включает отключающую катушку ОК, расположенную в автоматическом выключателе А, в результате чего происходит отключение сети.

Для компенсации емкости сети по отношению к земле в аппарат введен дроссель  $K_{др}$ , который присоединяется к нулевой точке звезды, образованной конденсаторами  $C_0$ . Дроссель имеет обмотку в два отпайки, которыми можно регулировать величину индуктивности в зависимости от суммарной емкости сети.

Отпайка 3 используется при емкости сети до 0,5 мкФ/фазу, отпайка 2

при емкости  $0,5 - 1,0$  мкФ/фазу.

В связи с непрерывно изменяющейся емкостью сети (включения и отключения по технологической необходимости) эффективности компенсации можно повысить применением устройства автоматической настройки индуктивности. В таких устройства вместо компенсирующего дросселя со ступенчатым регулированием индуктивности применяется дроссель с подмагничиванием постоянным током в зависимости от емкости сети. В настоящее время в промышленности эксплуатируются аппараты защиты с автоматической компенсацией емкости сети (АЗАК, АЗПБ и др.).

Емкость  $C_0$  является заградительным фильтром для постоянного тока. Шунтирующая емкость  $C_{ш} \approx 20$  мкФ позволяет выбрать уставку срабатывания реле (чем меньше  $C_{ш}$ , тем больше отключающее сопротивление).

В настоящее время в промышленности эксплуатируются реле утечки РУ на напряжение 127, 220, 380 и 660 В, обладающих самоконтролем исправности элементов схемы контроля изоляции и защитного отключения. Для защиты от утечек в сетях напряжением 1140 В используется комплект аппаратуры защиты, состоящий из блока защитного отключения БЗ0 – 1140, который воздействует на включатель при снижении сопротивления изоляции сети до недопустимо низкого уровня или возникновении опасных утечек тока на землю, и блока БКЗ – 1140 для компенсации емкостных токов, обнаружения и закорачивания поврежденной фазы на землю.

Применяемый аппарат защиты от утечек типа САЗУ (самонастраивающийся аппарат защиты от утечек) Такое название обусловлено тем, что уставка аппарата защиты автоматически изменяется при изменении сопротивления изоляции сети. Контроль изоляции осуществляется путем наложения выпрямленного тока на сеть, находящуюся под нормальным рабочим напряжением. Широкое применение в практике нашли и другие аппараты защиты от утечек, применяемые в основном в горной промышленности [19].

Деформация канонической характеристики с помощью дифференциальной схемы замера тока утечки, применяемой в аппаратах защиты типа УАКИ, явилась основой построения схем контроля высокой чувствительности к одно- и многофазной утечке, позволяющей отдельно выби-

рать уставки срабатывания при снижении изоляции всей сети или одной фазы.

Идея глубокой деформации канонической характеристики в устройстве (см. рис. 61) заключается в том, что схема измерения резко снижает свое сопротивление при появлении одно или двухфазной утечки или снижении изоляции всей сети в момент срабатывания устройства. Причем, очень важно, внутреннее сопротивление устройства резко снижается до величины, при которой ток утечки не превосходит допустимые пределы.

Недостатки устройства с дифференциальной схемой измерения тока утечки заключается в следующем:

- 1) низкая чувствительность к однофазной утечке тока в разветвленных и протяженных сетях, имеющих сравнительно небольшое общее сопротивление изоляции сети относительно земли вследствие малой степени деформации канонической характеристики устройства;
- 2) длительное существование предпорогового тока утечки, не достигшего порога срабатывания реагирующего органа при постепенном снижении сопротивления изоляции контролируемой сети; в этом случае ступень увеличения тока от предпорогового значения, когда еще не срабатывает электромагнитное реле реагирующего органа мала, что влечет за собой не четкое срабатывание, а пульсация тока, выпрямленного вентильным фильтром, вызывает вибрацию электромагнитного реле реагирующего органа.

Сглаживание пульсаций тока известными способами, подключением параллельно реагирующего органу емкости или последовательно – индуктивности, не приводит к желаемому результату, так как в первом случае эффективность сглаживания пульсаций возрастает при увеличении сопротивления реагирующего органа, что снижает чувствительность устройства, во втором – увеличение индуктивности приводит к медленному нарастанию тока при внезапном повреждении изоляции контролируемой сети и, как правило, к потере быстрого действия устройства.

Деформацию канонической характеристики устройства осуществляют путем введения, в качестве реагирующего органа, дифференциальной схемы с использованием электромагнитного двухобмоточного реле с тормоз-



Рис. 61. Устройство для контроля изоляции в сети переменного тока с изолированной нейтралью

ной и рабочей обмотками и вспомогательного источника напряжения нулевой последовательности, что позволяет искусственно увеличить относительное изменение тока в реагирующем органе. Для устранения вибрации и нечеткости срабатывания реле при протекании через его рабочую обмотку оперативного пульсирующего тока используют самоблокировку реле с помощью контакта, шунтирующего его тормозную обмотку.

Однако возможности дифференциальной схемы ограничены, вследствие малого диапазона эффективного использования емкости, шунтирующей основную рабочую обмотку реле, и получить необходимую для контроля изоляции в сильно разветвленных и протяженных сетях глубину деформации (более 6,5) не удастся, т.е. чувствительность к однофазной утечке в таких сетях остается низкой. Применение дифференциальной схемы снижает надежность устройства, вследствие сложности самой схемы и ее настройки, не устраняет пульсации тока, а применение электромагнитного реле и его самоблокировки снижает быстродействие устройства. Кроме того, использование вспомогательного источника напряжения нулевой последовательности в этом устройстве, выполненного на резисторах, снижает сопротивление изоляции контролируемой сети относительно земли, что влечет за собой увеличение тока утечки и ухудшение условий электробезопасности.

Целью рассматриваемого ниже устройства является расширение диапазона контроля путем повышения чувствительности устройства к однофазной утечке при одновременном увеличении быстродействия, а также снижения предпорогового тока срабатывания реагирующего органа.

Эта цель достигается тем, что устройство, содержащее реагирующий орган, трехфазный вентильный фильтр, подключаемый через токоограничивающий резисторы к контролируемой сети, введен индуктивно-емкостной фильтр с регулируемым резистором, присоединенный параллельно реагирующему органу одним выводом к нейтральной точке вентильного фильтра, а вторым – к земле через последовательно соединенный резистор и обмотку трансформатора исполнительного органа.

Схема (см. рис. 61) содержит трехфазный вентильный фильтр 1, подключенный через токоограничивающие резисторы 2 к фазам контролиру-

емой сети 3, реагирующий орган (динистор) 4, параллельно присоединенный к нему введен индуктивно-емкостной фильтр 5, состоящий из катушки индуктивности, конденсатора, регулируемого резистора 6 и присоединенный одним выводом к нейтральной точке вентильного фильтра, а вторым – через резистор 7 и обмотку 8 понижающего трансформатора 9 к земле 10. Вторичная обмотка 11 трансформатора подключена через диод 12 к управляющему электроду тиристора 13, который подключен последовательно с источником постоянного тока 14 и отключающей катушкой 15 коммутационного аппарата 16. Индуктивно-емкостной LC-фильтр 5 с последовательно соединенным регулируемым резистором 6 настроен на резонансную частоту, равной частоте тока сети (на 150 Гц при частоте тока 50 Гц) и обладают малым сопротивлением для утроенной частоты тока сети, которая протекает через фильтр при симметричном снижении изоляции сети, но оказывает большое сопротивление току частотой, равной частоте тока сети, что имеет место при однофазной утечке.

Схема устройства работает следующим образом:

При снижении сопротивления изоляции по отношению к земле одной из фаз контролируемой сети (однофазная утечка), сопровождающейся прохождением через измерительную цепь устройства между землей 10 и контролируемой сетью 3 тока частотой тока сети, LC-фильтр окажет большое сопротивление этому току. На зажимах LC-фильтра возрастает падение напряжения и при достижении уставке срабатывания, динистор 4 открывается. Это сопровождается снижением общего сопротивления устройства между землей 10 и контролируемой сетью 3, в результате чего возрастающий ток трансформатора 9 в первичной обмотке 8 обуславливает появление во вторичной обмотке 11 ЭДС, которая после выпрямления диодом 12 подается на управляющий электрод тиристора 13. Тиристор при открывании подключает отключающую катушку 15 коммутационного аппарата 16 к источнику постоянного тока 14, при этом отключается контролируемая сеть. Уставка срабатывания регулируется резистором 7, а глубина деформации канонической характеристики (чувствительность к однофазной утечке) осуществляется резистором 6. При отключении контролируемой сети схема устройства приходит в исходное состояние.



При симметричном снижении сопротивления изоляции по отношению к земле всех трех фаз контролируемой сети 3 (трехфазная утечка), когда через измерительную цепь устройства между землей 10 и контролируемой сетью протекает ток утроенной частоты тока сети, устройство работает аналогично, что и при однофазной утечке. Однако, что требуется по условиям эксплуатации, устройство срабатывает при большом токе утечки по сравнению с величиной тока однофазной утечки. Причина заключается в том, что для LC-фильтра резонансной частотой является утроенная частота тока сети. В результате при резонансе напряжений в LC-фильтре падение напряжения на динисторе будет меньше, чем при однофазной утечке и будет определяться величиной активной составляющей сопротивления цепи L-C-фильтра, которая состоит из суммы активных сопротивлений катушки индуктивности фильтра и резистора 6. Поэтому для срабатывания устройства при трехфазной утечке требуется больший ток утечки или, другими словами, меньшее сопротивление изоляции сети по сравнению с однофазной утечкой, что необходимо при эксплуатации сильно разветвленных и протяженных сетей с изолированной нейтралью. Резисторы 6 и 7 позволяют добиться отдельной чувствительности устройства к одно- и трехфазной утечкам, причем резистор 7 служит для регулирования чувствительности устройства одновременно к одно- и трехфазной утечкам.

Таким образом, принципиальное отличие устройства заключается в том, что в схеме реле утечки (см. рис. 56) применена дифференциальная схема замера тока утечки на базе двухобмоточного электромагнитного реле, которая обладает ограниченной степенью деформации канонической характеристики (до 6,5) и рядом других рассмотренных выше недостатков. В предлагаемом устройстве отдельная чувствительность к одно- и трехфазной утечке реализуется применением индуктивно-емкостного фильтра с последовательно соединенным резистором. Индуктивно-емкостной фильтр позволяет получить на реагирующем органе высокое напряжение при однофазной утечке по сравнению с трехфазной утечкой, т.е. дает возможность перенести уставку срабатывания в область высоких сопротивлений однофазной утечки и тем самым осуществить более глубокое деформирование канонической характеристики (до 15) и одновременно

снизить уставку сопротивления срабатывания при трехфазной утечке, что позволит улучшить условия электробезопасности при эксплуатации не только коротких, но и сильно разветвленных и протяженных сетей.

Применение этого устройства позволяет проектировать более разветвленные и протяженные сети, особенно в опасных производствах (шахтах, не опасных по газу и пыли, на обогатительных комплексах, драгах и экскаваторах крупных параметров), т.е. сократить число устанавливаемых силовых трансформаторов, коммутационных аппаратов и уменьшить расход кабеля.

## 10. ТРЕБОВАНИЯ ПУЭ К ВЕЛИЧИНАМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Величина сопротивления заземления нормируется для точки подсоединения заземляющего проводника к корпусу электроустановки. В соответствии с определениями *ПУЭ 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* называют проводник, соединяющий заземляемые части оборудования с заземлителем.

Из приведенных определений следует, что сопротивление главного заземлителя  $R_{\text{гл.зaz}}$  (см. рис. 39) является разностью между нормируемым сопротивлением заземления в точке подсоединения заземляющего проводника к корпусу электроустановки и сопротивлением заземляющего проводника, т.е.

$$R_{\text{гл.зaz}} = R_{\text{норм}} - R_{\text{пр}}. \quad (66)$$

Следует иметь в виду, что сопротивление растеканию тока главного заземлителя не нормируется, а вычисляется по (66).

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  $R_{\text{и}}$  определяется по выражению:

$$R_{\text{и}} = \frac{R_{\text{гл.зaz}} R_e}{R_{\text{гл.зaz}} - R_e}. \quad (67)$$

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  $R_{\text{доп}}$  (см. рис. 62), величина которого будет найдена из следующего.

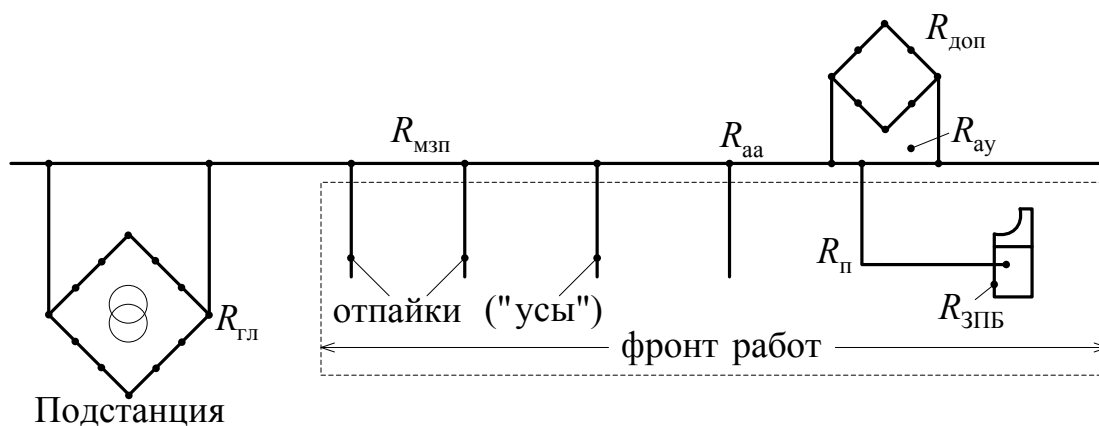


Рис. 62. Схема сети заземления при применении дополнительного главного заземлителя  $R_{\text{доп}}$

Сопротивления растеканию тока главного заземлителя подстанции  $R_{\text{гл}}$  от точки “а” с учетом сопротивления магистрального заземляющего проводника  $R_{\text{мп}}$  определяются

$$R_{\text{а}} = R_{\text{гл}} + R_{\text{мп}}.$$

Сопротивление  $R_{\text{а}}$  можно рассчитать или измерить в точке “а”.

Сопротивление растеканию тока в точке “а” для заземляемой электроустановки “К” должно быть

$$R_{\text{ау}} = R_{\text{з.пб}} - R_{\text{п}}.$$

где  $R_{\text{з.пб}}$  – сопротивление заземления электроустановки, регламентируемое ПУЭ;  $R_{\text{п}}$  – 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:

$$R_{доп} = \frac{R_{ay} R_a}{R - R_a}.$$

По величине  $R_{доп}$  определяют количество электродов для сооружения главного дополнительного заземлителя.

Количество электродов (шт.) заземлителя можно определить по выражению

$$n = \frac{R_{од.ст} K_c}{R_{доп} \eta},$$

где  $R_{од.ст}$  – сопротивление растеканию тока одиночного вертикального стержневого электрода, Ом;  $K_c$  – коэффициент сезонности, зависит от сезонного изменения удельного сопротивления земли, принимаем по справочным данным;  $R_{доп}$  – сопротивление растеканию тока любого заземлителя, в данном случае – главного дополнительного, Ом;  $\eta$  – коэффициент экранирования (или использования) электродов, теоретически изменяется в пределах от 0 до 1, принимается по справочным данным.

Сопротивления растеканию тока (Ом) вертикального углубленного электрода определяют по известному выражению

$$R_{од.ст} = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right),$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление земли, Ом·м;  $l$  – длина активной части электрода (длина, соприкасающаяся с землей), обычно при углубленном электроде активной части равна строительной длине электрода, м;  $d$  – параметр в м, для стержней круглого сечения – диаметр электрода, а для стержня из стали уголкового профиля с шириной полки  $b$  –  $d = 0,95b$ ;  $t$  –

глубина заложения вертикального электрода (расстояние от поверхности земли до середины электрода) в метрах

$$t = h + \frac{l}{2}$$

где  $h$  – расстояние от поверхности земли до верхней кромки электрода, м.

Расстояние  $h$  должно быть больше 0,5 м.

Сопротивление растеканию тока (Ом) горизонтального протяженного электрода (шины) определяется по выражению

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l_{\pi}} \ln \frac{l_{\pi}^2}{d t_{\pi}}$$

где  $l_{\pi}$  – длина горизонтального электрода (полосы), м;  $d = 0,5 b$ , здесь  $b$  ширина полосы, м;  $t_{\pi}$  – 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 ПУЭ [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  $R_z \leq 0,5$  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 1140 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 изолиро-

ванной нейтралью во всех отраслях народного хозяйства), то сопротивление заземления электроустановок должно быть

$$R_3 \leq \frac{250}{I_{\text{озн}}},$$

но не более 10 Ом. Здесь  $I_{\text{озн}}$  – ток однофазного замыкания на землю в электросети данной ступени напряжения [расчет по формулам (50) – (52)]. Обычно это отдельностоящие высоковольтные установки напряжением до 35 кВ. Например, корпуса разъединителей на опорах линии электропередачи, корпуса электроустановок продольной компенсации и т.п.

Подгрупп Б. Если заземляющее устройство используется одновременно (совмещенный заземлитель) для электроустановок напряжением выше 1140 В до 35 кВ включительно и для электроустановок напряжением до 1140 В и ниже, то сопротивление заземления должно быть

$$R_3 \leq \frac{125}{I_{\text{озн}}},$$

но не более норм сопротивления заземления для электроустановок напряжением ниже 1140 В.

*III группа.* Электроустановки напряжением 1140 В и ниже. Электроустановки эксплуатирующиеся в сетях с изолированной нейтралью напряжением ниже 1140 В, должны иметь сопротивление заземления не более 4 Ом. При мощности питающих генераторов или трансформаторов 100 кВА и меньше заземляющие устройства электроустановок могут иметь сопротивления 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  $\rho \geq 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  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 1140 В и ниже, должны иметь сопротивление заземления:

при напряжении сети 1140/660 В и 660/380 В должно быть  $R_3 \leq 2 \text{ Ом}$ ;

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 грозовых 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 25 А (ПУЭ).

Общее сопротивление всех повторных заземлителей должно быть меньше или равно:

5 Ом при  $U = 1140/660$  В и  $U = 660/380$  В;

10 Ом при  $U = 380/220$  В;

20 Ом при  $U = 220/127$  В.

Сопротивление растеканию тока отдельностоящего повторного заземлителя, отключенного от сети заземления, должно быть не более

15 Ом при  $U = 1140/660$  В и  $U = 660/380$  В;

30 Ом при  $U = 380/220$  В;

60 Ом при  $U = 220/127$  В.

При удельном сопротивлении земли  $\rho$  более 100 Ом·м допускается увеличить указанные нормы в  $0,01\rho$  раз, но не более чем в 10 раз.

В сетях, эксплуатируемых в подземных условиях, сопротивление заземления электроустановок не должно быть более 2 Ом.



## 11. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Для правильной оценке качества заземляющих устройств измерение их сопротивления рекомендуется проводить в период наименьшей проводимости грунта: зимой – при наибольшем его промерзании, летом – при наибольшем просыхании [29].

*Метод амперметра-вольтметра* применяется в основном для точных измерений при малых сопротивлениях (с точностью до сотых долей Ома). Измерения производят переменным током от разделительного понижающего трансформатора, первичное напряжение которого рекомендуется регулировать автотрансформатором (см. рис. 63). *Применение разделительного трансформатора является обязательным! Использование только одного автотрансформатора недопустимо!*

При несоблюдении этого требования возможны короткие замыкания питающей сети на заземлитель.

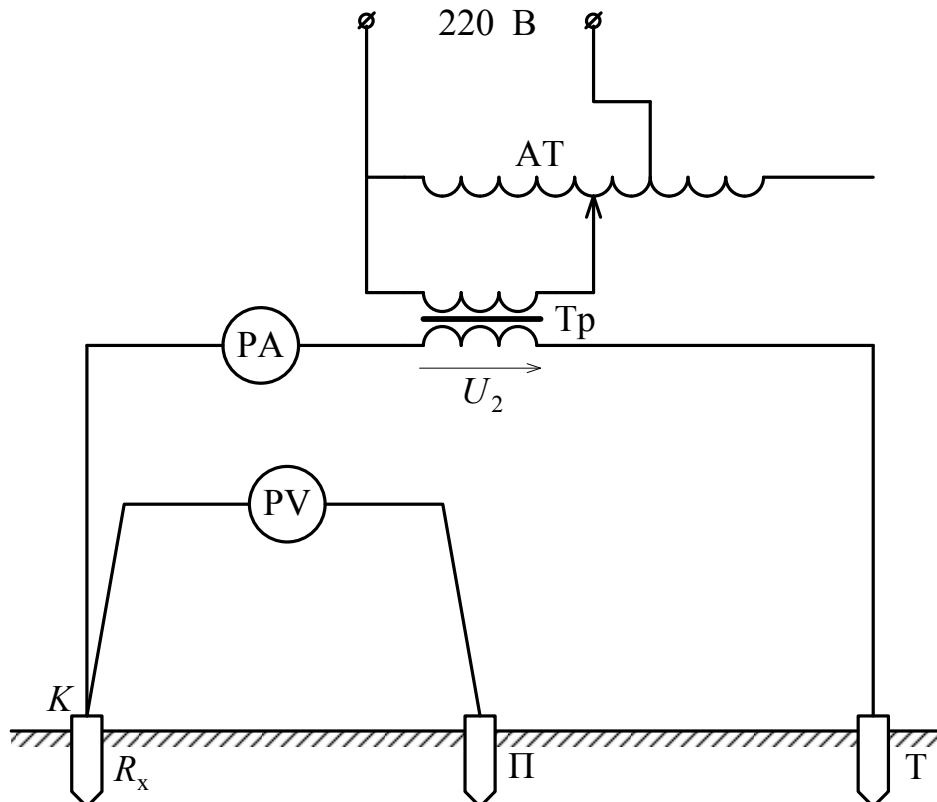


Рис. 63. Схема измерения сопротивления заземлителя методом амперметра-вольтметра

Из условия безопасности вторичное напряжение принимают не более  $60 \div 70$  В. Из-за большого тока в измерительной цепи регулируется обычно первичное напряжение разделительного трансформатора.

При разветвленной заземляющей сети измерение производят отдельно: сопротивления заземлителей и сопротивления заземляющих проводников, т.е. металлической связи корпусов электрооборудования с заземлителем. Сумма этих сопротивлений не должна превышать нормированного сопротивления заземления электроустановки.

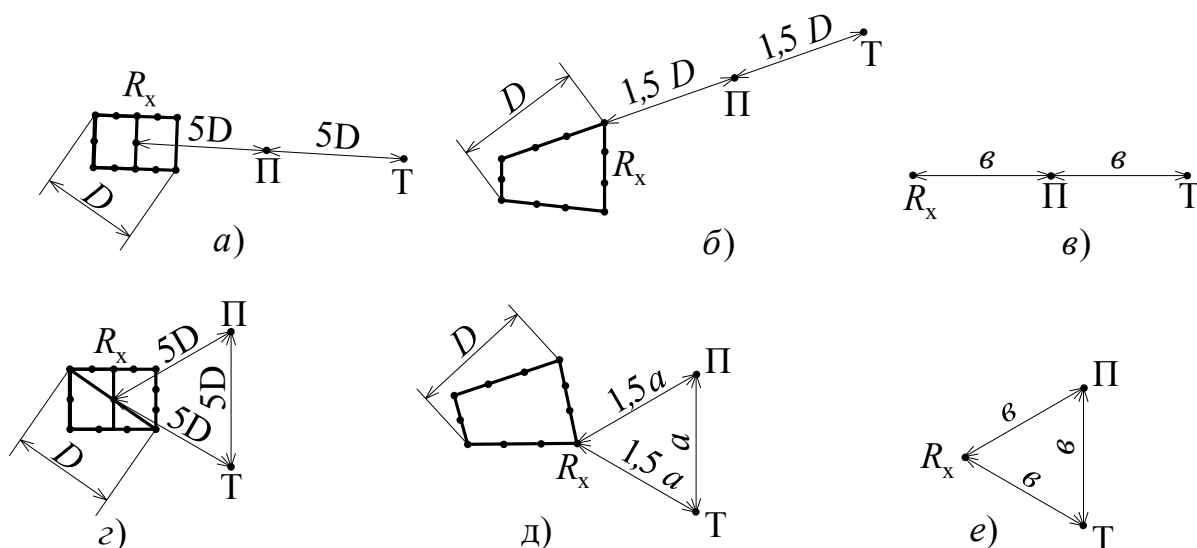
Измерения производят за пределами расположения заземлителя в месте, где нет протяженных металлических коммуникаций. Амперметр и вольтметр присоединяют к испытуемому заземлителю отдельно, причем с целью уменьшения падения напряжения в проводах вольтметр присоединяют непосредственно у места ввода тока в заземлитель (точка К на схеме [рис. 63](#)). Для снижения погрешности, вносимой вольтметром, его сопротивление должно быть не менее чем в 50 раз превышать сопротивления потенциального электрода П.

Глубина погружения вспомогательных электродов потенциальных П и токовых Т должна быть не менее 0,5 м. Количество стержней в одном вспомогательном электроде зависит от требуемого сопротивления поверхностного слоя земли. Потенциальный электрод располагается в зоне нулевого потенциала.

Для точных измерений используют схемы размещения электродов, показанные на [рис. 64](#), из них особо точные схемы [рис. 64, а и г](#). В качестве размеров  $D$  следует принимать: для сложных заземлителей, состоящих из сетки или контура с вертикальными электродами – длину большей диагонали (большой размер плоскости); для заземлителей из горизонтальной полосы с вертикальными электродами или без – длину полосы. Размеры на [рис. 64](#) выбирают, исходя из следующих соотношений:

$$D > 40 \text{ м}; a \geq D; 40 \text{ м} \geq D > 10 \text{ м}; a \geq 40 \text{ м};$$

$$D \leq 10 \text{ м}; a \approx 20 \text{ м}; D > 6 \text{ м}; b > 3D.$$



**Рис. 64.** Взаимное расположение заземлителя  $R_x$  и вспомогательных электродов П и Т: а, б, в – однолучевой схемы измерения;

г, д, е – двухлучевые схемы

При измерении сопротивления заземления электроустановки точка К (см. рис. 63) является точкой соединения заземляющего проводника в электроустановке. Сопротивление заземляющих проводников измеряют также методом амперметра-вольтметра по известным схемам или специальным измерительным прибором, например, М-416, руководствуясь его инструкцией.

Существует эффективный и простой метод измерения сопротивления электроустановок, предложенный В.И. Корольковой. Его достоинства заключаются в том, что не требуется полигон для размещения вспомогательных электродов. Это метод называют методом трех измерений (см. рис. 65).

В качестве источника питания используется автотрансформатор АТ, обычно ЛАТР-1 или РНО-220 и разделительный трансформатор с вторичным напряжением  $24 \div 36$  В.

Попарно измеряют сумму двух сопротивлений, соединенных последовательно. Измеряется сопротивление двух последовательно соединенных сопротивлений  $R_3$  и  $R_{\Pi}$ . Их сумма определится:

$$R_A = \frac{U_1}{I_1} = R_3 + R_{\Pi}.$$

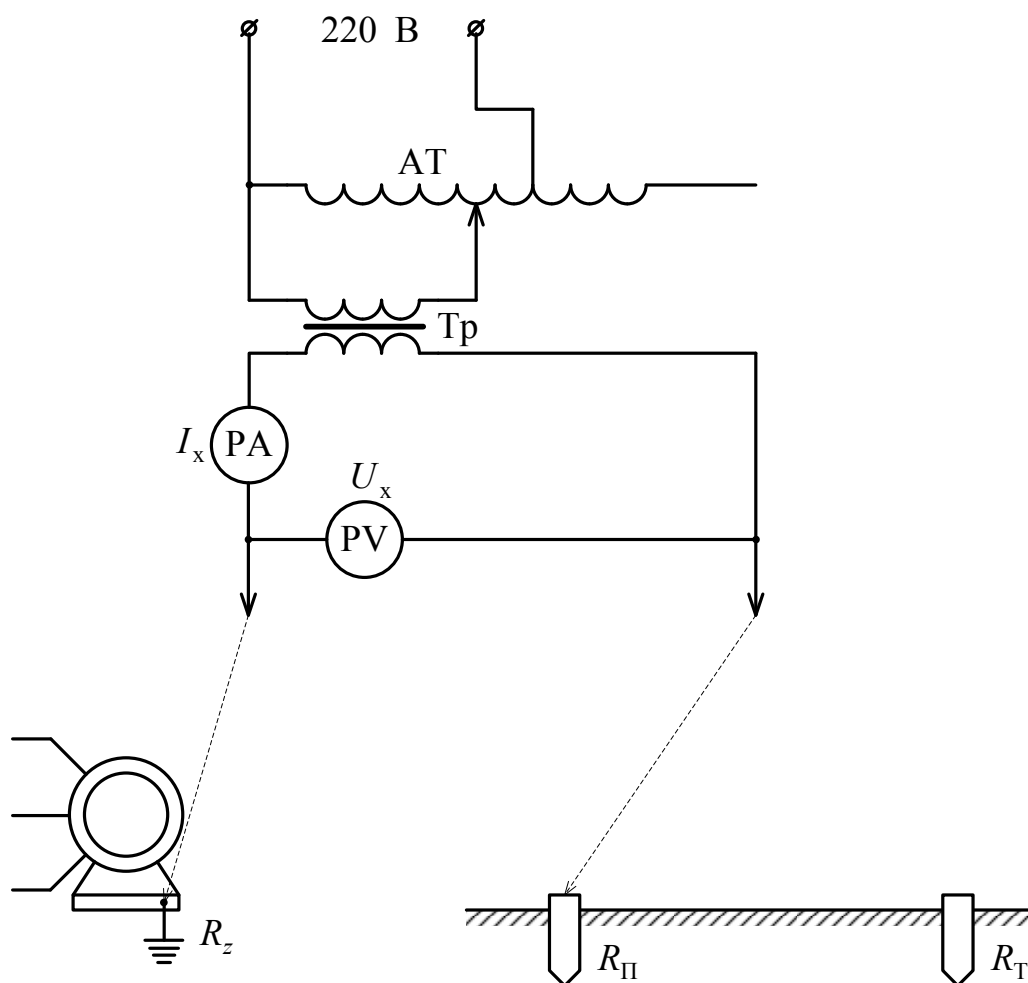


Рис. 65. Измерение сопротивления заземления методом трех измерений по В.И. Корольковой

Аналогично измеряют суммарное сопротивление двух других пар:

$$R_B = \frac{U_2}{I_2} = R_3 + R_T,$$

$$R_C = \frac{U_3}{I_3} = R_{II} + R_T.$$

Таким образом, получена система трех уравнений с тремя неизвестными  $R_3$ ,  $R_{II}$ ,  $R_T$

$$R_A = R_3 + R_{II},$$

$$R_B = R_3 + R_T,$$

$$R_C = R_{II} + R_T.$$

Решая эту систему уравнений относительно  $R_3$ , получим

$$R_3 = \frac{R_A + R_B - R_C}{2}.$$

где  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  – будут известны по результатам измерений.

Ток в измерительной цепи не должен быть более 20 А, в противном случае происходит подсыхание слоя грунта, прилегающего к поверхности электродов, и результаты измерений будут искажены. Класс точности амперметра и вольтметра не должен быть больше 1,5, а трансформатора тока не более 1,0.

Измерение сопротивления заземляющих проводников производится также методом амперметра-вольтметра или измерителями сопротивлений.

## 12. ОТКЛОНЕНИЕ 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 [20], [21].

*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:

$$\pm \delta_U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%,$$

где  $U$  – напряжение в данной точке сети, В;

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение сети, В.

*Колебания 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:

$$\pm \delta_{U'} = \frac{U_1 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%,$$

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 пропорционален квадрату напряжения на его зажимах:

$$M_{\phi} : M_{\text{ном}} = U_{\phi}^2 : U_{\text{ном}}^2,$$

где  $M_{\phi}$  и  $U_{\phi}$  – 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

$$M_{\phi} = M_{\text{ном}} \left( \frac{0,8U_{\phi}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 = 0,64M_{\text{ном}},$$

т.е.  $M_{\phi}$  уменьшится на 36 %.

Так же 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 сельской местности  $\pm 7,5$  %.

В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 %.

Основными причинами отклонений напряжений в системах электро-снабжения предприятия 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 электро-

приемников в абсолютных величинах оцениваются по минимально допустимым напряжениям для электроприемников и вторичным напряжениям силовых трансформаторов.

При номинальных напряжениях электроприемников  $U_{\text{ном}} = 127, 220, 380, 660, 1140$  В номинальные вторичные напряжения силовых трансформаторов, в предположении 5 % потерь напряжения в трансформаторе, имеют значения:

$$U_{\text{тр.ном}} - 0,05U_{\text{ном}} = U_{\text{ном}},$$

т.е.

$$U_{\text{ном}} = 0,95 U_{\text{тр.ном}},$$

тогда

$$U_{\text{тр.ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{0,95},$$

значения которых приведены в табл. 19.

Таблица 19

Допустимые отклонения напряжений

$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	127	220	380	660	1140
$U_{\text{тр.ном}}, \text{ В}$	133	231	400	695	1200
$U_{\text{min дв}}, \text{ В}$	121	209	361	627	1083
$\Delta U_{\text{доп}}, \text{ В}$	12	22	39	68	117
$U'_{\text{тр}}, \text{ В}$	140	243	420	725	1260
$\Delta U'_{\text{доп}}, \text{ В}$	19	34	59	93	177

Следует иметь в виду, что при использовании минусовых отпаек первичной обмотки силового трансформатора напряжения 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.



### 13. 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, электрофицированных машин, металлоконструкций с электрическими аппаратами и т.д. Эксплуатация такого режима нейтрали электросетей регламентирована ПУЭ, а также рекомендациями Электротехнической Комиссии – ГОСТ Р 50571.2 – 94 (система заземления TN-C, TN-C-S и TN-S, см. рис. 43 – 45).

Трехфазные четырехпроводные сети с изолированной нейтралью без зануления (см. рис. 24 и 48) регламентируются лишь для передвижных установок, питающихся от передвижных автономных источников (ПУЭ).

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 последствия однофазных к.з. требуется быстрое отключение участка с к.з., для чего необходимо обеспечить требуемую ПУЭ 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 преимущества 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 с 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 ПУЭ регламентирует 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 (ПУЭ).

В настоящей главе изложены обоснования возможности применения четырехпроводной трехфазной системы с изолированной нейтралью без зануления, но с заземлением корпусов, которая (см. рис. 24, 48, 66) существенно отличается от запрещаемой ПУЭ системы с изолированной нейтралью с занулением корпусов электрооборудования.

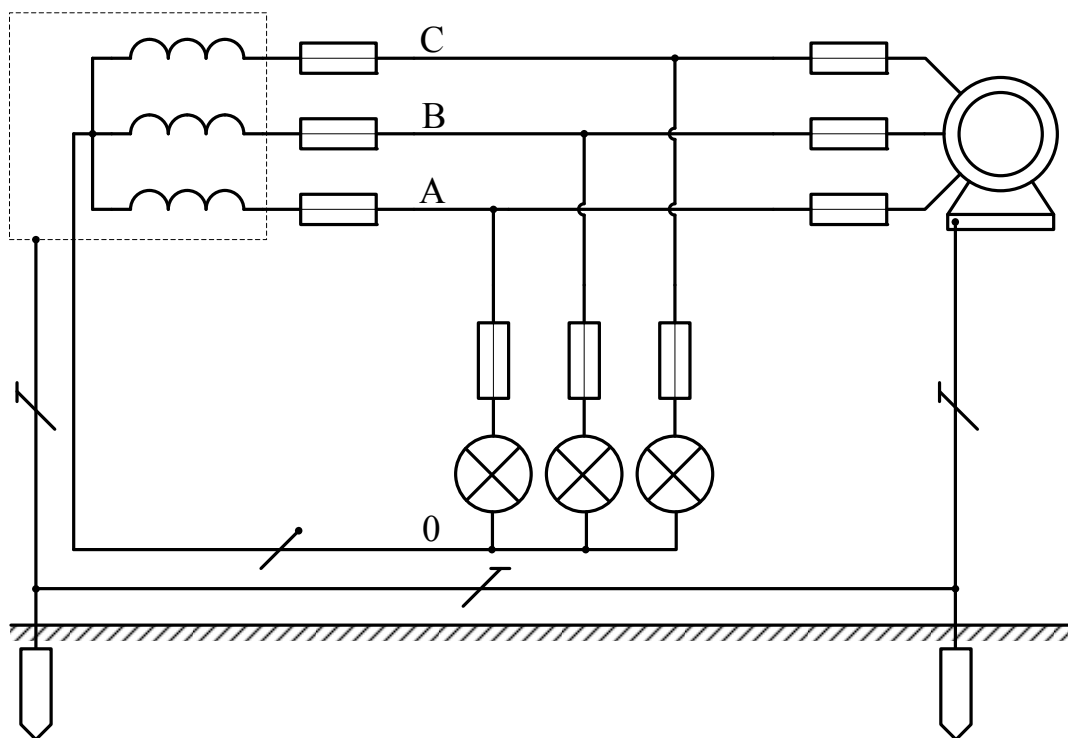


Рис. 66. Трехфазная четырехпроводная сеть с изолированной нейтралью без зануления

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 не даны 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 в основе анализа эксплуатации существ-

вующих 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 прикасаться к корпусу поврежденного оборудования. Поэтому ПУЭ предписывает 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. 66) 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 – 35 кВ, где не прокладывается четвертый провод для заземления. При необходимости питания удаленных однофазных потребителей экономически целесообразней и безопасней разделить сети установив соответствующей мощности понижающий трансформатор. В этом преимущество 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 (см. рис. 67). Такое положение, естественно, недопустимо. В этих случаях снизить опасное напряжение на корпусах позволяет глухое заземление нейтрали, что и предписывает ПУЭ. Исходя из требований ПУЭ, следует вывод:

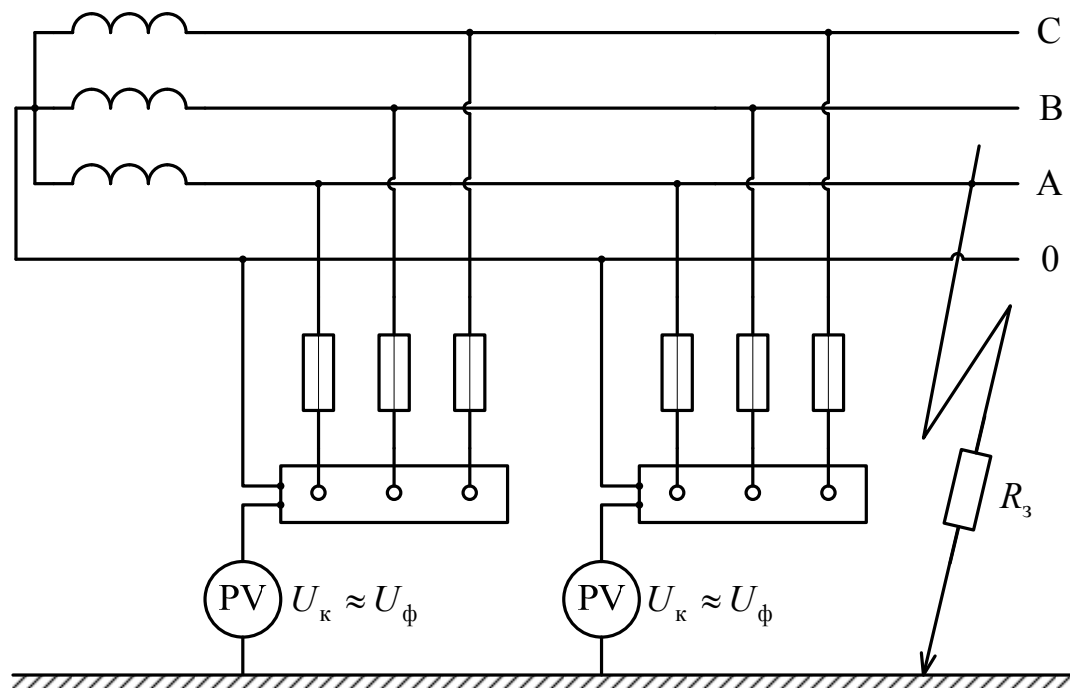


Рис. 67. Замыкание фазы на землю в сети с занулением без заземления нейтрали

Четырехпроводная трехфазная сеть с нулевым защитным проводни-

ком 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 четырехпроводной трехфазной 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.

Во-первых, вероятность прикосновения к токоведущей части во много раз меньше, чем к корпусу оборудования.

Во-вторых, напряжения прикосновения 220 В в сети глухозаземленной нейтралью с точки зрения опасности воздействия на организм человека практически равноценны – в том и другом случае напряжение смертельно опасное. 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 это время как в четырехпроводной 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  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  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. Время контакта персонала с корпусом может достигать времени всей рабочей смены. 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  $I_{\text{кз}}^{(1)}$  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  $I_{\text{кз}}^{(1)}$ , 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 несимметрии 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 незначительно. 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 – 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 разрушению.

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 происходят в преобладающем большинстве случаев (около 70 % из общего числа случаев), чем механические. 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 расходуется 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 острейшим дефицитом. В 50 – 60 % случаев 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 автоматического повторного включения (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 маслonaполненного 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 маслonaполненного 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, питаемых от сети с глухозаземленной нейтралью. В соответствии с ПУЭ 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 предписывает заземление вторичной обмотки и зануление (заземление) корпуса сварочного трансформатора (см. рис. 68), 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.). 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 присоединения 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 ввариваемой детали посторонним металлическим предметом и т.п. Тщательный контакт не создается в случаях частой смены места сварки.

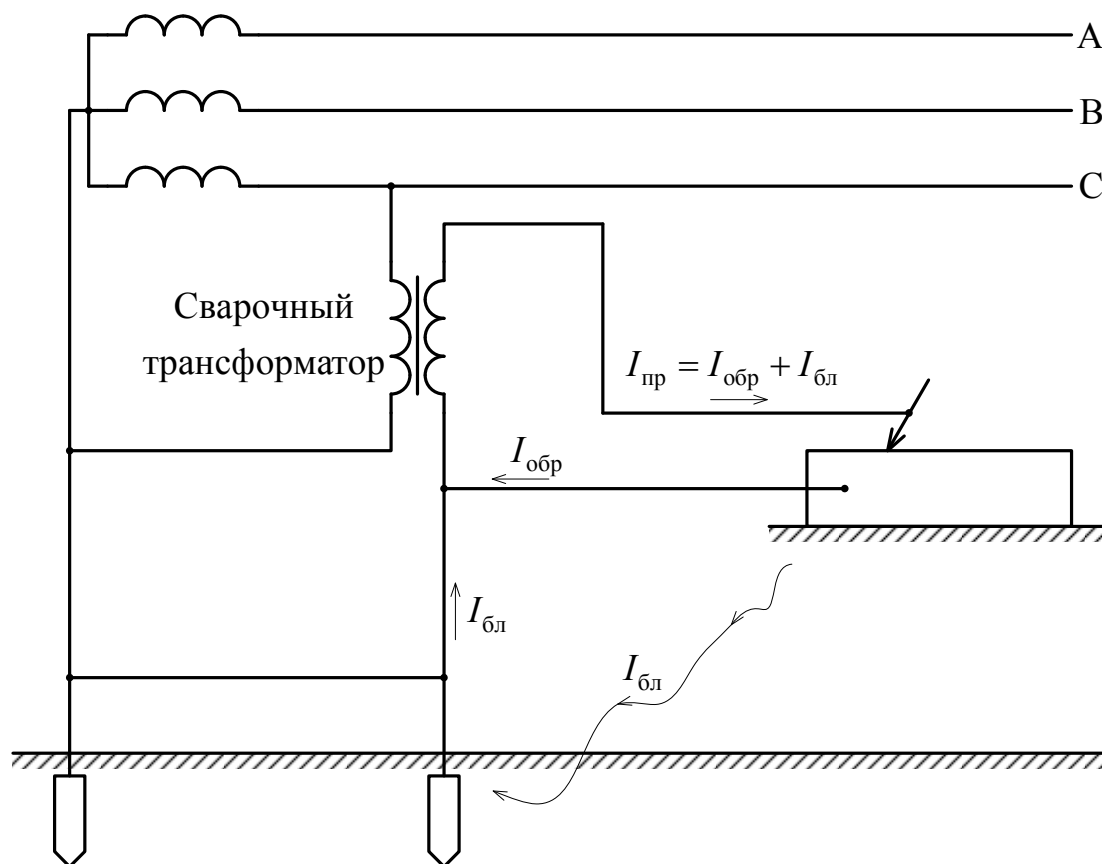


Рис. 68. Блуждающий ток при сварке

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 заземления 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 числа 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  $K_{\text{эфф}} = 1,4 \div 1,73$ .

Разумеется, для этого требуется пересмотр ряда статей ПУЭ.

## 14. ЧЕЛОВЕК КАК ЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДОПУСТИМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В настоящей главе не ставится задача оценки допустимых для человека электрических воздействий и определения нормируемых параметров человека как элемента электрической цепи. Оценка допустимых значений токов и напряжений для человека, которые могли бы быть законодательно закреплены, является задачей сложной и многоплановой, поэтому приведенные ниже результаты обширных исследований носят лишь рекомендательный характер.

Данные по допустимым уровням токов и напряжений для человека необходимы при расчетах заземляющих устройств, сопротивлений изоляции электросетей, выбора уставок срабатывания при эксплуатации и конструировании устройств контроля изоляции, реле утечки, УЗО, расследовании электротравм и т.п.

### 14.1. РАЗДРАЖАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

Непрерывное расширяющееся применение в народном хозяйстве электроустановок, работающих на токах различного рода и частоты, тесно связано с обеспечением безопасности труда при эксплуатации этих установок. Если по сравнительной опасности постоянного и переменного тока с частотой 50 Гц имеются не только качественные, но и количественные оценки, то по сравнительной опасности для человека переменных токов других частот нет пока единого мнения среди ученых.

Длительное время существовало мнение, что даже при незначительном увеличении частоты тока уменьшается его поражающее действие. Немецкий физик В. Нернст даже установил зависимость опасности тока для человека от частоты. По его данным, опасность воздействия электрического тока находится в обратной зависимости от квадратного корня из частоты тока

$$L = \frac{A}{\sqrt{f}},$$

где  $A$  – амплитуда тока.

Существуют, однако, и другие точки зрения. Группа американских ученых, например, утверждает, что в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц заметных изменений опасности для людей не наблюдается. Многие исследователи считают, что опасность тока при увеличении частоты увеличивается. Причем исследователями выдвигаются предположения об изменении объема защитных мероприятий при переходе на частоту, отличающуюся от 50 Гц.

Подобных противоречивых высказываний можно привести очень много. Маловероятно, чтобы существующие разногласия по такому коренному вопросу электробезопасности были только следствием ошибок, допущенных при исследованиях. По-видимому, выводы, сделанные отдельными авторами, являются частными случаями решения проблемы сравнительной опасности и возможно справедливы при определенных условиях.

Рассмотрим оценки различия раздражающей способности электрических токов различного рода при их длительном воздействии (5 – 10 с) на человека и оценки закономерностей изменения сравнительной опасности таких токов от напряжения прикосновения. Ранее было установлено, что соотношение опасностей токов различных частот изменяется в зависимости от напряжения прикосновения. В области напряжений ниже предельного значения для данной частоты большую опасность представляет ток повышенной частоты, выше предельного значения становится более опасным ток с частотой 50 Гц. Предельным напряжением названо напряжение прикосновения, при превышении которого сопротивление тела человека остается практически неизменным.

В Иркутском государственном техническом университете по специальной методике эти исследования были продолжены. Цель их состояла: в установлении верхних пределов безопасных величин электрического тока различного вида для человека; в изучении закономерностей изменения токопроводящих свойств тела человека в зависимости от напряжения, частоты и рода тока; в изучении характера изменения величины тока,



протекающего через человеческое тело, от различных факторов; в исследовании предлагаемых различными авторами эквивалентных схем тела человека; в определении угла сдвига фаз между током и приложенным напряжением и установлении зависимостей его от напряжения прикосновения и частоты тока; в определении активной, реактивной и полной мощностей, развиваемых в цепи тела человека; в определении величины токов и напряжений на отдельных участках его тела, построении и изучении векторных диаграмм токов и напряжений; в выявлении физиологической активности токов различного вида и их сравнительной опасности.

Вскрыть причине непостоянства соотношений опасностей различных токов в зависимости от величины тока или напряжения прикосновения позволяют результаты изучения физиологической активности этих токов. При решении поставленной задачи к анализу были приняты токи, вызывающие “фиксированные реакции” организма человека – начальное и пороговое ощущение. В соответствии с этими реакциями организма токи названы начальными  $I'$  и пороговыми  $I''$ . Пороговый ток – это максимально переносимый ток, при котором человек еще самостоятельно может освободиться от воздействия тока, но не может этого сделать при незначительном его увеличении. *“Фиксированной” реакцией организма человека на электрическое раздражение названа равноопасная в жизненном отношении для всех людей, четко оцениваемая испытуемым ответная реакция, являющаяся объективным явлением для организма данного человека.* Например, начальная реакция равноопасна и характерна для всех людей, причем эта реакция не зависит от воли человека, т.е. хочет или не хочет того испытуемый, он начинает ощущать раздражающее действие электрического тока. Результаты экспериментальных исследований позволяют качественно и количественно оценить раздражающую способность исследованных видов тока (см. табл. 20).

Из таблицы видно, что величины токов, вызывающих одну и ту же реакцию организма, не равны при различных родах и частотах тока. Например, одно и ту же реакцию – начало ощущения – при частоте 400 Гц вызывает больший ток (2,6 мА), чем при частоте 50 Гц (1,6 мА). Очевидно, что ток с частотой 50 Гц является физиологически активнее тока 400 Гц,

Таблица 20

Наиболее вероятные ( $p=0,95$ ) измеренные начальные и пороговые токи человека для пути тока: рука – рука

Род тока	Частота тока	“Фиксированная реакция”				Относительное приращение физиологической активности тока $\Delta_*$ , %
		начальная		пороговая		
		измерен- ный ток $I'$ , мА	относи- тель- ный ток $I'_*$	измерен- ный ток $I'''$ , мА	относи- тель- ный ток $I'''_*$	
1	2	3	4	5	6	7
переменный	50	1,6	1,0	8,2	1,0	0
	200	1,5	0,94	7,3	0,89	5,3
	400	2,0	1,25	8,6	1,05	16,0
	600	2,4	1,53	8,8	1,07	30,0
	800	2,8	1,75	9,3	1,13	35,4
	1400	5,1	3,18	17,6	2,14	32,7
	2200	5,9	3,69	21,6	2,64	28,5
	3000	6,6	4,12	26,5	3,24	21,4
	6000	7,3	4,56	31,7	3,86	15,3
	9000	9,6	6,0	45,0	5,50	8,4
постоянный	-	9,6	6,0	29,0	3,54	41,0
выпрямлен- ный пульси- рующий*	-	1,9	1,21	9,1	1,11	8,2

так как при той же самой величине он вызывает более интенсивную ответную реакцию. Данные таблицы, кроме того, показывают, что из всех исследованных видов тока наибольшей физиологической активностью обладает

---

\* К исследованию принят выпрямленный пульсирующий ток с коэффициентом пульсации  $\beta = 0,663$

ток с частотой 200 Гц. С ростом частоты тока от 200 до 9000 Гц его физиологическая активность уменьшается, физиологическая активность тока 50 Гц несколько ниже активности тока частотой 200 Гц.

Более наглядно существование различия в изменении физиологической активности с ростом тока можно проследить по относительным токам. Относительный ток представляет собой отношение величины тока при данной частоте к току базисной частоты, вызывающему ту же самую реакцию организма человека. За базисную частоту принята наиболее распространенная в практике частота тока 50 Гц. Относительные начальные  $I'_*$  и пороговые  $I''_*$  токи приведены в графах 4 и 6 табл. 20, а на рис. 69 и 70 отложены соответственно по вертикальным осям А и Б.

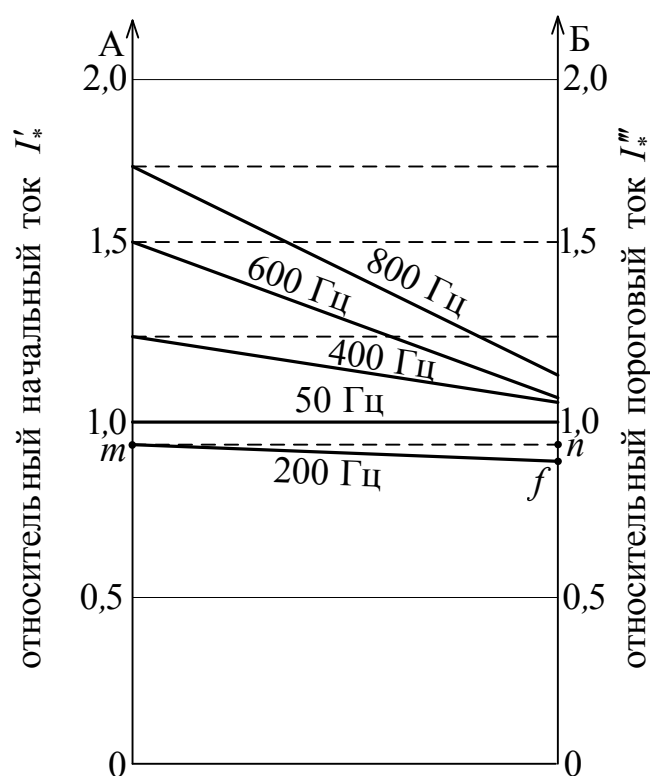


Рис. 69. Составление относительных начальных и пороговых значений силы тока для человека (в диапазоне частот от 50 до 800 Гц)

Следует заметить, что относительные пороговые токи при всех исследованных частотах по величине меньше относительных начальных токов. Это говорит о том, что физиологическая активность тока с его ростом изменяется, причем это изменение при различных родах и частотах происходит с различной скоростью. Действительно, если бы физиологи-

ческая активность с ростом тока, например, при частоте 200 Гц изменялась так же, как и активность при 50 Гц, то изменение относительного тока при 200 Гц происходило бы по линии, соединяющей точки *m* и *n*. На самом же деле, эта линия соединяет точки *m* и *f*. Различия в изменении физиологической активности тока с частотой 200 Гц по сравнению с током 50 Гц в данном случае характеризуется отрезком *nf* – относительное приращение физиологической активности, которое определится из выражения:

$$\Delta_* = \frac{I'_{*200} - I'''_{*200}}{I'_{*200}} 100 = \frac{0,91 - 0,89}{0,94} 100 = 5,3 \, \%.$$

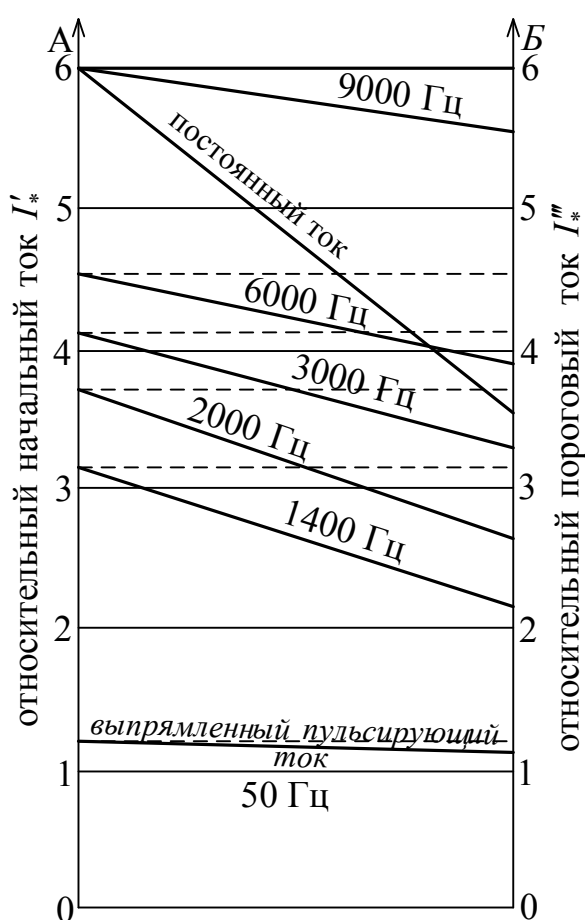


Рис. 70. Составление относительных начальных и пороговых значений силы тока для человека (токи – постоянный; выпрямленный пульсирующий; переменный в диапазоне частот от 50 до 9000 Гц)

Следовательно, с ростом тока от начального до порогового значения физиологическая активность тока с частотой 200 Гц изменяется на 5,3 % больше, чем физиологическая активность тока с частотой 50 Гц. Наибольшее приращение физиологической активности наблюдается при постоян-

ном токе 41 %.

Поскольку с ростом величины тока, воздействующего на человека, физиологическая активность его при различных родах и частотах изменяется неодинаково, оценка сравнительной опасности любых видов тока зависит от того, при каких величинах тока производится это сравнение. “Фиксированная” реакция организма на электрическое раздражение – это мгновенное явление в процессе изменения тока или причины, его вызывающей, – напряжения прикосновения. Поэтому какие-либо оценки, характеризующие сравнительную опасность токов различного рода и частоты, полученные при “фиксированных” реакциях, справедливы только для величин токов и напряжений, вызывающих эти реакции организма. Непрерывно изменяющаяся раздражающая способность токов различного вида свидетельствует о неправомерности распространения этих оценок на любые другие величины токов и напряжений. Оценка сравнительной опасности двух любых видов электрического тока без указания величин токов, протекающих через человека, или напряжений прикосновения в конечном итоге теряет смысл. Заметим, что под сравнительной опасностью мы понимаем различия в нарушении функциональной деятельности, различия в химических и биологических превращениях, которые производят токи различного вида в организме человека.

Для количественной оценки сравнительной опасности токов различного рода и частоты за условную единицу опасности принимается опасность при начальном ощущении тока человеком. Опасность при заданной величине напряжения прикосновения для заданного вида тока выражалась в условных единицах опасности с учетом различия физиологической активности токов. Численное значение сравнительной опасности двух данных видов тока при заданных напряжениях определялась отношением опасностей, выраженных в условных единицах. С учетом этого были построены кривые сравнительной опасности (см. рис. 71) по наиболее вероятным значениям параметров человека при площади контакта с электродами, соответствующей наиболее неблагоприятному случаю прикосновения – полный обхват токоведущей части рукой –  $80\text{ см}^2$ , путь тока: рука – рука. Ординаты кривых показывают, во сколько раз воздействия данного вида

тока при данном напряжении прикосновения опаснее тока с частотой 50 Гц. Например, при напряжении 36 В ток с частотой 200 Гц опаснее тока 50 Гц в  $O_{\text{ср}} = 1,65$  раза, а при напряжении 150 В и выше – в 1,1 раза. Выявленные кривые позволяют установить сравнительную опасность любых двух исследованных видов тока при заданном напряжении прикосновения. Например, чтобы определить, во сколько раз при напряжении 220 В выпрямленный пульсирующий ток (коэффициент пульсации  $\beta = 0,663$ ) опаснее постоянного тока, находим соответственно величины  $O_{\text{ср}}^{\text{пульс}} = 0,82$  и  $O_{\text{ср}}^{\text{пост}} = 0,21$ . Отношение этих величин показывает, что выпрямленный пульсирующий ток при напряжении 220 В опаснее постоянного тока в 3,9 раза.

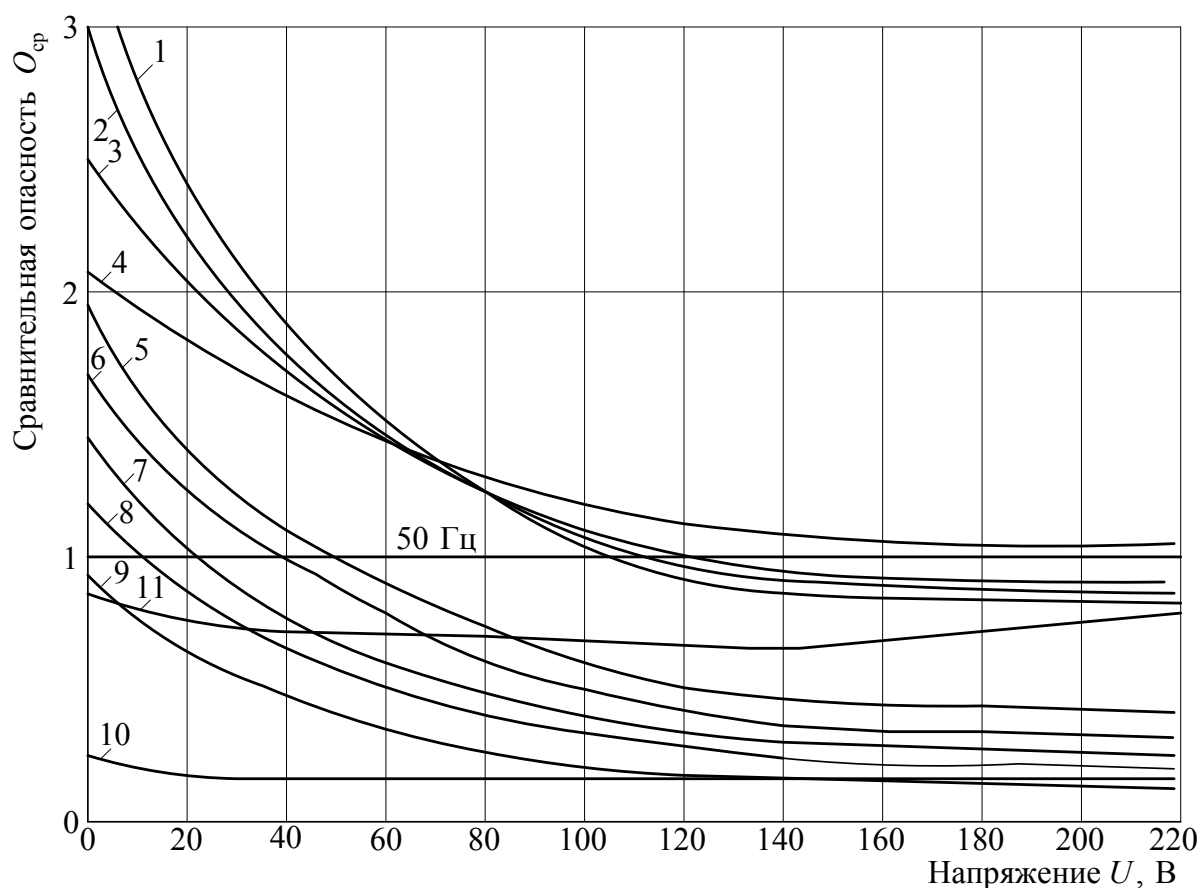


Рис. 71. Изменение сравнительной опасности электрических токов различного рода и частоты для человека в зависимости от напряжения прикосновения: 1 – 800 Гц; 2 – 600 Гц; 3 – 400 Гц; 4 – 200 Гц; 5 – 1400 Гц; 6 – 2200 Гц; 7 – 3000 Гц; 8 – 6000 Гц; 9 – 9000 Гц; 10 – постоянный ток; 11 – выпрямленный пульсирующий ток

Проведенные исследования позволяют утверждать следующее:

- с ростом величины тока, воздействующего на человека, физиологическая активность его при различных родах и частотах изменяется с различной скоростью;
- оценка сравнительной опасности токов различного вида обусловлена целым комплексом электрических параметров человека и их зависимостями от различных факторов;
- без указания величин токов или напряжений прикосновения оценка сравнительной опасности теряет смысл;
- с ростом напряжения прикосновения соотношение опасностей токов различного вида изменяется;
- наиболее опасным для человека при напряжениях до 73 В является ток с частотой 800 Гц, а при напряжениях выше 73 В – ток с частотой 200 Гц;
- жесткость требований правил безопасности при частоте тока 50 Гц и выпрямленном пульсирующем токе ( $\beta = 0,663$ ) должна быть одинаковой.

Таково представление о раздражающей способности и сравнительной опасности токов различного вида для человека на современном уровне исследований.

#### 14.2. НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ И РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

В результате исследований (636 человек испытуемых, более 2800 опытов) при длительности воздействия тока на человека 3 – 5 с по пути “рука-рука” (верхняя петля) получены различные данные, характеризующие тело человека как элемента электрической цепи. Вместе с тем, человек – это живой организм, и величины токов и напряжений для него оцениваются по его реакции на электрическое раздражение.

Электрическое сопротивление человека является одним из основных

параметров, характеризующих защитоспособные свойства организма.

Полученные экспериментальные зависимости сопротивления тела человека от напряжения, соответствующего наиболее вероятному и неблагоприятному случаю прикосновения – полный обхват токоведущей части ладонью руки [площадь контакта около  $80 \text{ см}^2$  по пути рука-рука при различных видах тока (см. рис. 72)] показывают, что с ростом напряжения полное сопротивление тела человека уменьшается, причем, это уменьшение происходит более интенсивно при низких испытательных напряжениях. По кривым видно, что с ростом частоты тока, так и с ростом напряжения сопротивление уменьшается до одной и той же величины. При этом установлено, что колебания сопротивления людей уменьшается, а при высоких частотах и напряжениях сопротивление примерно у всех одинаково, т.е. можно считать, что фактор физиологических и биологических различий людей сводится на нет, что позволяет распространить экспериментальные данные о сопротивлении тела человека на более высокие уровни напряжений.

Исследования показали, что сопротивление уменьшается с ростом частоты тока в диапазоне от 50 до 6000 Гц, а в диапазоне от 6000 до 9000 Гц остается примерно одинаковым. Однако, такая закономерность не сохраняется при частотах от 9000 до 15000 Гц, здесь сопротивление увеличивается. Это явление можно объяснить тем, что при частотах свыше 9000 Гц заметно вступает в силу поверхностный эффект, в результате чего наблюдается рост сопротивления, хотя и незначительный. При этих частотах эффект вытеснения тока обнаруживается и тепловым действием. Возможно, что значительное вытеснение тока имеет место и при более низких частотах, но это не отражается на величине полного сопротивления, так как в этом случае действует другая более существенная причина, а именно: сопротивление уменьшается с ростом частоты тока от 50 до 6000 Гц за счет изменения сопротивления емкостной составляющей.

Таким образом, защитоспособные свойства человеческого организма с ростом напряжения ослабевают, и электрическое сопротивление людей становится примерно одинаковым и при достаточно высоких напряжениях и токах, которые опасны для здоровья и жизни человека. Защитные же



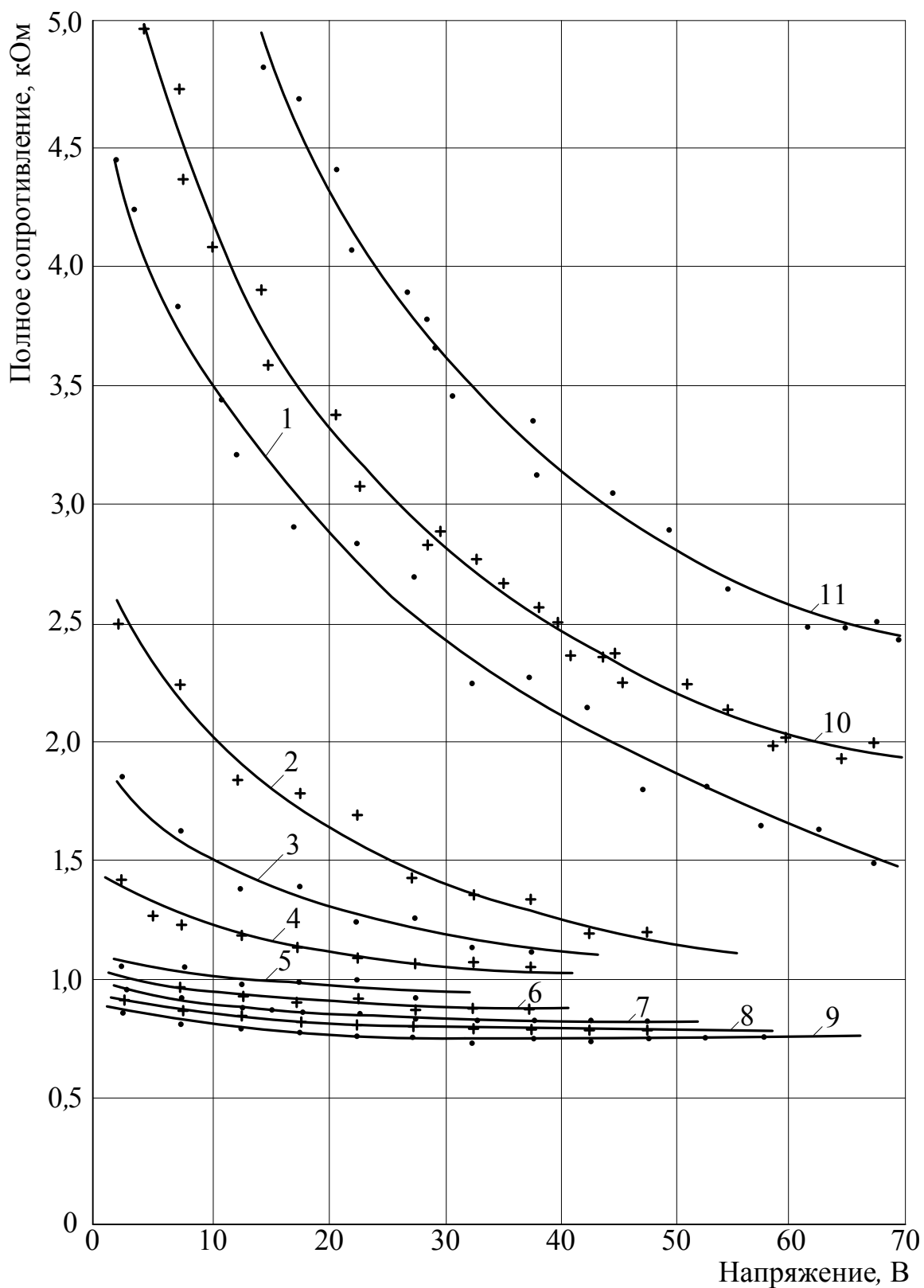


Рис. 72. Зависимость сопротивления тела человека от напряжения прикосновения: 1 – 50 Гц; 2 – 200 Гц; 3 – 400 Гц; 4 – 600 Гц; 5 – 800 Гц; 6 – 1400 Гц; 7 – 2200 Гц; 8 – 3 и 15 кГц; 9 – 6 и 9 кГц; 10 – выпрямленный пульсирующий ток; 11 – постоянный ток

мероприятия должны строиться, исходя из таких значений токов и напряжений, которые не вызывают *еще каких-либо опасных сдвигов в организме*.

Вместе с тем, следует иметь ввиду, что защитные меры безопасности строятся не только по величинам сопротивления тела человека, но и по допустимым токам и напряжениям.

Исход электротравмы определяется, с одной стороны, параметрами поражающего начала – электрического тока и напряжения, с другой стороны, – защитоспособные свойства организма человека.

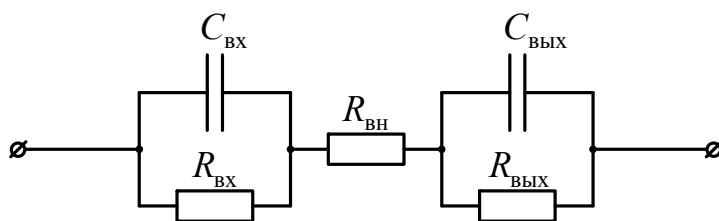
Тело человека при расчетах на электробезопасность в любых случаях принимается чисто активным элементом электрической цепи, в то время как практика эксплуатации настоятельно требует дифференциации составляющих полного сопротивления. Качественная сторона вопроса о том, что полное сопротивление тела человека состоит из активной и реактивной (емкостной) составляющих, отмечалась неоднократно. Однако пока не удалось выработать единой точки зрения в части их достоверных количественных значений.

Вместе с тем, большинство исследователей признают эквивалентную электрическую схему тела человека, представленную на [рис. 73](#). В этой схеме:

$R_{\text{ВХ}}$  и  $C_{\text{ВХ}}$  – активное сопротивление и емкость участка входа тока наружного слоя кожи;

$R_{\text{ВН}}$  – сопротивление внутренних органов тела человека;

$R_{\text{ВЫХ}}$  и  $C_{\text{ВЫХ}}$  – активное сопротивление и емкость участка выхода тока.



[Рис. 73.](#) Эквивалентная электрическая схеме тела человека

Эта схема достаточно приемлемо отражает многие явления, связанные с прохождением тока различного рода и частоты через человека. Однако, определить значения элементов этой схемы не удастся, поскольку они зависят от многих факторов (падения напряжения на коже отдельно на

участках входа и выхода тока, влажность кожи, температура поверхности тела, толщина эпидермиса – верхний роговой слой кожи, площадь электродов и сила нажатия на них, частота тока и т.д.).

Поэтому для практических расчетов может быть принята эквивалентная схема, представленная на рис. 74, где участки входа и выхода тока заменены эквивалентным участком  $ав$ , характеризующим сопротивление кожи человека.

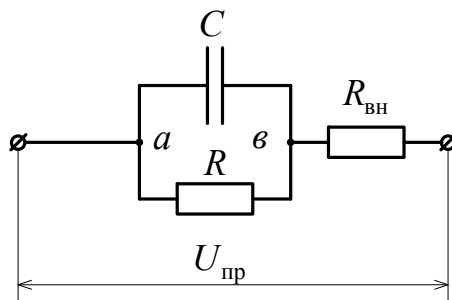


Рис. 74. Расчетная эквивалентная схема тела человека

В этой схеме:

$C$  – эквивалентная электрическая емкость кожного покрова участков входа и выхода тока;

$R$  – эквивалентное активное сопротивление кожи участков входа и выхода тока;

$R_{вн}$  – сопротивление внутренних органов тела человека.

Расчет величин элементов схемы (см. рис. 74) не представляет трудностей по измеренным величинам:

$U_{пр}$  – приложенное к телу напряжение (напряжение прикосновения);

$I$  – ток через человека;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между  $U_{пр}$  и  $I$ , определяется через активную и полную мощность, измеряемую милливаттметром.

Величина  $R_{вн}$  определяется при частоте тока 6000 Гц, где  $Z = R_{вн}$ , исследованиями установлено, что  $R_{вн} \approx 780 \text{ Ом}$ .

Полученные в результате исследований сведения об эквивалентной схеме тела человека позволяют выполнять инженерные расчеты на электробезопасность на научной основе.

В табл. 21 представлены наиболее вероятные (модальные) значения

начальных напряжений и токов при “фиксированной” реакции начального ощущения, а также соответствующие этим токам и напряжениям сопротивления и углы сдвига фаз  $\varphi$  при длительности воздействия 3 – 5 с.

Таблица 21

Параметры, наблюдаемые при реакции начального ощущения

Род тока	Частота тока, Гц	Напряжение, В	Ток, мА	Кажущееся сопротивление, кОм	Угол сдвига фаз, град
переменный	50	6,2	1,6	3,8	33
	200	3,6	1,5	2,3	53
	400	3,5	2,0	1,7	63
	600	3,3	2,4	1,3	74
	800	3,2	2,8	1,14	36
	1400	5,0	5,1	0,97	28
	2200	5,5	5,9	0,92	26
	3000	5,9	6,6	0,89	0
	6000	6,4	7,3	0,81	0
	9000	7,8	9,6	0,81	0
	15000	11,3	13,9	0,82	0
постоянный	–	33	9,6	3,44	–
пульсирующий ( $\beta = 0,663$ )	–	7,8	1,94	4,0	–

В табл. 22 приведены по результатам исследований наиболее вероятные (модальные) значения пороговых напряжений и токов, а также соответствующие им сопротивления и углы сдвига фаз между этими напряжениями и токами при длительности воздействия тока 3 – 5 с.

В результате выполнения экспериментальных исследований установлены верхние пределы допустимых напряжений и токов при длительном воздействии тока (3 – 5 с) на организм человека (см табл. 23), которые рекомендуется использовать в качестве нормативных при разработке и реализации мероприятий электробезопасности.

Таблица 22

Параметры, наблюдаемые при реакции порогового ощущения

Род тока	Частота тока, Гц	Напряжение, В	Ток, мА	Кажущееся сопротивление, кОм	Угол сдвига фаз, град
переменный	50	23,3	8,2	2,75	17,5
	200	13,6	7,3	1,90	32
	400	13,1	8,6	1,40	54
	600	10,7	8,8	1,22	68
	800	10,0	9,3	1,09	26
	1400	16,5	17,5	0,94	24
	2200	18,3	21,6	0,86	16
	3000	21,7	26,5	0,83	0
	6000	25,0	31,7	0,78	0
	9000	35,2	45,0	0,78	0
	15000	51,0	61,0	0,81	0
постоянный	—	70,0	29,0	2,45	—
пульсирующий ( $\beta = 0,663$ )	—	27,6	9,1	3,0	—

Таблица 23

Рекомендуемые допустимые параметры для человека при длительности воздействия 3 – 5 с.

Род тока	Частота тока, Гц	Напряжение, В	Ток, мА
1	2	3	4
Переменный	50	20	7
	200	12	6
	400	11	7
	600	10	8
	800	9	9
	1400	14	15
	2200	16	18

1	2	3	4
Переменный	3000	18	21
	6000	22	26
	9000	28	35
	15000	44	54
постоянный	—	62	21
Выпрямленный пульсирующий (коэффициент пульсации $\beta = 0,663$ )	—	22	7

Электрические параметры организма человека как объекта защиты должны оцениваться рядом характеристик и поясняющих данных. Оценка параметров без наличия поясняющих данных и указания сопутствующих факторов снижает практическую ценность рекомендаций по электробезопасности.

### 14.3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

При разработке мероприятий электробезопасности следует учесть особенности поражающего действия электрического тока и защитоспособные свойства человеческого организма, характеризующиеся величиной электрического сопротивления тела человека.

Считается, что основным “изолятором” человеческого тела является верхний роговой слой кожи – эпидермис. При электрическом “пробое” кожи с ростом напряжения прикосновения  $U_{пр}$  электрическое сопротивление тела человека  $Z_h$  уменьшается.

При расчете электрических сетей и отдельных электроустановок на безопасность необходимо знать предельное значение напряжения прикосновения, при достижении которого параметр  $Z_h$  будет сохранять примерно стабильное значение. При выполнении исследований была предпринята

попытка оценить предельные значения  $U_{\text{пред}}$  и параметр  $Z_h$ . Предельные значения  $U_{\text{пред}}$  при различных воздействиях тока приведены в табл. 24.

Таблица 24

Значения предельных напряжений  $U_{\text{пред}}$  для человека при различных видах воздействующего тока

Род тока	Частота тока, Гц	$U_{\text{пред}}$ , В	Род тока	Частота тока, Гц	$U_{\text{пред}}$ , В
переменный	50	150	переменный	2200	48
	200	132		3000	43
	400	114		6000	21
	600	101		9000	15
	800	91	постоянный	—	356
	1400	77	выпрямленный пульсирующий ( $\beta = 0,663$ )	—	257

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что доля падения напряжения на коже уменьшается и, в конечном итоге, стремится к нулю при увеличении напряжения прикосновения. Это явление свидетельствует о том, что сопротивление кожного покрова уменьшается и стремится к нулю в результате его разрушения. По рис. 72 видно, что с ростом частоты тока сопротивление тела уменьшается. Это объясняется тем, что наряду с разрушением эпидермиса, с ростом частоты емкостная проводимость кожного покрова возрастает, вследствие чего сопротивление его падает до нуля при более низких напряжениях. Отсюда следует, что и с увеличением площади контакта человека с токоведущими частями величина предельного напряжения будет уменьшаться при одной и той же частоте тока, поскольку с ростом площади контакта увеличивается емкостная проводимость.

Экспериментальное подтверждение результатов оценки предельных напряжений прикосновения для диапазона частот от 50 до 3000 Гц, естественно, не может быть достигнуто в процессе опытов на людях, эти значения имеют и превосходят опасные величины. Однако убедительным

является тот факт, что при частотах тока 6000 и 9000 Гц значения предельных напряжений, установленные по результатам анализа данных эксперимента, подтверждаются опытным путем при допустимых электрических воздействиях на организм человека. Так, при частоте 6000 Гц сопротивление остается примерно постоянным с ростом  $U_{пр}$  в интервале допустимых значений от 20 до 45 В, а при частоте 9000 Гц сопротивление не изменяется и остается равным сопротивлению внутренних органов 0,6 – 0,8 кОм в диапазоне исследованных напряжений от 15 до 52 В.

Таким образом:

- при напряжении прикосновения выше предельных кожный покров человека практически не оказывает сопротивление электрическому току, а сопротивление тела остается неизменным и равным сопротивлению внутренних органов;
- величина предельного напряжения зависит от частоты тока: с ростом частоты предельные напряжения уменьшаются. Величина  $U_{пред}$  зависит так же от площади контакта с токоведущими частями электроустановок: чем больше площадь контакта, тем ниже значение  $U_{пред}$ ;
- существуют две закономерные связи: между сопротивлением тела человека и напряжением прикосновения, а также между сопротивлением тела и частотой действующего тока. При увеличении частоты тока до нескольких тысяч герц и возрастании напряжения прикосновения сопротивление тела человека снижается в пределе до сопротивления внутренних органов.

Исследования действия электрического тока различного рода и частоты свидетельствуют о реальной возможности построения защитных средств и осуществления мероприятий электробезопасности в соответствии с естеством человека – с защитоспособными возможностями организма человека.

“Подгонка” нормирования допустимых значений токов и напряжений для человека под технические возможности защитных средств является



сдерживающим фактором научного поиска и совершенствования мероприятий безопасности и средств защиты, т.е. необоснованные нормирования основных критериев электробезопасности ведет к необоснованной задержке в развитии научной мысли по совершенствованию технических средств защиты.

Создать абсолютную гарантированную безопасность (100 %) человеческое общество в настоящее время не готово, для этого потребовалось бы мобилизовать непомерно большие средства. Поэтому на данном этапе, по нашему мнению, следует идти по пути исследования и обоснованного нормирования исходных критериев электробезопасности (как это имеет место в области здравоохранения, химии, экологии и т.д.) и по пути совершенствования технических средств защиты с параметрами, соответствующими естественным защитным характеристикам организма человека.

## 15. ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Для обеспечения безопасности состояния постоянно действующих электроустановок в условиях эксплуатации, очевидно, что должен осуществляться постоянный контроль параметров функционирования электрооборудования на промышленных предприятиях. Оценка параметров функционирования сводится к измерительным и контрольно-измерительным работам.

Правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации электроустановок, предупреждения аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, к локализации и ликвидации последствий указанных аварий определяются положениями федерального закона “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (№ 116 – ФЗ, от 21.07.1997 г.), нормативными документами по отраслям промышленности.

Эти положения распространяются на все организации независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, осуществляющие деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации. На основании этих положений разработаны “Правила проведения экспертизы промышленной безопасности. ПБ 03-246-98”. Применительно к электрооборудованию промышленных предприятий разработаны рекомендации, изложенные в “Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей”.

Задачи технического диагностирования электроустановок, как и технических установок промышленных предприятий, формулируются:

- определение уровня технического состояния электроустановки;
- оценка отклонения эксплуатационных параметров от заданных и расчетных, поиск места отказа или причины неисправности;

– прогнозирование технического состояния и оценка возможных перспективных отклонений от нормативных режимов функционирования электроустановки.

Показатели и характеристики технического диагностирования определяются в зависимости от вида и эксплуатационных параметров электроустановки (напряжения, тока, частоты вращения, режима нейтрали, уровня изоляции, заземления, зануления и т.п.). К характеристикам технического диагностирования относят номенклатуру параметров, позволяющих определить ее техническое состояние (определение уровня технического состояния электроустановки), глубину поиска места отказа или причин отклонения от заданных параметров (неисправностей), определяемые уровнем конструктивной сложности составных частей или перечнем элементов, с точностью до которых должно быть определено место отказа или неисправности. При диагностировании выбираются те параметры и характеристики для проверки и анализа, которые непосредственно и существенно характеризуют свойства электроустановки или ее узла.

Возможно наличие нескольких структурных параметров или характеристик. Приоритет отдается тем параметрам и характеристикам, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям определения истинного технического состояния данной электроустановки (узла) при заданных условиях эксплуатации.

Процесс диагностирования включает также разработку алгоритма диагностирования, подготовку программного обеспечения (разработку конкретных диагностических программ), разработку правил анализа и принятия решений по диагностической информации.

В состав диагностической информации входит:

- а) паспортные данные электроустановки;
- б) данные о техническом состоянии электроустановки в начальный момент эксплуатации;
- в) данные о текущем техническом состоянии с результатами измерений и обследований;
- г) данные с результатами расчетов, оценок, предварительных прогнозов и заключений;

д) обобщенные данные по электроустановке.

Диагностическая информация вводится в отраслевую базу данных (при наличии таковой) и в базу данных предприятия в соответствующем формате и структуре хранения информации. Методическое и практическое руководство осуществляет вышестоящая организация и специализированная организация.

В руководстве предприятию описывается последовательность и порядок анализа полученной диагностической информации, сравнения и сопоставления полученных после измерений и испытаний параметров и признаков; рекомендации и подходы при принятии решения по использованию диагностической информации.

Средства технического диагностирования должны обеспечивать определение (измерение) или контроль диагностических параметров в режимах работы электроустановки, установленных в эксплуатационной документации или принятых на данном предприятии в конкретных условиях эксплуатации.

Средства и аппаратура, применяемые для контроля диагностических параметров, должны позволять надежно определять измеряемые параметры. Надзоры над средствами технического диагностирования должны вести метрологические службы соответствующих уровней функционирования системы технического диагностирования и осуществлять его согласно положению о метрологической службе.

Перечень средств, приборов и аппаратов, необходимых для технического диагностирования, устанавливается в соответствии с типом диагностируемой электроустановки.

Работы по техническому диагностированию осуществляются в соответствии с [ПУЭ](#), ГОСТ, ОСТ.

По результатам экспертной диагностики предприятию (организации) выдаются сведения по обследованию электроустановки, измерениям, испытаниям, анализу и сопоставлению полученных данных с предыдущими данными, параметров в процессе эксплуатации электроустановки. В заключении даются указания и рекомендации по проведению профилактических мероприятий, ремонтно-восстановительных работ и дальнейших

условий эксплуатации электроустановок.

## 16. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Целью выполнения контрольного задания является приобретение навыков у студентов по расчету токов утечки в трехфазных электросетях.

Контрольное задание состоит из двух частей:

- а) рассчитать значения токов утечки  $I_y$  при прикосновении человека к одной из фаз в трехфазной четырехпроводной сети с изолированной нейтралью с системой заземления IT (см. рис. 48) для двух значений сопротивления утечки  $R_{y1} = 1 \text{ кОм}$  и  $R_{y2} = 3 \text{ кОм}$  при изменении одного из параметров изоляции фаз сети или нулевого провода по отношению к земле; расчет выполнить по схеме прикосновения человека к фазе (см. рис. 75);

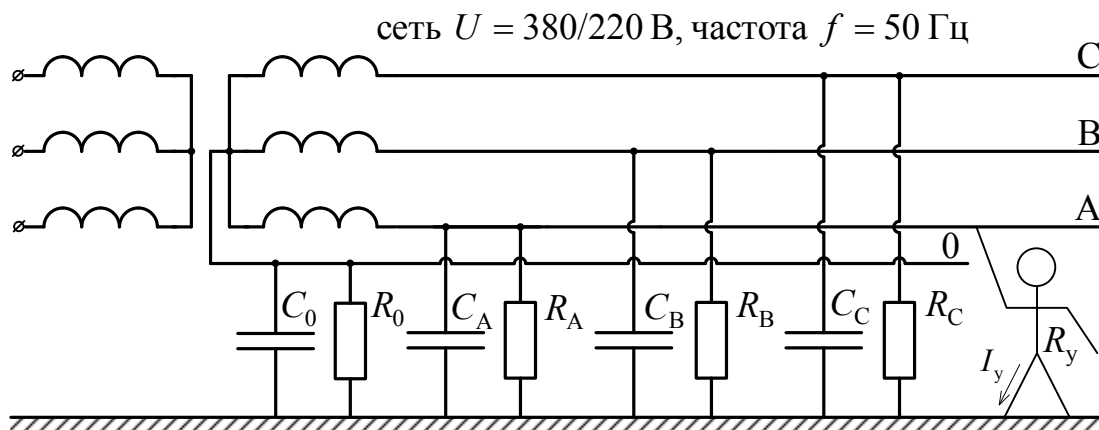


Рис. 75. Прикосновение человека к фазе

- б) рассчитать значения токов утечки  $I_y$  при прикосновении человека к нулевому проводу в той же сети (см. рис. 48) для двух значений сопротивления утечки  $R_{y1} = 1 \text{ кОм}$  и  $R_{y2} = 3 \text{ кОм}$  при изменении одного из параметров изоляции фаз сети или нулевого провода; расчет выполнить по схеме прикосновения человека к нулевому проводу (см. рис. 76).

По результатам расчетов построить график зависимости тока утечки от изменяющегося параметра изоляции фаз сети или нулевого провода по отношению к земле для двух значений сопротивления утечки. Графики построить отдельные:

- 1-й график – утечка тока с фазы А (две кривые – при  $R_{y1} = 1 \text{ кОм}$  и при  $R_{y2} = 3 \text{ кОм}$ );

2-й график – утечка с нулевого провода (две кривые – при  $R_{y1} = 1$  кОм и при  $R_{y2} = 3$  кОм).

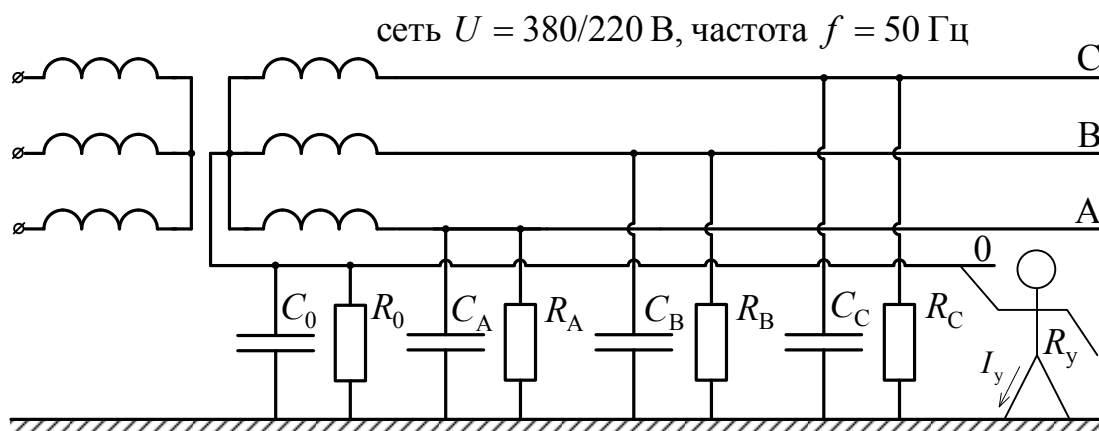


Рис. 76. Прикосновение человека к нулевому проводу

Данные для расчетов по вариантам задания приведены в табл. 25.

В табл. 25 изменяющийся параметр обозначен диапазоном изменения, например, в четвертом варианте параметр  $R_A$  изменяется в пределах от 1 до 10 кОм.

При расчетах можно воспользоваться числовым примером определения тока утечки при прикосновении человека к фазе сети приведенным в разделе 6.

Таблица 25

Параметры изоляции сети

№ варианта	$C_A$ , мкФ	$C_B$ , мкФ	$C_C$ , мкФ	$R_A$ , кОм	$R_B$ , кОм	$R_C$ , кОм	$C_0$ , мкФ	$R_0$ , кОм	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	4	4	5	3	3	1-4	1	
2	6	2	2	1	3	3	1	1-4	
3	2	2	2	5	5	5	1-6	2	
4	0,5	0,5	0,5	1-10	4	4	2	4	
5	1	0,2	0,2	4	8	8	1-3	2	
6	0,5	2,5	2,5	4	6	6	1	1-8	
7	0,5	0	0,5	4	$\infty$	4	1	2-8	обрыв фазы В

Продолжение табл. 25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	0,5	0	2,5	4	$\infty$	8	1	1–8	обрыв фазы В
9	2	2	0,25–2	6	6	6	1	3	
10	0,25	0,25	0	1–6	6	$\infty$	0,5	2	обрыв фазы С
11	2	2	2	4	4	4	0,5	1–6	
12	1	1	1	0,5–3	8	6	3	2	
13	0,25	0,25	0,1–3	6	6	6	0,5	2	
14	0,25–2	1	1	6	6	6	0,8	3	
15	0,5	0,5	0,5	1–10	6	6	1	4	
16	0,25	0,25	2	8	8	2	1–6	12	
17	3	3	2–5	6	6	6	2	2	
18	0,8	0,5–4	2	6	1,5	1,5	4	2	
19	0,5–3	0	3	3	$\infty$	3	4	2	обрыв фазы В
20	1	1	4	12	12	2	1	0,5–6	
21	3	3	3	3	3	3	6	0,5–2	
22	2	0,2	2	4	6	4	1	0,5–4	
23	0,5	3	3	1–8	3	3	1	6	
24	1	1	1	1–8	6	6	3	2	
25	3	0	3	3	$\infty$	2	2	2	обрыв фазы В
26	4	2	2	3	1	1	4	1	
27	0,5–3	1,5	0	3	1,5	$\infty$	4	2	обрыв фазы С
28	4	4	1	1	1,5	6	0,5–8	2	
29	1	0,15	1,5	4–32	10	10	4	2	
30	1	1	4	12	12	10	1	1–6	



## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – СПб.: ДЕАН, 2004. – 608 с.
2. Сибикин, Ю.Д. Справочник по эксплуатации электроустановок промышленных предприятий / М.Ю. Сибикин, Ю.Д. Сибикин. – М.: Высшая школа, 2002. – 248 с.
3. Коренев, Н.П. Раздражающая способность и сравнительная опасность для человека электрических токов различного вида / Н.П. Коренев, К.П. Шкирпа // Безопасность труда в промышленности. – 1971. – № 4. – С. 46–49.
4. Сирота, И.М. Режимы нейтралей электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 364 с.
5. Сирота, И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И.М. Сирота. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 326 с.
6. Коренев, Н.П. Оценка предельных значений параметров изоляции сети и заземления по критериям электробезопасности / Н.П. Коренев // Безопасность труда в промышленности. – 1983. – №4. – С. 56–58.
7. Коренев, Н.П. Условия обеспечения электробезопасности в передвижных электроустановках / Н.П. Коренев // Безопасность труда в промышленности. – 1987. – № 11. – С. 41–43.
8. Коренев, Н.П. Расчет рудничных электроустановок на безопасность от поражения персонала током / Н.П. Коренев, В.И. Щуцкий // Цветная металлургия. – 1973. – № 23. – С. 65–68.
9. Коренев, Н.П. Предельные значения параметров изоляции четырехпроводных сетей с изолированной нейтралью / Н.П. Коренев // Безопасность труда в промышленности. – 1993. – №1. – С. 23–26.
10. Ершов, А.М. Способы компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю / А.М. Ершов, О.А. Петров // Энергетика. Известия высших учебных заведений. – 1977. – №3 – С. 37–42.

11. Кононенко, В.П. Условия электробезопасности подземных электроприводов постоянного тока / В.П. Кононенко // Безопасность труда в промышленности. – 1978. – С. 33–37.
12. Коренев, Н.П. Условия электробезопасности при прикосновении к корпусу и токоведущим частям / Н.П. Коренев // Электробезопасность на открытых и подземных работах: сб. ст. – Днепропетровск: Изд-во Днепропетровского ин-та. – 1982. – С. 231–234.
13. Инструктивные материалы главэнергонадзора. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 352 с.
14. Ослон, А.Б. Защиты от однополюсных замыканий в электроустановках напряжением до 1000 В с заземлением нейтрали / А.Б. Ослон // Промышленная энергетика. – 1981. – №7
15. Якобс, А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве / А.И. Якобс, А.В. Луковников. – М.: Колос, 1981. – 239 с.
16. Шипунов, Н.В. Защитное отключение / Н.В. Шипунов. – М.: Энергия, 1968. – 160 с.
17. Гимоян, Г.Г. Релейная защита подземного электрооборудования и сетей / Г.Г. Гимоян, Р.М. Лейбов. – М.: Недра, 1970. – 281 с.
18. Кунин, Р.З. Защитное отключение электроустановок / Кунин Р.З. – Л.: Колос, 1984. – 63 с.
19. Электропривод и электрификация горных работ / В.И. Щуцкий [и др.]. – М.: Недра, 1991. – 319 с.
20. Федоров, А.А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий / А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
21. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 31 с.

22. Ополева, Г.Н. Проектирование систем электроснабжения: в 2 ч. Ч.1 / Г.Н. Ополева. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2003. – 234 с.
23. Ополева, Г.Н. Новое электрооборудование в системах электроснабжения. Справочник / Г.Н. Ополева. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2003. – 194 с.
24. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб: Деан, 2007. – 304 с.
25. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб: Деан, 2002. – 320 с.
26. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – СПб: Деан, 2007. – 208 с.
27. Кичигин, Н.В. Комментарий к Федеральному Закону “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (постатейный) / Н.В. Кичигин, М.В. Пономарев, А.Ю. Пуряева. – М.: Юстицинформ, 2007. – 152 с.
28. Сборник документов для реализации Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» на предприятиях энергетического комплекса. – М.: НТЦ “Промышленная безопасность”, 2006. – 274 с.
29. Непомнящий, В.А. Учет надежности при проектировании электросистем / В.А. Непомнящий. – М.: Энергия, 1978. – 199 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Научные и практические направления в решении вопросов электробезопасности.....	4
2. Некоторые понятия и определения .....	8
3. Режимы нейтралей электрических сетей.....	10
3.1. Трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью .....	11
3.1.1. Электрическая сеть с изолированной нейтралью напряжением 220 – 1140 В .....	11
3.1.2. Оценка предельных значений параметров изоляции сети напряжением 220 – 1140 В .....	15
3.1.3. Прикосновение к фазе или к корпусу незаземленного оборудования.....	21
3.1.4. Прикосновение к заземленному корпусу .....	28
3.2. Экспериментальная оценка параметров изоляции сети.....	33
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 .....	49
5.1. Трехпроводная трехфазная сеть .....	49
5.2. Четырехпроводная трехфазная сеть.....	52
6. Применение символического метода в анализе сетей на электробезопасность .....	59
7. Электрические сети с изолированной нейтралью напряжением 6 – 35 кВ .....	64
7.1. Контроль изоляции в сетях 6 – 35 кВ с помощью фильтров напряжения нулевой последовательности (ФННП).....	64

7.2. Контроль изоляции в сетях 6 – 35 кВ с помощью фильтров тока нулевой последовательности (ФТНП) .....	68
7.3. Расчет тока ОЗН в электросетях 6 – 35 кВ .....	73
7.4. Компенсация емкостной составляющей тока ОЗН в электросетях 6 – 35 кВ .....	77
7.5. Компенсация активной составляющей ОЗН в электросетях напряжением 6 – 35 кВ .....	82
7.6. Гальванически связанные электрические сети .....	84
8. Трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью с занулением .....	93
8.1. Системы заземляющих устройств электроустановок напряжением до 1140 В .....	104
8.2. Эффективность заземления нейтрали электрических сетей.....	113
8.3. Устройства защитного отключения в трехфазных электросетях с занулением .....	115
9. Защита от утечек тока в трехфазных электросетях с изолированной нейтралью.....	122
10. Требования ПУЭ к величинам сопротивления заземления электроустановок .....	139
11. Эксплуатационные измерения сопротивления заземления .....	145
12. Отклонение напряжений и уровни их допустимых значений.....	150
13. Техничко-экономическое сравнение схем сетей трехфазных четырехпроводных с глухозаземленной нейтралью с занулением и с изолированной нейтралью без зануления.....	153
14. Человек как элемент электрической цепи. Рекомендуемые параметры допустимых электрических воздействий.....	167
14.1. Раздражающая способность и сравнительная опасность для человека электрических токов различного вида.....	167

14.2. Наиболее вероятные и рекомендуемые допустимые уровни токов и напряжений для человека.....	175
14.3. Предельные значения напряжения прикосновения и сопротивления тела человека.....	182
15. Экспертиза промышленной безопасности и техническое диагностирование электроустановок потребителей.....	186
16. Контрольное задания .....	190
Литература .....	193

## О СИСТЕМЕ НАВИГАЦИИ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ В ADOBE READER

Электронное учебное пособие имеет встроенную систему навигации и ссылок, которая позволяет легко переходить между отдельными разделами и страницами, рисунками, таблицами и формулами учебного пособия.

### ПЕРЕХОД МЕЖДУ РАЗДЕЛАМИ И ПОДРАЗДЕЛАМИ

Электронный документ разбит на разделы и подразделы. Переход между ними можно осуществлять посредством вкладки *Закладки* на панели *Навигации* (см. рис. 1).

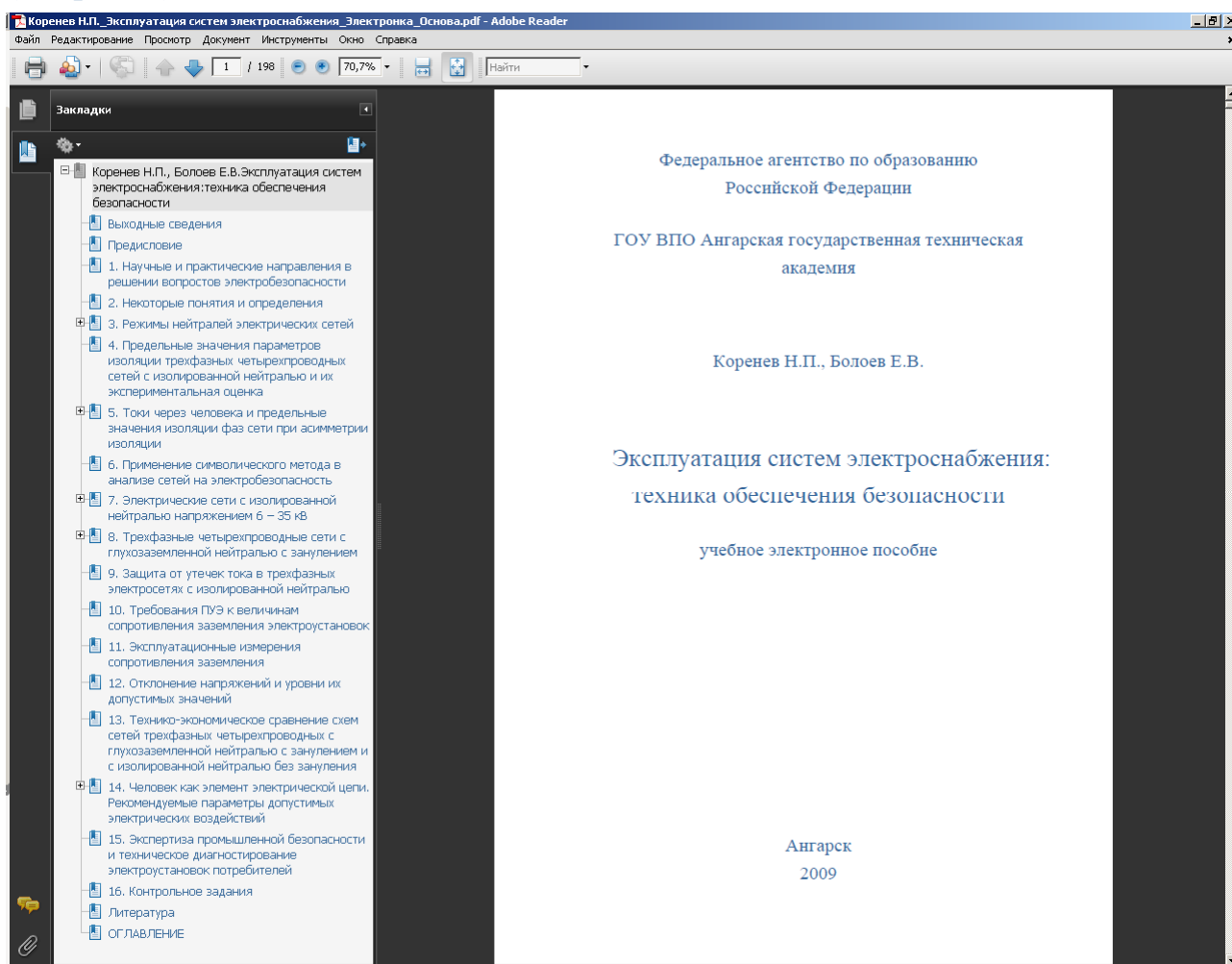


Рис. 1. Вкладка *Закладки* на панели *Навигация* в левой части рабочего стола

Для перехода к нужному разделу следует щелкнуть по его названию на вкладке *Закладки*. Если заголовок содержит вложенные заголовки более низкого уровня, рядом с его названием будет отображен знак “+”. Щелкнув по нему мышью, можно раскрыть заголовок, после чего станут видны вложенные заголовки, каждый из которых может, в свою очередь, содержать вложенные

заголовки. Чтобы свернуть заголовок, нужно выполнить щелчок на пиктограмме со знаком “–”.

Для перехода между разделами и подразделами так же можно использовать **ОГЛАВЛЕНИЕ**, расположенное на страницах 196 – 198 (см. рис. 2). Для перехода к нужному разделу следует щелкнуть по его названию.

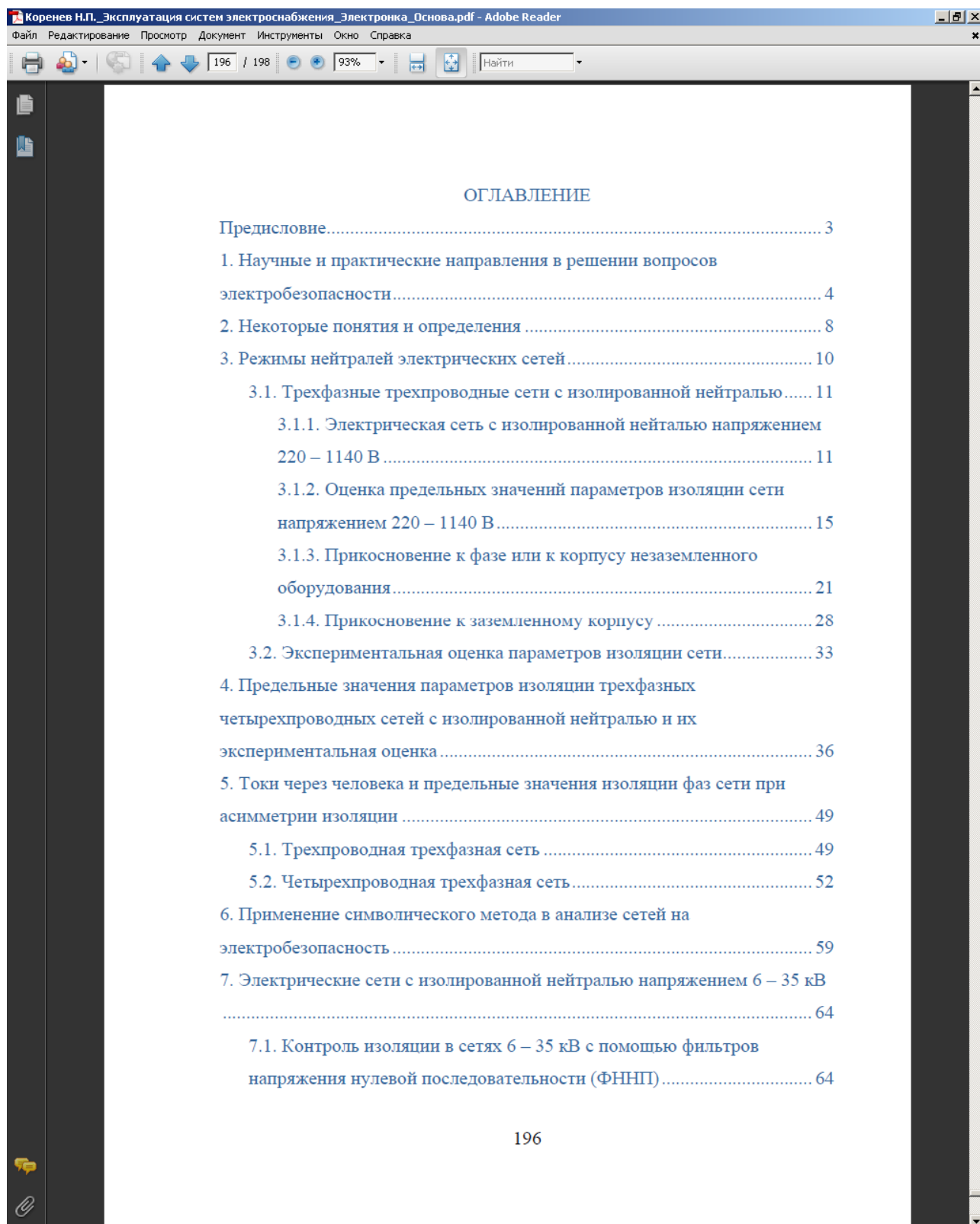


Рис. 2. ОГЛАВЛЕНИЕ на странице 196



## ПЕРЕХОД МЕЖДУ СТРАНИЦАМИ. УПРАВЛЕНИЕ МАСШТАБОМ ОТОБРАЖЕНИЯ

Электронный документ содержит 198 страниц. Переход между страницами можно осуществлять посредством кнопок *Переход на следующую страницу*, *Переход на предыдущую страницу*, меню *Страница* (см. рис. 3) на панели *Навигация по страницам*, вкладки *Страницы* на панели *Навигация* (см. рис. 4), а также используя скрытые поля (см. рис. 4).

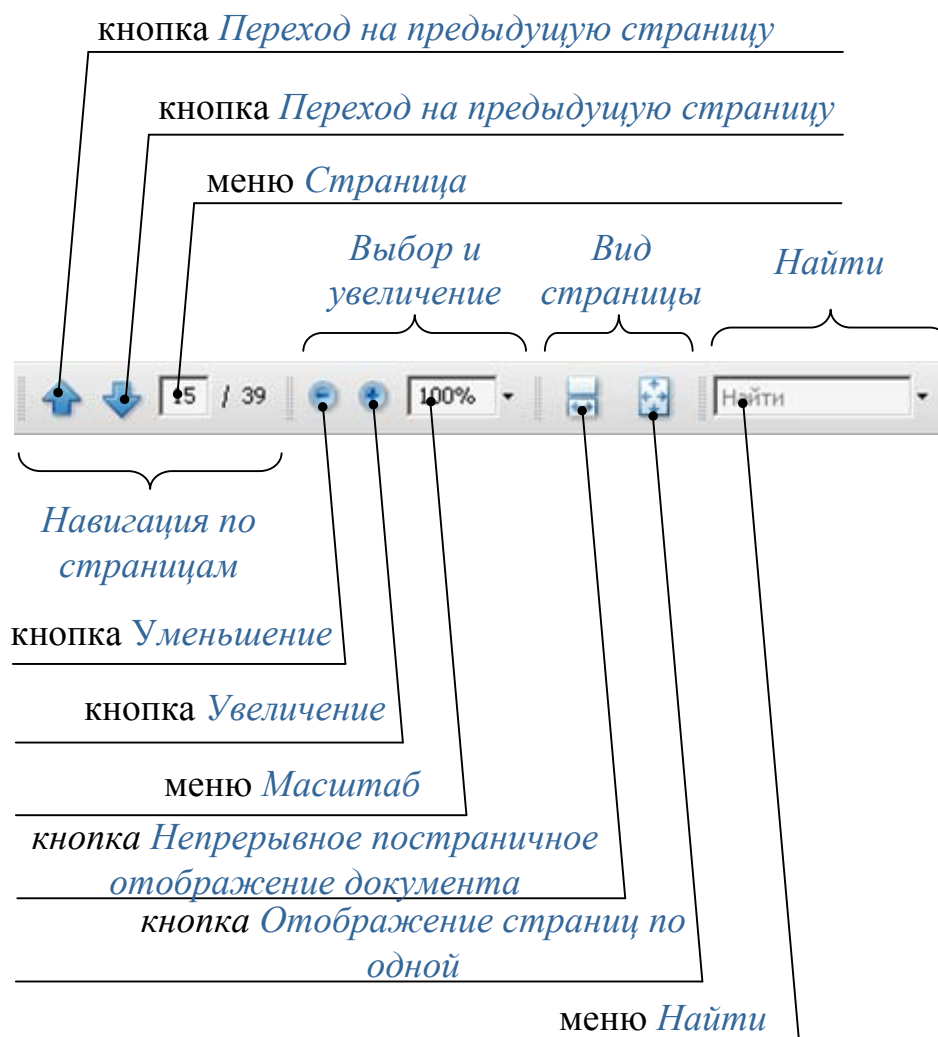


Рис. 3. Панели инструментов

Для перехода на следующую страницу необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши на кнопку *Переход на следующую страницу* (см. рис. 3) или на нижнее правое поле (см. рис. 4), а для перехода на предыдущую страницу – на кнопку *Переход на предыдущую страницу* (см. рис. 3) или на левое верхнее поле (см. рис. 4). Введение номера в меню *Страница* приведет к переходу на страницу документа за этим номером. Щелчок левой кнопкой мыши по

миниатюре страницы вкладки *Страницы* вызовет переход на соответствующую страницу.

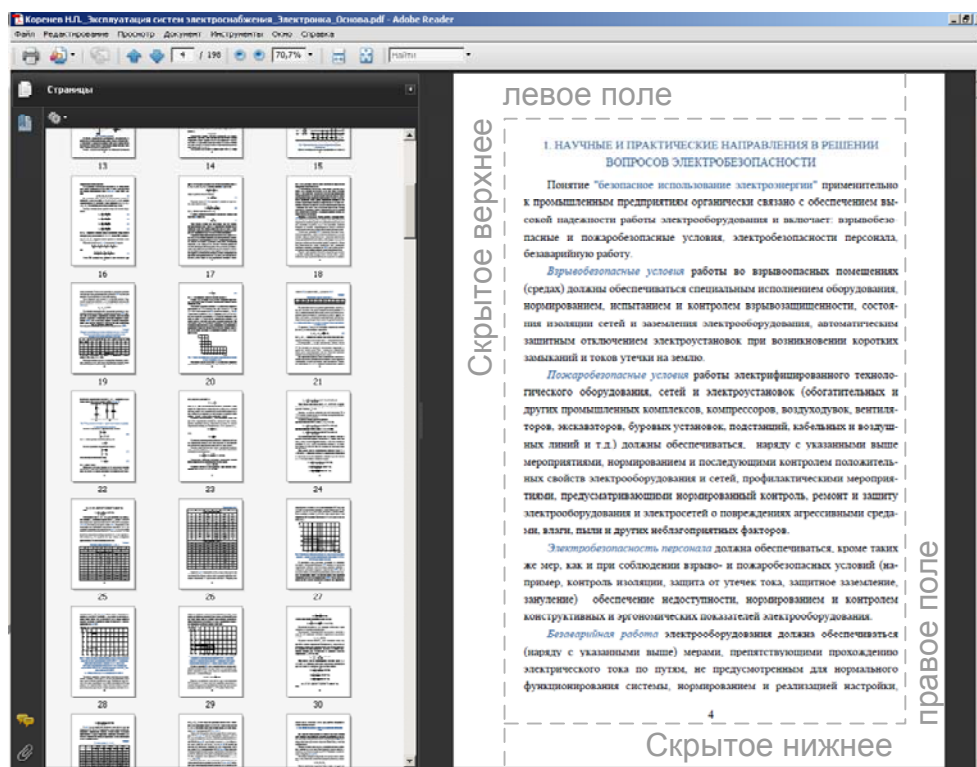


Рис. 4 Панель страницы и скрытые поля

Важным условием хорошего восприятия документа является выбор удобного масштаба его отображения в окне просмотра. В электронном документе предусмотрено два фиксированных масштаба отображения: *Непрерывное постраничное отображение документа*, *Отображение страниц по одной*. Для переключения между ними используются кнопки показанные на рис. 3.

Изменить масштаб можно при помощи кнопок *Увеличение* и *Уменьшение* или при помощи меню *Масштаб* (см. рис. 3). В меню вводят процент масштабирования или выбирают масштаб.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ССЫЛОК И СКРЫТЫХ ПОЛЕЙ

Ссылки в документе выделены синим цветом (см. рис. 5). В отличие от текста синего цвета, на который следует обратить особое внимание, они не заключены в кавычки, в них не используется курсив и слова с заглавных букв (см. рис. 6). В документе используется два типа ссылок (см. рис. 5): *перекрестные ссылки* на разделы, рисунки, таблицы, формулы и литературу; *название ссылок*. Щелчок левой кнопкой мыши на *перекрестную ссылку* вызывает переход на соответствующий ей объект с изменением масштаба. Для

возвращения к предыдущему виду используется *название ссылки*. Для возвращения к предыдущему виду можно так же использовать *скрытые поля* рисунков и таблиц, литературы, которые представляют собой пространство рисунка (см. рис. 5), таблицы, названия литературы.

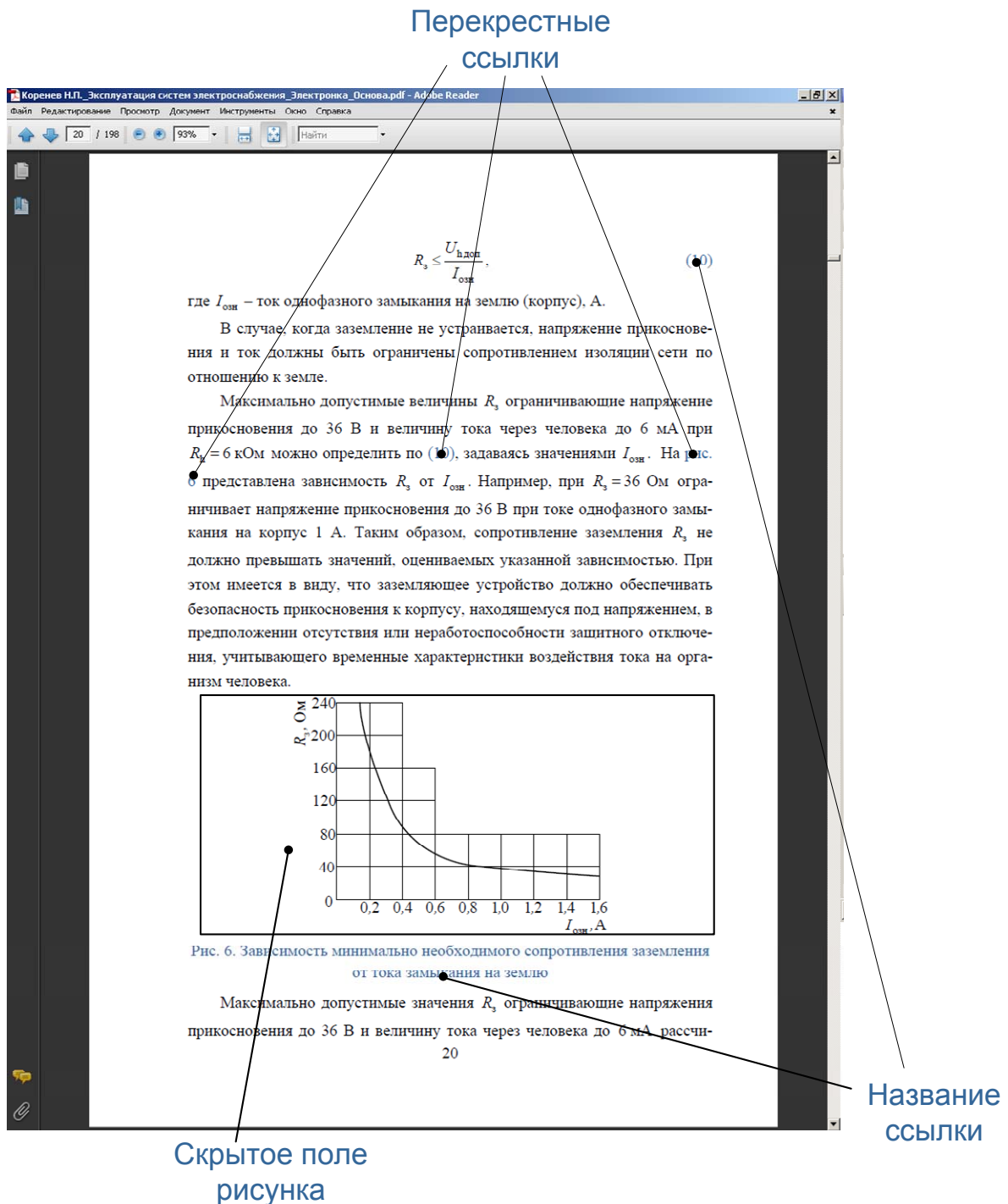


Рис. 5. Перекрестные ссылки формулы 10, рисунка 6  
и скрытое поле рисунка 6

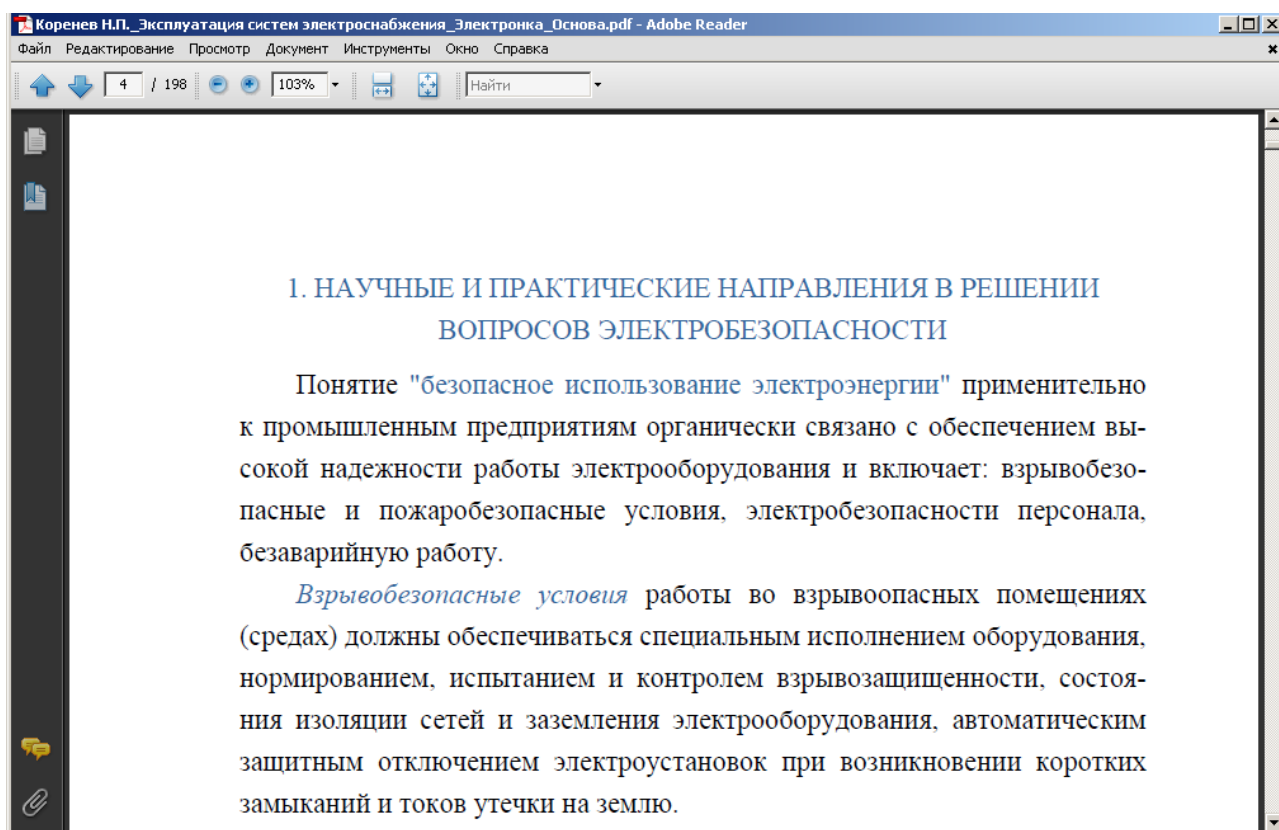


Рис. 6. Определения выделенные синим шрифтом, на которые следует обратить особое внимание