

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»

Кафедра электроснабжения горных и промышленных предприятий

Составители

**Т. Ф. Малахова
С. Г. Захаренко**

ЗАНУЛЕНИЕ

Методические указания к практическому занятию

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника»
в качестве электронного издания
для использования в учебном процессе

Кемерово 2015

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

С. А. Захаров – доцент, заведующий кафедрой электро-снабжения горных и промышленных предприятий

И. Ю. Семькина – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника»

Малахова Татьяна Федоровна, Захаренко Сергей Геннадьевич. Зануление: методические указания к практическому занятию по дисциплине «Электробезопасность» [Электронный ресурс] для студентов направления подготовки 13.03.02 (140400.62) «Электроэнергетика и электротехника», образовательная программа «Электроснабжение», всех форм обучения / сост.: Т. Ф. Малахова, С. Г. Захаренко. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Составлено в соответствии с программой дисциплины «Электробезопасность» и предназначено для проведения практических занятий студентов по изучению принципа действия зануления, области его применения, различных систем зануления.

Дана оценка эффективности систем. Приведены расчеты и характеристики, а также способы защиты от поражения электрическим током автоматическим отключением.

© КузГТУ, 2015
© Малахова Т. Ф.,
Захаренко С. Г.,
составление, 2015

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В соответствии с программой целью дисциплины «Электробезопасность» является изучение мероприятий по повышению надежности, безопасности, рационального и безаварийного использования электрооборудования.

Цель практического занятия: изучить основные требования к занулению для обеспечения электробезопасности, способы защиты от поражения электрическим током автоматическим отключением.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАНЯТИЯ

Тема «Зануление» изучается студентами на практических занятиях. Практические занятия проводятся в интерактивной форме и заключаются в дискуссии между преподавателем и студентами. На занятиях может быть предложено решение задач совместно с преподавателем. Защита тем, рассмотренных на практических занятиях, происходит по окончании их изучения в виде собеседования. При опросе преподаватель вправе задать любой вопрос, касающийся материала практического занятия.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Занулением в электроустановках напряжением до 1 кВ называется преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной средней точкой источника в сетях постоянного тока.

Зануление – это также способ защиты от поражения электрическим током автоматическим отключением поврежденного участка сети и одновременно снижением напряжения на корпусах оборудования на время, пока не сработает отключающий аппарат. Т. е. при занулении любые избыточные скачки напряжения отводятся на трансформатор (трансформаторную будку) или на

специализированный щиток. Все это делается для того, чтобы в случае пробоя изоляции и попадания тока на нетоковедущую часть оборудования происходило короткое замыкание, приводящее к перегоранию плавких предохранителей, к моментальному срабатыванию автоматического выключателя или реакции других систем защиты. Зануление применяют в трехфазных сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1 кВ. Обычно это сети напряжением 380/220 и 220/127 В. Из рис. 1 видно, что схема зануления требует наличия в сети нулевого провода, заземления нейтрали источника тока и повторного заземления нулевого провода. В этих сетях заземление не обеспечивает защиты.

Рассмотрим этот факт на примере.

При однофазном напряжении (рис. 1) $U_{\phi} = 220$ В ток однофазного короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 220 / (4 + 4) = 27,5$ А, а напряжение на заземленном корпусе $U_{\text{з}} = I_{\text{кз}} \times R_{\text{з}} = 27,5 \times 4 = 110$ В.

Корпус оборудования оказался под опасным напряжением, несмотря на то, что он заземлен.

Поэтому для защиты людей используют не заземление, а *зануление* (рис. 1).

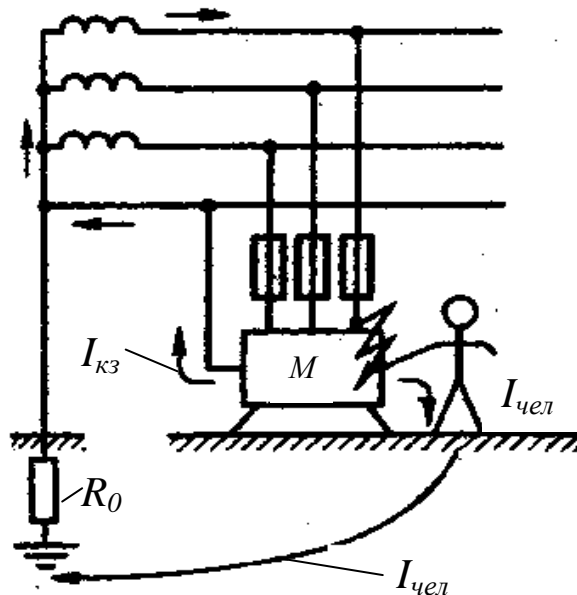


Рис. 1. Схема работы зануления, где R_0 – сопротивление заземлителя нейтрали, $I_{\text{чел}}$ – ток, проходящий через тело человека, $I_{\text{к.з}}$ – ток короткого замыкания

Цепь зануления (трансформатор – фазные провода – защитные нулевые проводники – трансформатор).

Занулением еще принято называть преднамеренное соединение с нулевым защитным проводником (рис. 2) металлических не токопроводящих частей, которые могут оказаться под напряжением (ГОСТ12.1.009-76). Схема зануления включает следующие элементы: нулевой защитный проводник и повторное заземление нулевого провода защитного нулевого проводника.

Проводник, соединяющий зануляемые части с глухозаземленной нейтральной точкой обмотки трансформатора, называется *нулевым защитным*.

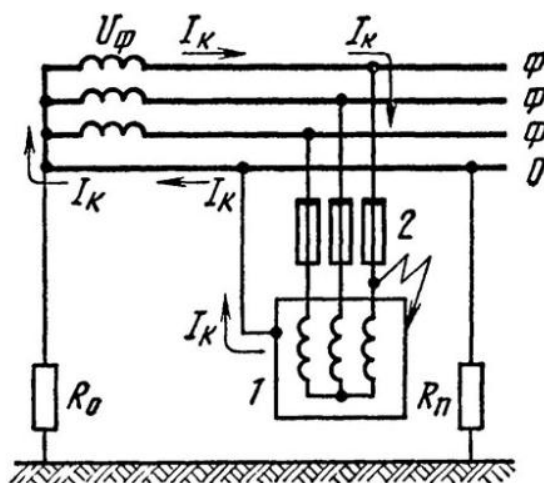


Рис. 2. Принципиальная схема зануления, где 1 – корпус; 2 – аппараты защиты от токов короткого замыкания (плавкие предохранители, автоматы и т. п.); R_0 – сопротивление заземления нейтрали источника тока; R_n – сопротивление повторного заземления нулевого провода; I_k – ток короткого замыкания

Нулевой защитный проводник, имеющий два или более ответвлений, в соответствии с ГОСТом именуется *магистралью зануления*.

Назначение нулевого провода (N-проводник) в схеме зануления – создание цепи с малым сопротивлением для тока при замыкании фазы на корпус и превращение этого замыкания в однофазное короткое замыкание. Цепь зануления (трансформатор – фазные провода – защитные нулевые проводники – трансформатор) имеет весьма малое сопротивление (доли Ом). При замыка-

нии на корпус ток, проходящий по этой цепи, достигает сотен Ампер. Его называют *током короткого замыкания*.

Из рис. 2 видно, что схема зануления требует наличия в сети нулевого провода, заземления нейтрали источника тока и повторного заземления нулевого провода.

Следовательно, зануление обеспечивает защиту от поражения электрическим током при замыкании на корпус за счет ограничения времени прохождения тока через тело человека и за счет снижения напряжения прикосновения. Назначение нулевого провода – создание для тока короткого замыкания цепи с малым сопротивлением, чтобы этот ток был достаточным для быстрого срабатывания защиты, т. е. быстрого отключения поврежденной установки от сети. Для примера рассмотрим следующий случай.

Пусть мы имеем схему без нулевого провода, роль которого выполняет земля (рис. 3). Будет ли работать такая схема?

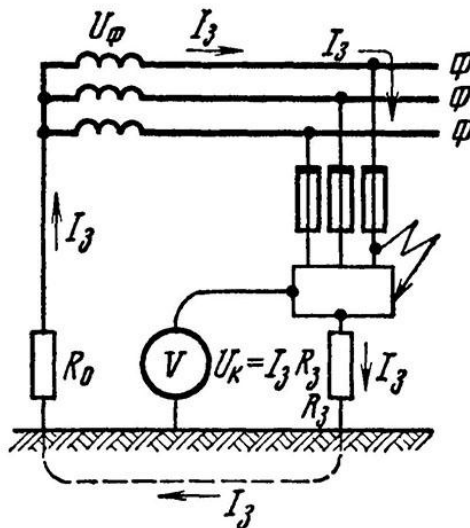


Рис. 3. К вопросу о необходимости нулевого провода в трехфазной сети до 1000 В с заземленной нейтралью

При замыкании фазы на корпус по цепи, образовавшейся через землю, будет протекать ток (А)

$$I_3 = \frac{U_\phi}{R_3 + R_0},$$

благодаря чему, на корпусе относительно земли возникает напряжение

$$U_{\kappa} = I_3 \times R_3 = U_{\phi} \times \frac{R_3}{R_3 + R_0},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, В; R_0 , R_3 – сопротивления заземлений нейтрали и корпуса, Ом.

Сопротивления обмотки трансформатора и проводов сети малы по сравнению с R_0 и R_3 и поэтому в расчет не принимаются.

Ток I_3 может оказаться недостаточным для срабатывания защиты, т. е. оборудование может не отключиться.

Например, при $U_{\phi} = 220$ В и $R_0 = 4$ Ом, $R_3 = 4$ Ом получим

$$I_3 = \frac{220}{4 + 4} = 27,5 \text{ А};$$

$$U_{\kappa} = 220 \times \frac{4}{4 + 4} = 110 \text{ В}.$$

Если ток срабатывания защиты больше 27,5 А, то отключения не произойдет, и корпус будет находиться под напряжением до тех пор, пока установку не отключат вручную. Безусловно, что при этом возникает угроза поражения людей током в случае прикосновения к поврежденному оборудованию. Чтобы устранить эту опасность, надо увеличить ток, протекающий через защиту, что достигается введением в схему нулевого провода.

Согласно требованиям Правил устройства электроустановок нулевой провод должен иметь проводимость не меньше половины проводимости фазного провода. В этом случае ток короткого замыкания будет достаточным для быстрого отключения поврежденной установки.

Из сказанного можно сделать вывод: в трехфазной сети напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью без нулевого провода невозможно обеспечить безопасность при замыкании фазы на корпус, поэтому такую сеть применять запрещается.

Назначение заземления нейтрали – снижение до безопасного значения напряжения относительно земли нулевого провода (и всех присоединенных к нему корпусов) при случайном замыкании фазы на землю.

В самом деле, в четырехпроводной сети с изолированной нейтралью при случайном замыкании фазы на землю (рис. 4, а)

между зануленными корпусами и землей возникает напряжение, близкое по величине к фазному напряжению сети U_ϕ , которое будет существовать до отключения всей сети вручную или до ликвидации замыкания. Безусловно, что это очень опасно.

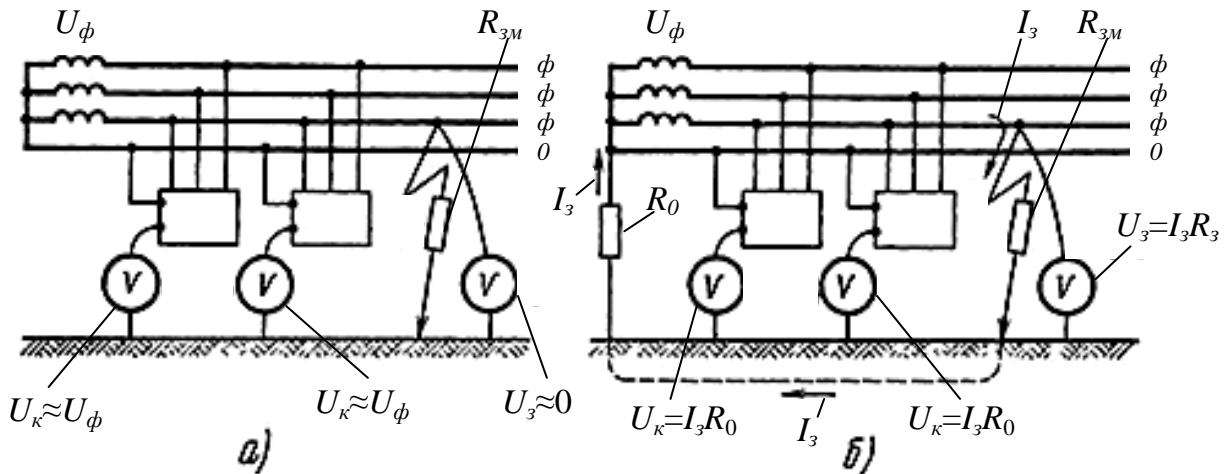


Рис. 4. Случай замыкания фазы на землю в трехфазной четырехпроводной сети до 1000 В с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью

В сети с заземленной нейтралью при таком повреждении будет совершенно иное, практически безопасное положение (рис. 4, б). В этом случае U_ϕ разделится пропорционально сопротивлениям R_{3m} (сопротивление замыкания фазы на землю) и R_0 (сопротивление заземления нейтрали), благодаря чему напряжение между зануленным оборудованием и землей резко снизится и будет равно

$$U_k = I_3 R_0 = U_\phi \times \frac{R_0}{R_0 + R_{3m}}.$$

Как правило, сопротивление заземления в результате случайного замыкания провода на землю, т. е. R_{3m} , во много раз больше R_0 , поэтому U_k оказывается незначительным. Например, при $U_\phi = 220$ В, $R_0 = 4$ Ом и $R_{3m} = 100$ Ом получим

$$U_k = 220 \times \frac{4}{4 + 100} = 8,5 \text{ В.}$$

При таком напряжении прикосновение к корпусу неопасно.

Следовательно, трехфазная четырехпроводная сеть с изолированной нейтралью включает опасность поражения током и поэтому применяться не должна. Согласно указаниям Правил устройства электроустановок сопротивление заземления нейтрали должно быть не больше 4 Ом. Лишь для источников тока небольшой мощности до 100 кВА (или 100 кВт) сопротивление заземления нейтрали может достигать 10 Ом.

Назначение повторного заземления нулевого провода – уменьшение опасности поражения людей током, возникающей при обрыве нулевого провода и замыкании фазы на корпус за местом обрыва.

В самом деле, при случайном обрыве нулевого провода и замыкании фазы на корпус (за местом обрыва) отсутствие повторного заземления приведет к тому, что напряжение относительно земли оборванного участка нулевого провода и всех присоединенных к нему корпусов окажется равным фазному напряжению сети U_ϕ (рис. 5, а). Это напряжение, безусловно опасное для человека, будет существовать длительное время, поскольку поврежденная установка автоматически не отключится и ее будет трудно обнаружить, чтобы отключить вручную.

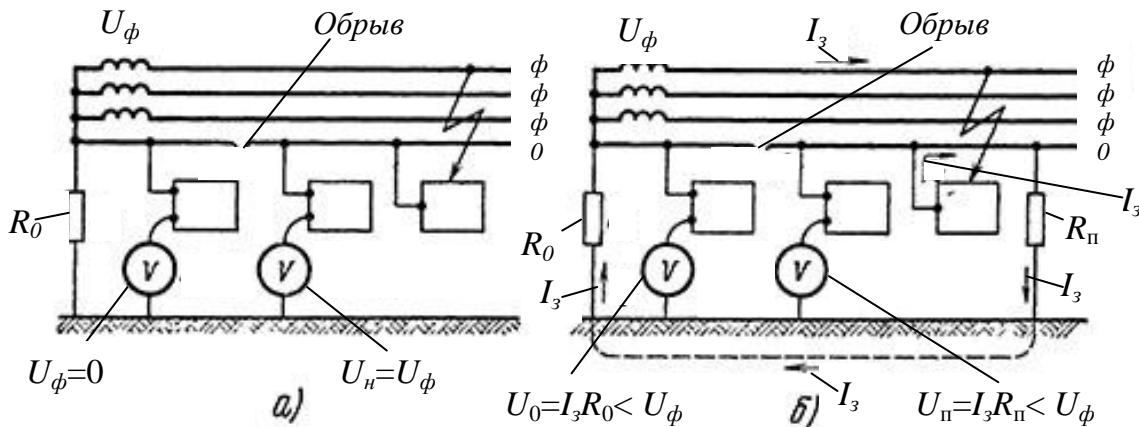


Рис. 5. Случай замыкания фазы на корпус при обрыве нулевого провода:

- а – в сети без повторного заземления нулевого провода;
- б – в сети с повторным заземлением нулевого провода

Если же нулевой провод будет иметь повторное заземление, то при его обрыве сохранится цепь тока I_3 через землю

(рис. 5, б), благодаря чему напряжение зануленных корпусов, находящихся за местом обрыва, снизится до значения:

$$U_n = I_z \times R_n = U_\phi \times \frac{R_n}{R_0 + R_n},$$

где R_n – сопротивление повторного заземления нулевого провода, Ом.

Однако корпуса, присоединенные к нулевому проводу до места обрыва, также окажутся под напряжением относительно земли, которое будет равно:

$$U_0 = I_z \times R_0 = U_\phi \times \frac{R_0}{R_0 + R_n}.$$

Вместе эти напряжения равны фазному:

$$U_n + U_0 = U_\phi,$$

благодаря чему на корпусе относительно земли возникает напряжение

$$U_n = I_z \times R_n = U_\phi \times \frac{R_n}{R_0 + R_n}.$$

Если $R_n = R_0$, то корпуса, присоединенные к нулевому проводу как до, так и после места обрыва, будут иметь одинаковое напряжение: $U_n = U_0 = 0,5U_\phi$.

Этот случай является наименее опасным, так как при других соотношениях R_n и R_0 часть корпусов будет находиться под напряжением, большим $0,5U_\phi$.

Следовательно, повторное заземление значительно уменьшает опасность поражения током, возникающую в результате обрыва нулевого провода, но не может устранить ее полностью, т. е. не может обеспечить условий безопасности, которые существовали до обрыва.

В связи с этим требуется тщательная прокладка нулевого провода, чтобы исключить возможность его обрыва по любой причине. Поэтому в нулевом проводе запрещается ставить предохранители, рубильники и другие приборы, которые могут нарушить его целостность.

Согласно требованиям Правил устройства электроустановок сопротивление повторного заземления нулевого провода не должно превышать 10 Ом; лишь в сетях, питаемых трансформаторами мощностью 100 кВА и менее (или генераторами мощностью 100 кВт и менее) сопротивление каждого повторного заземления может достигать 30 Ом при условии, что в этой сети число повторных заземлений не менее трех.

Системы зануления

Занулению подлежат те же металлические конструктивные нетоковедущие части электрооборудования, которые подлежат защитному заземлению: корпуса машин и аппаратов, баки трансформаторов и др.

Нулевым защитным проводником (РЕ-проводник в системе TN-S) называется проводник, соединяющий зануляемые части (открытые проводящие части) с глухозаземленной нейтральной точкой источника питания трехфазного тока или с заземленным выводом источника питания однофазного тока, или с заземленной средней точкой источника питания в сетях постоянного тока.

Нулевой защитный проводник следует отличать от *нулевого рабочего* и PEN-проводников.

Нулевой рабочий проводник (N-проводник в системе TN-S) – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, предназначенный для питания электроприемников, соединенный с глухозаземленной нейтральной точкой генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с глухозаземленной точкой источника в сетях постоянного тока.

Совмещенный (NN-проводник в системе TN-C) нулевой защитный и нулевой рабочий проводник – проводник в электроустановках напряжением до 1 кВ, совмещающий функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника.

Система зануления TN-C

Простая система зануления, в которой нулевой проводник N и нулевой защитный РЕ совмещены на всей своей длине. Сов-

местный проводник обозначается аббревиатурой PEN. Имеет существенные недостатки, главный из которых – высокие требования к системам уравнивания потенциалов и сечению PEN проводника (рис. 6).

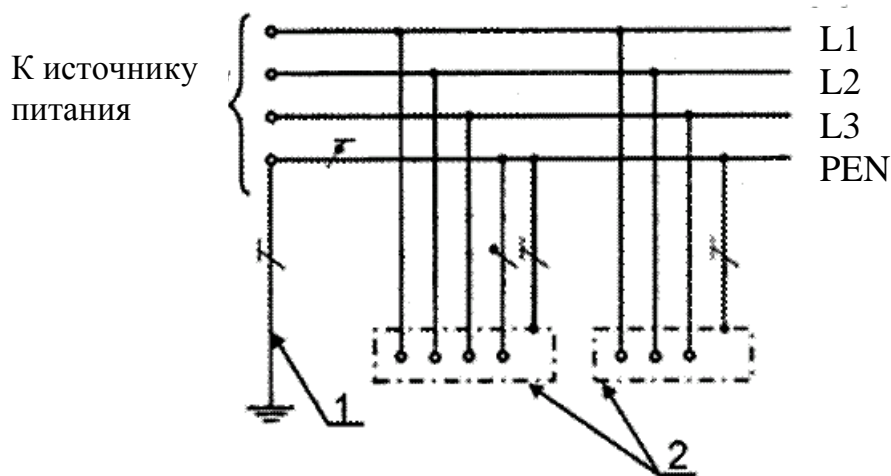


Рис. 6. Система зануления TN-C

Применяется для электроснабжения трехфазных нагрузок, например асинхронных двигателей.

Применение данной системы в однофазных групповых и распределительных сетях запрещено.

В соответствии с ПУЭ-7 (п. 1.7.132) не допускается совмещение функций нулевого защитного и нулевого рабочего проводников в цепях однофазного и постоянного тока. В качестве нулевого защитного проводника в таких цепях должен быть предусмотрен отдельный третий проводник.

Система зануления TN-C-S

Усовершенствованная система зануления, предназначенная для обеспечения электробезопасности однофазных сетей электроустановок. Состоит из совмещенного PEN-проводника, который соединен с глухозаземленной нейтралью питающего электроустановку трансформатора. В точке, где трехфазная линия разветвляется на однофазные потребители (например, в этажном щите многоквартирного дома или в подвале этого дома) PEN –

проводник разделяется на PE и N – проводники, непосредственно подходящие к однофазным потребителям (рис. 7).

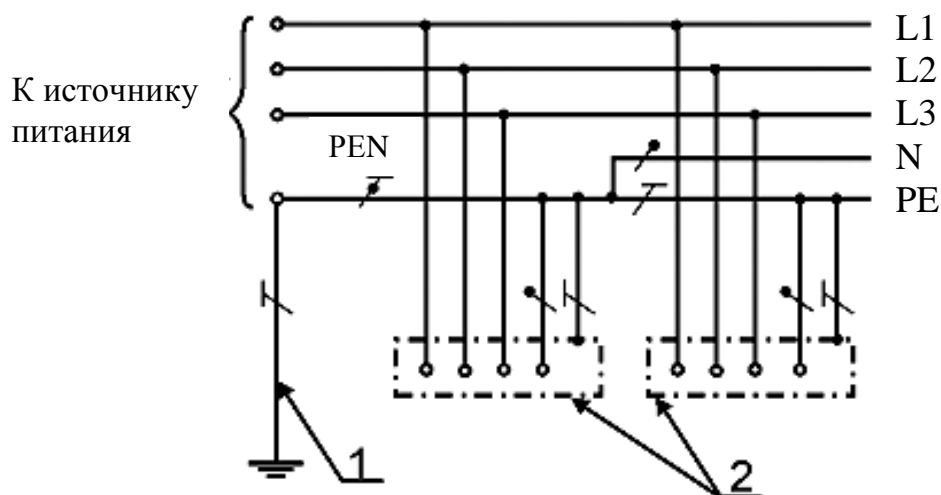


Рис 7. Система зануления TN-C-S

Система зануления TN-S

Наиболее совершенная, дорогая и безопасная система зануления (рис. 8).

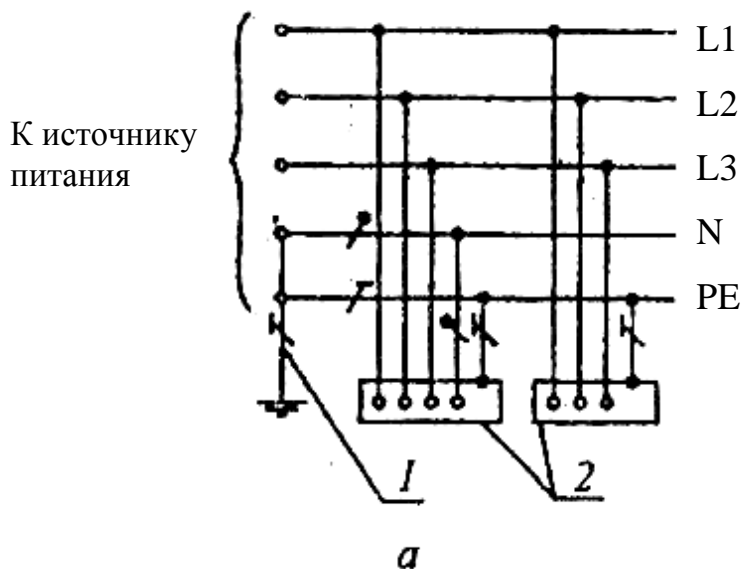


Рис. 8. Система зануления TN-S

В этой системе нулевой защитный и нулевой проводники разделены на всей своей длине, что исключает вероятность ее выхода из строя при аварии на линии или ошибке в монтаже

электропроводки. Токопроводящая цепь соединяет открытые токопроводящие поверхности и глухозаземленную нейтральную точку на источнике питания в трехфазных сетях или заземленный вывод однофазной сети, или заземленную среднюю точку источника постоянного тока.

Расчет зануления

Имеет целью определить условия, при которых оно надежно выполняет возложенные на него задачи – быстро отключает поврежденную установку от сети и в то же время обеспечивает безопасность прикосновения человека к зануленному корпусу в аварийный период. В соответствии с этим зануление рассчитывают на отключающую способность. При этом в соответствии с ПУЭ должны выполняться следующие требования.

В системе TN время автоматического отключения питания не должно превышать значений, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Наибольшее допустимое время
защитного автоматического отключения питания

Номинальное фазное напряжение U , В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

Приведенные в таблице 1 значения времени отключения питания считаются достаточными для обеспечения электробезопасности, в том числе и в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники и ручной электроинструмент класса I.

В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и другие щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с.

Допускаются значения времени отключения более указанных в таблице 1, но не более 5 с в цепях, питающих только стационарные электроприемники от распределительных щитков или щитов при выполнении одного из следующих условий:

1) полное сопротивление защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком не превышает значения, Ом

$$50 \frac{Z_{\Pi}}{U},$$

где Z_{Π} – полное сопротивление цепи «фаза-нуль», Ом; U – номинальное фазное напряжение сети, В; 50 – падение напряжения на участке защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком, В.

2) к шине PE распределительного щита или щитка присоединена дополнительная система уравнивания потенциалов, охватывающая те же сторонние проводящие части, что и основная система уравнивания потенциалов.

Расчет зануления на отключающую способность заключается в определении параметров нулевого защитного проводника (длина, сечение, материал) и максимальной токовой защиты, при которых ток однофазного короткого замыкания, возникающий при замыкании фазного провода на зануленный корпус, вызвал бы срабатывание максимальной токовой защиты за время, указанное в таблице 1.

К расчету зануления на отключающую способность

Значение тока короткого замыкания I_k зависит от фазного напряжения сети U и сопротивлений цепи, в том числе от полных сопротивлений: трансформатора Z_T , фазного проводника Z_{L1} , нулевого защитного проводника Z_{PE} , внешнего индуктивного сопротивления петли (контура) фазный проводник – нулевой защитный проводник (петли фаза-нуль) X_{Π} , а также от активных сопротивлений заземлений нейтрали обмоток источника тока (трансформатора) R_0 и повторного заземления нулевого защитного проводника R_{Π} .

Для упрощения чтения приняты следующие обозначения: Z – полное сопротивление (комплексная величина); z – модуль полного сопротивления.

Поскольку R_0 и R_{II} , как правило, велики по сравнению с другими сопротивлениями цепи, можно не принимать во внимание параллельную ветвь, образованную ими. Тогда выражение для тока короткого замыкания \dot{I}_k в комплексной форме будет иметь вид:

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{L1} + Z_{PE} + jX_{II}},$$

где \dot{U} – фазное напряжение сети, В; Z_T – комплекс полного сопротивления обмоток трехфазного источника тока (трансформатора), Ом; Z_{L1} – комплекс полного сопротивления фазного провода, Ом; Z_{PE} – комплекс полного сопротивления нулевого защитного проводника, Ом; X_{II} – внешнее индуктивное сопротивление петли фаза-нуль.

При расчете зануления допустимо применять приближенную формулу для вычисления действительного значения (модуля) тока короткого замыкания I_k , в которой модули сопротивлений трансформатора z_T и петли фаза-нуль z_{II} складываются арифметически:

$$I_k = \frac{U}{\frac{z_T}{3} + z_{II}}.$$

Некоторая неточность (около 5 %) этой формулы ужесточает требования безопасности и поэтому считается допустимой.

Модуль полного сопротивления петли фаза-нуль равен:

$$z_{II} = \sqrt{(R_{L1} + R_{PE})^2 + (X_{L1} + X_{PE} + X_{II})^2}.$$

Расчет зануления на отключающую способность является поверочным расчетом правильности выбора проводимости нулевого защитного проводника, а точнее, достаточности проводимости петли фаза-нуль.

Значение модуля сопротивления трансформатора z_T зависит от его мощности, напряжения и схемы соединения обмоток, а

также от конструктивного исполнения трансформатора. При расчетах зануления значение z_T берется из таблиц. Значения R_{L1} и R_{PE} для проводников из цветных металлов (медь, алюминий) определяют по известным данным: сечению S , мм², длине l , м, и материалу проводников. При этом искомое сопротивление:

$$R = 1,2 \cdot \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, равное для меди 0,018, а для алюминия 0,028 Ом·мм²/м; коэффициент 1,2 учитывает увеличение сопротивления при нагреве кабеля в результате длительного протекания тока.

Сечение жилы фазного провода либо известно, либо выбирается исходя из значения рабочего тока (т. е. тока, протекающего по проводнику при нормальном режиме работы). Сечение нулевого защитного проводника должно быть не менее чем указанные в табл. 2.

Таблица 2

Наименьшие сечения защитных проводников

Сечение фазных проводников, мм ²	Наименьшее сечение защитных проводников, мм ²
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Если нулевой защитный проводник стальной, то его активное сопротивление R_{PE} определяется с помощью таблиц, в которых приведены значения погонных сопротивлений (R_{01} , Ом/км) различных стальных проводников при разной плотности тока частотой 50 Гц.

Для этого необходимо задаться профилем и сечением проводника, а также знать его длину и ожидаемое значение тока КЗ I_k , который будет проходить по этому проводнику в аварийный период. Сечением проводника задаются из расчета, чтобы плотность тока КЗ в нем была в пределах примерно 0,5-2,0 А/мм².

Значения внутренних индуктивных сопротивлений (вызванных самоиндукцией) X_{L1} и X_{PE} медных и алюминиевых про-

водников сравнительно малы (около 0,0156 Ом/км) и обычно ими можно пренебречь. Внутреннее индуктивное сопротивление жил (фазной или нулевой) можно определить по формуле

$$X_L = X_{PE} = 0,0156 \cdot \frac{l}{1000},$$

где l – длина проводника, м.

Для стальных проводников внутренние индуктивные сопротивления оказываются достаточно большими, и их определяют с помощью таблиц. При этом также необходимо знать профиль и сечение проводника, его длину и ожидаемое значение тока I_k .

Значение внешнего индуктивного сопротивления (вызванного взаимоиндукцией между фазным и нулевым проводом) X_{II} может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формуле для индуктивного сопротивления двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра d , м:

$$X_{II} = \omega L = \omega \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} l \ln \frac{2D}{d},$$

где ω – угловая скорость, рад/с, L – индуктивность линии, Гн; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; l – длина линии, м; D – расстояние между проводами линии, м.

Диаметр жилы фазного или нулевого проводника:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}},$$

где S – сечение жилы.

Расстояние между фазной и нулевой жилами:

$$D = (d_{L1} + d_{PE})/2 + 3,4,$$

где d_{L1} и d_{PE} – диаметр жил фазной и нулевой соответственно, мм²; D – расстояние между фазной и нулевой жилами, мм; **3,4** – удвоенная толщина изоляции, мм.

Внешнее индуктивное сопротивление можно определить по формуле

$$X_{II} = \frac{0,1256 \times \ln\left(\frac{2D}{d_{L1} + d_{PE}}\right) \times l}{1000}.$$

При малых значениях D , соизмеримых с диаметром проводов d , т. е. когда фазный и нулевой проводники расположены в непосредственной близости один от другого, сопротивление X_{II} незначительно (не более 0,1 Ом на 1 км).

Суммарное индуктивное сопротивление фазной и нулевой жил

$$X = X_{L1} + X_{PE} + X_{II}.$$

Оценка эффективности системы автоматического отключения питания (защитного зануления) в сети типа TN

Для того, чтобы оценить эффективность системы зануления, нужно сравнить время отключения поврежденного электропотребителя с наибольшим допустимым временем защитного автоматического отключения питания, для чего необходимо сравнить ток короткого замыкания (измеренный или рассчитанный) с характеристиками аппарата максимальной токовой защиты (МТЗ), защищающего участок сети, на котором произошло замыкание фазного провода на зануленный корпус электропотребителя.

Обычно в роли аппаратов МТЗ выступают плавкие вставки или автоматические выключатели. Аппарат МТЗ реагирует на сверхток (ток короткого замыкания) и, в зависимости от значения сверхтока и от своих характеристик, отключает защищаемую линию за некий промежуток времени. Таким образом, для определения времени отключения необходимо знать значение тока короткого замыкания в исследуемой цепи и характеристики аппарата МТЗ, установленного в ней.

Характеристики аппаратов МТЗ

Аппараты МТЗ имеют достаточно большое количество различных характеристик, однако, при оценке эффективности си-

стемы зануления наибольшее значение имеют номинальный ток аппарата и время-токовая (ампер-секундная) характеристика.

Номинальный ток аппарата – максимальный ток, который, протекая через аппарат неограниченно долго, не вызовет его срабатывания.

Как уже отмечалось, наибольшее распространение получили такие аппараты МТЗ, как плавкие вставки и автоматические выключатели. В промышленности для защиты линий, непосредственно питающих потребителя, в подавляющем большинстве случаев используются автоматические выключатели.

Автоматические выключатели могут быть выполнены с тепловым (ТР) или с электромагнитным расцепителем (ЭМР), а также с комбинированным расцепителем. Особенность теплового расцепителя в том, что время срабатывания зависит от протекающего тока (чем больше ток, тем меньше время срабатывания), электромагнитный расцепитель срабатывает при достижении тока срабатывания практически моментально (менее 0,2-0,1 с).

Автоматический выключатель с комбинированным расцепителем при токах, превышающих номинальный, но менее тока срабатывания ЭМР, работает как автоматический выключатель с тепловым расцепителем, а при превышении тока срабатывания ЭМР, как автоматический выключатель с ЭМР.

Для простоты и удобства проектирования и эксплуатации электрических сетей разработаны и приняты стандартные характеристики отключения автоматов защиты. Таким образом, автоматические выключатели известных производителей (ABB, Siemens, Merlin Gerin и т. п.), но с одинаковыми номинальными токами и характеристиками, практически идентичны, с точки зрения отключающей способности. Существует так же общий ряд значений номинального тока: 5; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40 А.

Характеристики отключения автоматов защиты обозначают большими латинскими буквами, например: «В» или «С». Сведения по некоторым характеристикам приведены в табл. 3.

Разброс значений токов срабатывания объясняется, во-первых, невозможностью создания абсолютно идентичных аппаратов, во-вторых, тем, что срабатывание может происходить как из «холодного» состояния, т. е. сразу после включения аппарата, так и из «горячего», т. е. перед срабатыванием чувствительный

элемент теплового расцепителя автоматического выключателя был нагрет протекающим по нему рабочим током.

Таблица 3

Некоторые характеристики автоматических выключателей

Характеристика	Область применения	Минимальный ток срабатывания теплового расцепителя	Минимальный ток срабатывания электромагнитного расцепителя
В	активная нагрузка	от $1,13 I_n$ до $1,45 I_n$	от $3 I_n$ до $5 I_n$
С	активная нагрузка	от $1,13 I_n$ до $1,45 I_n$	от $5 I_n$ до $10 I_n$
Д	активно-индуктивная нагрузка, эл. двигатели	от $1,13 I_n$ до $1,45 I_n$	от $10 I_n$ до $20 I_n$
К	активно-индуктивная нагрузка, эл. двигатели, трансформаторы	от $1,05 I_n$ до $1,2 I_n$	от $8 I_n$ до $14 I_n$
Z	электроника	от $1,05 I_n$ до $1,2 I_n$	от $2 I_n$ до $3 I_n$

Примечание: 1. I_n – номинальный ток автоматического выключателя;

2. Автоматические выключатели с характеристикой Д выпускаются как с комбинированным, так и только с тепловым расцепителем, остальные автоматические выключатели выпускаются только с комбинированным расцепителем

При оценке эффективности защитного зануления мы должны рассматривать наихудший вариант, поэтому для случая срабатывания теплового расцепителя необходимо пользоваться верхней кривой характеристики. Если же ток короткого замыкания находится в интервале минимальных токов срабатывания ЭМР,

то необходимо рассчитывать время отключения по характеристике теплового расцепителя, т. к. ЭМР может не сработать. Гарантированное срабатывание ЭМР автоматического выключателя происходит только в случае превышения током короткого замыкания большего из минимальных токов срабатывания ЭМР. Для примера рассмотрим реакцию автоматического выключателя типа «С» с номинальным током 25А на токи различной величины, протекающие через него (табл. 4).

Таблица 4

Реакция автоматического выключателя типа «С»
с номинальным током 25А на токи различной величины

Значение тока, А	Кратность тока	Реакция расцепителя		Время отключения	Примечание
		ТР	ЭМР		
20	0,8	не срабатывает	не срабатывает	отключение не произойдет	нормальный режим работы
27	1,08	не срабатывает	не срабатывает	отключение не произойдет	допустимая перегрузка
75	3	срабатывает	не срабатывает	от 4,5 до 14 с	для расчета берем время 14 с
200	8	срабатывает	срабатывание возможно	по ТР: 1,5 с по ЭМР: 0,01 с	для расчета берем время 1,5 с
275	11	–	срабатывает	0,01 с	для расчета берем время 0,01 с

Пример решения задачи

Задача 1. Проверить, удовлетворяет ли отключающей способности по схеме выбранное сечение нулевого провода линии, показанной на рис. 9. Линия 380/220 В с медными проводами ($3 \times 25 + 1 \times 16$) мм² питается от трансформатора 400 кВА.

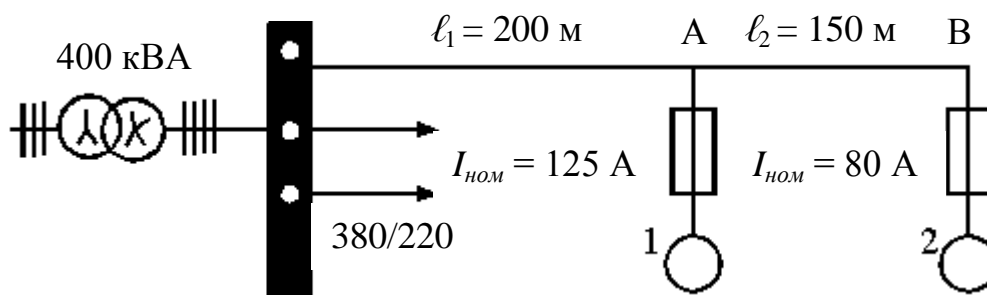


Рис. 9. Схема питания линии 380/220 В

Расчет на отключающую способность проводится с использованием формул:

$$I_{\kappa} = \frac{k \times I_{\text{ном}}}{U} \cdot \frac{U}{\sqrt{\gamma(R_T + R_{\phi} + R_H)^2 + (X_T + X_H)^2}},$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя (АВ), А; k – коэффициент кратности тока: $k=1,25 \dots 1,4$ при АВ, имеющем отсечку; $k=3 \dots 6$ – если электроустановка защищается предохранителями или АВ с обратной зависимостью характеристик тока.

Для упрощения можно применить формулу, в которой полное сопротивление трансформатора z_T и петли проводов фаз-нуль z_{Π} складываются

$$I_{\kappa} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_T}{3} + z_{\Pi}};$$

$$z_{\Pi} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{PE})^2 + (X_{\phi} + X_{PE} + X_{\Pi})^2}$$

или $Z_{\Pi} = \sqrt{(R_{\phi} + R_H)^2 + X_H^2},$

где R_{ϕ} и R_H – соответственно активное сопротивление фазных и нулевого провода, Ом.

Значение z_T для трансформатора будет равно $z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}.$

В нашем случае трансформатор имеет мощность $S < 1000$ кВА (400 кВА), поэтому значение R_T колеблется в преде-

лах от 0,05 до 1,5 Ом для (соединения Δ/Y) и его можно определить по эмпирической формуле

$$R_T = \frac{270}{S + 10} \times U^2,$$

где U – номинальное напряжение трансформатора со стороны питающей сети с занулением, кВ.

Значение R_ϕ (активное сопротивление фазного провода) можно определить, если известно сечение фазного провода, которое находится из справочных данных, для общего расчета электропроводки.

Значение X_H , Ом/км, определяется по формуле

$$X_H = \omega L_0 = 0,126 \ln \frac{D}{r},$$

где D и r – расстояние между проводами и радиус проводов, см.

В приближенных расчетах X_H принимают равным 0,3 Ом/км для внутренней проводки и 0,6 Ом/км для воздушной линии.

При короткой линии или малом расстоянии между проводами, а также, если проводка выполнена кабелями или в стальных трубах, значением X_H можно пренебречь.

Определим модуль полного сопротивления петли фаза-нуль (z_{II}).

Решение. Модуль полного сопротивления петли фаза-нуль равен:

– на 1 км

$$z_{II} = \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + X_H^2} = \sqrt{(0,74 + 1,2)^2 + 0,6^2} = 2 \text{ Ом/км},$$

где X_H – принято равным 0,6 Ом/км, а R_ϕ и R_n взяты из справочника для медного провода сечением 16 мм² [3, 4];

– на первом участке ($l_1 = 0,2$ км)

$$z_{II1} = l_1 \times z_{II} = 0,2 \times 2 = 0,4, \text{ Ом};$$

– на втором участке длиной $l_2 = 0,350$ ($0,2 + 0,150 = 0,350$), км

$$z_{II2} = l_2 \times z_{II} = 0,350 \times 2 = 0,7, \text{ Ом}.$$

Определяем ток короткого замыкания:

– при пробое на корпус двигателя 1

$$I_{к1} = \frac{220}{0,11 + 0,4} = 430 \text{ А};$$

– при пробое на корпус двигателя 2

$$I_{к2} = \frac{220}{0,11 + 0,7} = 270 \text{ А}.$$

Необходимый для отключения ток короткого замыкания

– при пробое на корпус двигателя 1

$$k \times I_{ном} = 3 \times 125 = 375 \text{ А};$$

– при пробое на корпус двигателя 2

$$k \times I_{ном} = 3 \times 80 = 240 \text{ А}.$$

Следовательно, выбранная проводимость нулевого провода обеспечивает отключающую способность схемы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия защитного зануления и область его применения.
2. Назначение нулевого защитного проводника.
3. Назначение заземления нейтрали обмоток источника тока.
4. Назначение повторного заземления нулевого защитного проводника.
5. Распределение потенциала по длине нулевого защитного проводника при замыкании фазного проводника на зануленный корпус потребителя.
6. Требования нормативных документов к системе защитного зануления.
7. Расчет зануления на отключающую способность.

Список литературы

1. Кудрин, Б. И. Электроснабжение потребителей и режимы: учеб. пособие / Б. И. Кудрин, Б. В. Жилин, Ю. В. Матюнина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 412 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2011. – 192 с.

<http://www.biblioclub.ru/indeex.php?page=book&id=57238>

3. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергоатомиздат, 1984 г.

4. Долин, П. А. Электробезопасность: задачник / П. А. Долин, В. Т. Медведев, В. В. Корочков. – М.: Гардарики, 2003.

5. Красник, В. В. Правила устройства электроустановок в вопросах и ответах: пособие для изучения и подготовки к проверке знаний. – М.: ЭНАС, 2009. – 512 с.

<http://www.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=58077>

6. Цапенко, Е. Ф. Электробезопасность на горных предприятиях: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение», направление подготовки дипломированных специалистов «Электроэнергетика» / Е. Ф. Цапенко, С. З. Шкундин. – Москва: МГГУ, 2008. – 103 с. – Режим доступа:

<http://www.biblioclub.ru/book/100037/>

7. Сибикин, Ю. Д. Охрана труда и электробезопасность / Ю. Д. Сибикин. – М.: РадиоСофт, 2007. – 408 с.

Нормативная литература

8. Правила устройства электроустановок. Раздел 1. Общие правила. Главы 1.1, 1.2, 1.7, 1.9. Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Главы 7.5, 7.6, 7.10. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.

9. Межотраслевые правила по охране труда (Правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ РМ-016-2001, РД 153.34.0-03. 150-00. – М.: КноРус, 2009. – 168 с.

10. Правила устройства электроустановок [Текст]. – 7 изд. – М.: НТБЦПБ, 2012. – 584 с.

11. Нормативные основы устройства и эксплуатации электроустановок: нормативно-технический сборник. – Барнаул, 2002. – 976 с.