

Лекция 11

4.4. Системы заземления электрических сетей

Системы электроснабжения классифицируются Международной электротехнической комиссией (МЭК) в зависимости от способа заземления распределительной сети и применённых мер защиты от поражения электрическим током. Распределительные сети подразделяются на сети с заземлённой нейтралью и сети с изолированной нейтралью.

Стандарт МЭК-364 подразделяет распределительные сети в зависимости от конфигурации токоведущих проводников, включая нулевой рабочий (нейтральный) проводник, и типов систем заземления. При этом используются следующие обозначения.

Первая буква характеризует связь с землёй токоведущих проводников:

I – isolate (изолированный) показывает, что токоведущие проводники изолированы от земли;

T – terra (земля) показывает, что токоведущие проводники хотя бы одной точкой связаны с землёй (заземлённые сети).

Вторая буква характеризует связь с землёй открытых проводящих частей (ОПЧ) и сторонних проводящих частей (СПЧ) электроустановок:

T – показывает, что ОПЧ и СПЧ связаны с землёй (заземлены);

N – neutral (нейтральный) показывает, что ОПЧ и СПЧ связаны с заземлённой точкой сети посредством нулевого рабочего (N) или нулевого защитного (PE) проводника, при этом предполагается, что возможно совмещение в одном проводнике нулевого рабочего и нулевого защитного проводников (PEN).

Обозначение системы заземления	Сетевое заземление	Защитное заземление проводящих частей
<i>IT</i>	Непосредственное соединение с землёй отсутствует. Допускается соединение с землёй через разрядник и т.д.	Непосредственное соединение с землёй, независимое от сетевого заземления
<i>TT</i>	Соединение с землёй в одной или нескольких точках распределительной сети за пределами сети потребителя	Непосредственное соединение с землёй, независимое от сетевого заземления
<i>TN</i>	Соединение с землёй в одной или нескольких точках распределительной сети за	Соединение с «сетевой землёй» с помощью PE- или PEN-проводника

Токоведущие части соединяются с землёй для ограничения напряжения, которое может появиться на них в результате прямого удара молнии или вторичных проявлений молнии (индуцированные волны перенапряжений), или в результате преднамеренного контакта с линиями более высокого напряжения, или в результате пробоя изоляции токоведущих частей распределительной сети.

Причины, по которым не соединяют токоведущие части распределительной сети с землёй, следующие: во избежание перерыва питания потребителя при единственном повреждении (пробой изоляции на землю токоведущих частей распределительной сети); во избежание искрообразования во взрыво- и пожароопасных зонах при единственном повреждении изоляции токоведущих частей сети.

Заземление ОПЧ является одной из многочисленных мер, которые могут быть использованы для защиты от поражения электрическим током. Заземление ОПЧ предполагает создание эквипотенциальной среды, что снижает вероятность появления напряжения на теле человека.

Система заземления *TN*. В зависимости от устройства нулевого рабочего и нулевого защитного проводников различают следующие типы систем заземления электрических сетей.

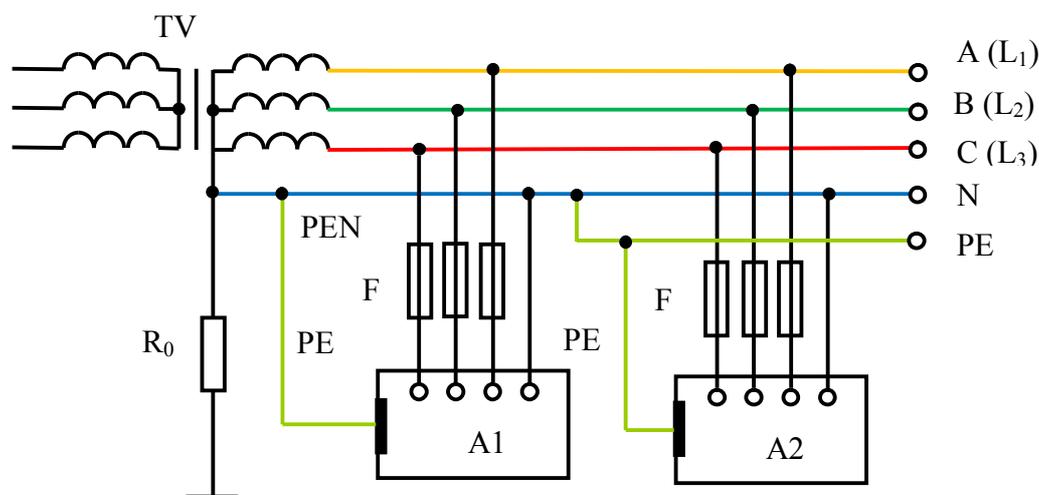
Электроустановки напряжением до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий и наружных установок должны, как правило, получать питание от источника с глухозаземлённой нейтралью с применением системы *TN*.

При применении системы *TN* рекомендуется выполнять повторное заземление PE- и PEN-проводников на вводе в электроустановки зданий, а также в других доступных местах. Для повторного заземления в первую очередь следует использовать естественные заземлители. Внутри больших и многоэтажных зданий аналогичную функцию выполняет уравнивание потенциалов посредством присоединения нулевого защитного проводника к главной заземляющей шине.

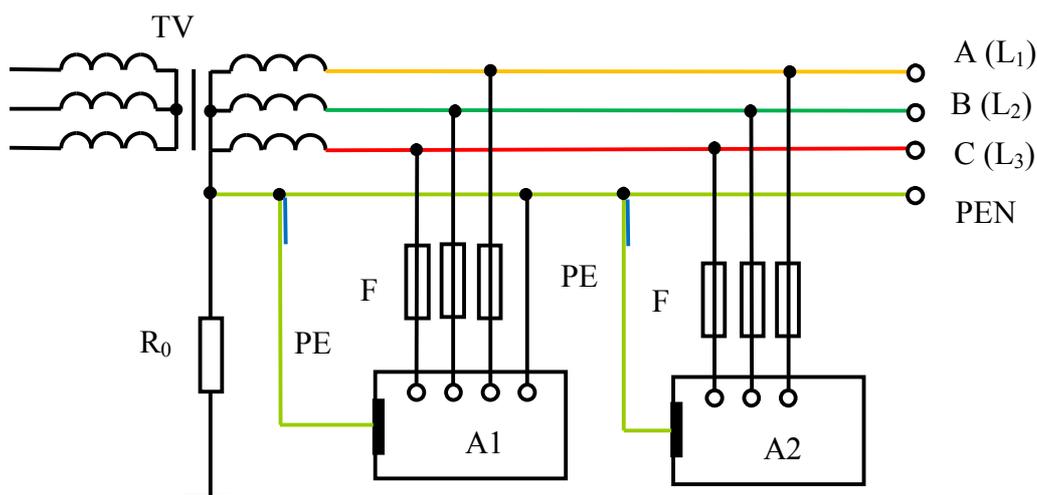
Система *TN-C-S* – функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводников объединены в одном проводнике в части сети.

S (selective – разделённый) – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводника обеспечиваются отдельными проводниками.

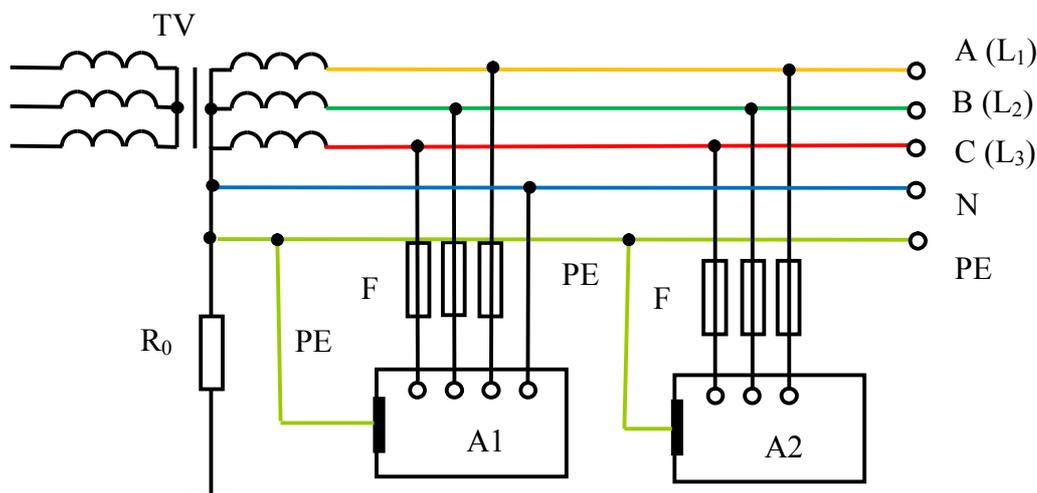
C (complete – общий) – функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников объединены в одном проводнике (PEN-проводник).



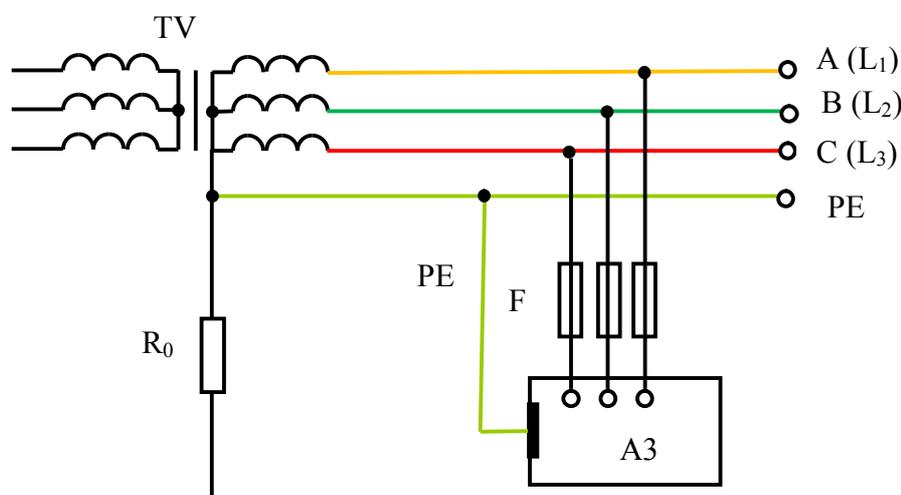
Система *TN-C* – функции нулевого рабочего и нулевого защитного проводников объединены в одном проводнике по всей длине.



Система *TN-S* – нулевой рабочий и нулевой защитный проводники работают отдельно по всей длине сети.



Для симметричной нагрузки



В качестве РЕ-проводников в электроустановках напряжением до 1 кВ могут использоваться:

1) специально предусмотренные проводники:

- жилы многожильных кабелей;
- изолированные или неизолированные провода в общей оболочке с фазными проводами;
- стационарно проложенные изолированные или неизолированные проводники;

2) открытые проводящие части электроустановок:

- алюминиевые оболочки кабелей;
- стальные трубы электропроводок;
- металлические оболочки и опорные конструкции шинпроводов и комплектных устройств заводского изготовления.

3) некоторые сторонние проводящие части:

- металлические строительные конструкции зданий и сооружений (фермы, колонны и т.п.);
- арматура железобетонных строительных конструкций;
- металлические конструкции производственного назначения (подкрановые рельсы, галереи, площадки, шахты лифтов и т.п.).

Не допускается использовать в качестве РЕ-проводников:

- металлические оболочки изоляционных трубок и трубчатых проводов, несущие тросы при тросовой электропроводке, металлорукава, а также свинцовые оболочки проводов и кабелей;

- трубопроводы газоснабжения и другие трубопроводы горючих и взрывоопасных веществ и смесей, трубы канализации и центрального отопления;
- водопроводные трубы при наличии в них изолирующих вставок.

Нулевые защитные проводники цепей не допускается использовать в качестве нулевых защитных проводников электрооборудования, питающегося по другим цепям, а также использовать открытые проводящие части электрооборудования в качестве нулевых защитных проводников для другого электрооборудования, за исключением оболочек и опорных конструкций шинопроводов и комплектных устройств заводского изготовления, обеспечивающих возможность подключения к ним защитных проводников в нужном месте.

Наименьшие площади поперечного 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

Неизолированные PE-проводники должны быть защищены от коррозии. В местах пересечения PE-проводников с кабелями, трубопроводами, железнодорожными путями, в местах их ввода в здания и в других местах, где возможны механические повреждения PE-проводников, эти проводники должны быть защищены.

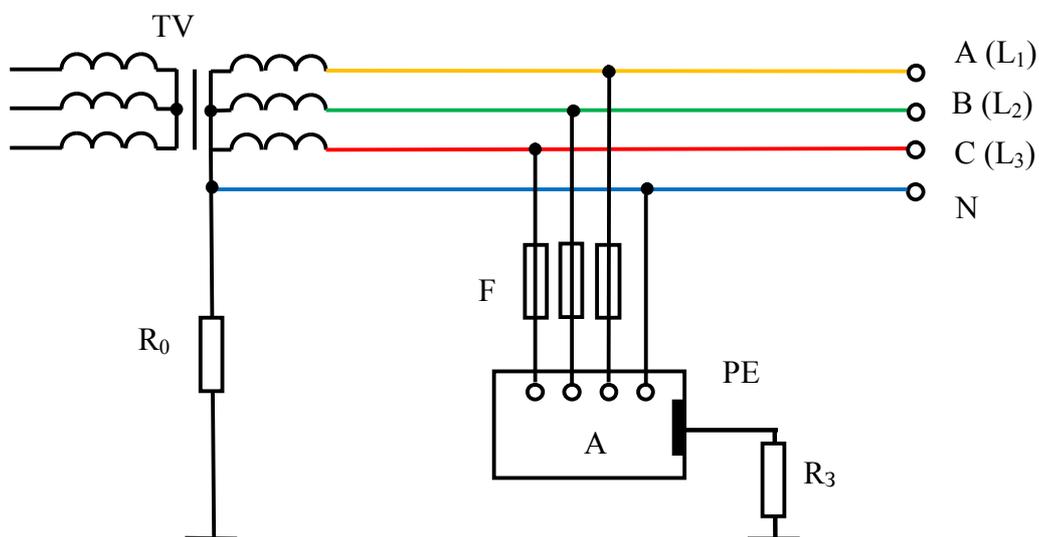
В многофазных цепях в системе TN для стационарно проложенных кабелей, жилы которых имеют площадь поперечного сечения не менее 10 мм² по меди или 16 мм² по алюминию, функции нулевого защитного (PE) и нулевого рабочего (N) проводников могут быть совмещены в одном проводнике (PEN-проводник).

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. Это требование не распространяется на ответвления от ВЛ напряжением до 1 кВ к однофазным потребителям электроэнергии.

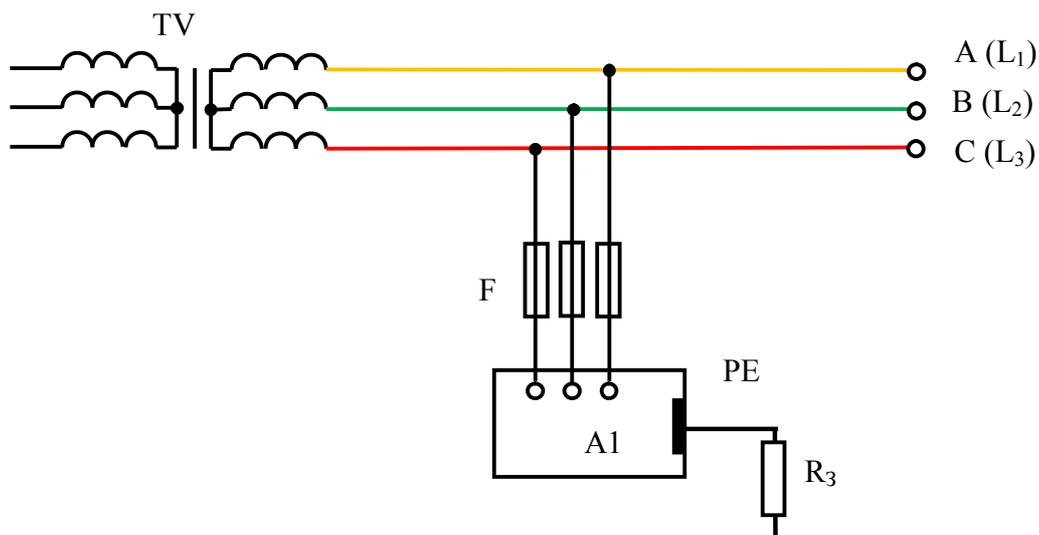
Не допускается использование сторонних проводящих частей в качестве единственного PEN-проводника.

Когда нулевой рабочий и нулевой защитный проводники разделены начиная с какой-либо точки электроустановки, не допускается объединять их за этой точкой по ходу распределения энергии. В месте разделения PEN-проводника на нулевой защитный и нулевой рабочий проводники необходимо предусмотреть отдельные зажимы или шины для проводников, соединённые между собой. PEN-проводник питающей линии должен быть подключен к зажиму или шине нулевого защитного PE-проводника.

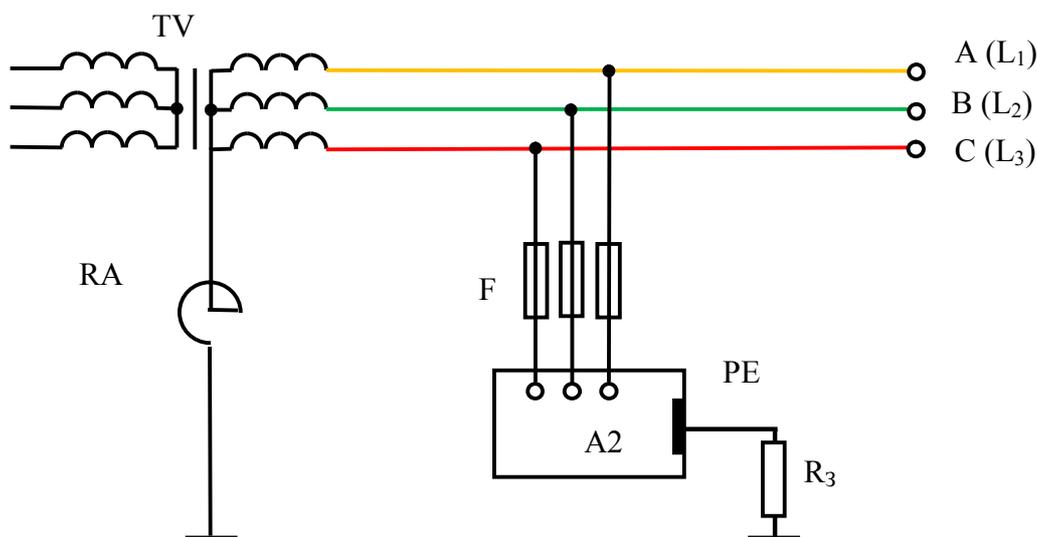
Система заземления TT. Электрическая сеть системы TT имеет точку, непосредственно связанную с землёй, а ОПЧ (корпус ЭУ) заземлены посредством R₃, электрически не связанным с рабочим заземлением нейтрали R₀.



Система заземления *IT*. Электрическая сеть системы *IT* не имеет непосредственной связи токоведущих частей с землёй, а открытые проводящие части ЭУ заземлены. Токоведущие части сети изолированы от земли – отделены воздушным промежутком или устройством с большим сопротивлением, на несколько порядков большим, чем R_0 .



В изолированных системах с дугогасящим реактором



Использование систем *IT* ограничивается специальным применением в тех производствах, где перерыв электроснабжения может быть опасен (взрывоопасные производства).

В электроустановках, в которых в качестве защитной меры применено автоматическое отключение питания, должно быть выполнено уравнивание потенциалов.

Уравнивание потенциалов – электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов.

Основная система уравнивания потенциалов в электроустановках до 1 кВ должна соединять между собой следующие проводящие части:

- ✓ нулевой защитный *PE*- или *PEN*-проводник питающей линии в системе *TN*;
- ✓ заземляющий проводник, присоединённый к заземляющему устройству электроустановки, в системах *IT* и *TT*;
- ✓ заземляющий проводник, присоединённый к заземлителю повторного заземления на вводе в здание (если есть заземлитель);
- ✓ металлические трубы коммуникаций, входящих в здание: горячего и холодного водоснабжения, канализации, отопления, газоснабжения и т.п. (Если трубопровод газоснабжения имеет изолирующую вставку на вводе в здание, к основной системе уравнивания потенциалов

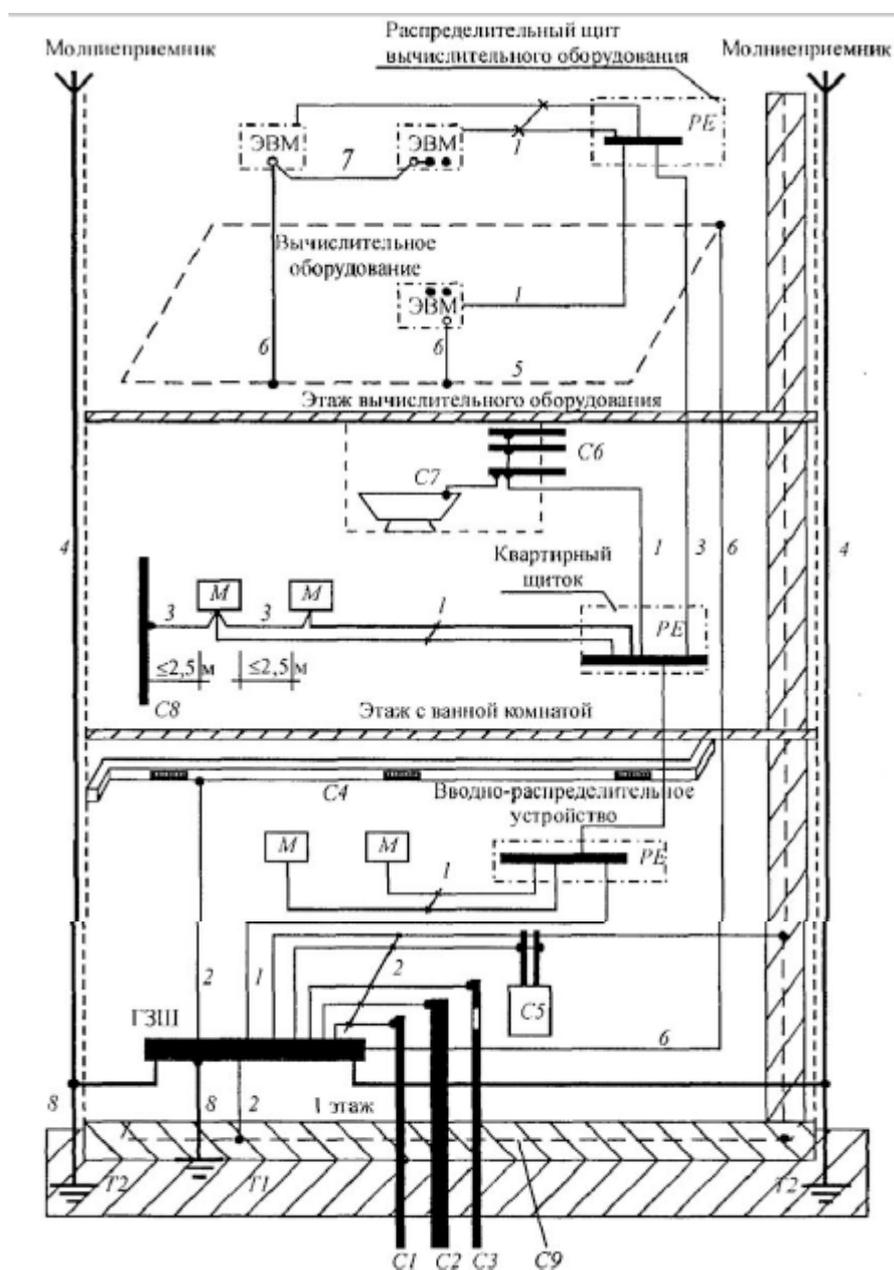
присоединяется только та часть трубопровода, которая находится относительно изолирующей вставки со стороны здания);

- ✓ металлические части каркаса здания;
- ✓ металлические части централизованных систем вентиляции и кондиционирования. При наличии децентрализованных систем вентиляции и кондиционирования металлические воздуховоды следует присоединять к шине PE щитов питания вентиляторов и кондиционеров;
- ✓ заземляющее устройство системы молниезащиты 2-й и 3-й категорий;
- ✓ заземляющий проводник функционального (рабочего) заземления, если имеется и отсутствуют ограничения на присоединение сети рабочего заземления к заземляющему устройству защитного заземления;
- ✓ металлические оболочки телекоммуникационных кабелей.

Проводящие части, входящие в здание извне, должны быть соединены как можно ближе к точке их ввода в здание.

Для соединения с основной системой уравнивания потенциалов все указанные части должны быть присоединены к главной заземляющей шине при помощи проводников системы уравнивания потенциалов.

Система уравнивания потенциалов в здании



М – открытая проводящая часть; С1 – металлические трубы водопровода, входящие в здание; С2 – металлические трубы канализации, входящие в здание; С3 –

металлические трубы газоснабжения с изолирующей вставкой на вводе, входящие в здание; С4 – воздухопроводы вентиляции и кондиционирования; С5 – система отопления; С6 – металлические водопроводные трубы в ванной комнате; С7 – металлическая ванна; С8 – сторонняя проводящая часть в пределах досягаемости от открытых проводящих частей; С9 – арматура железобетонных конструкций; ГЗЩ – главная заземляющая шина; Т1 – естественный заземлитель; Т2 – заземлитель молниезащиты; 1 – нулевой защитный проводник; 2 – проводник основной системы уравнивания потенциалов; 3 – проводник дополнительной системы уравнивания потенциалов; 4 – токопровод системы молниезащиты; 5 – контур (магистраль) рабочего заземления в помещении информационно-вычислительного оборудования; 6 – проводник рабочего (функционального) заземления; 7 – проводник уравнивания потенциалов в системе рабочего (функционального) заземления; 8 – заземляющий проводник

Для автоматического отключения питания могут быть применены защитно-коммутационные аппараты, реагирующие на сверхтоки или на дифференциальный ток.

Допускается применение УЗО, реагирующих на дифференциальный ток. В случае необходимости применения УЗО для защиты отдельных электроприёмников, получающих питание от системы TN-C, защитный РЕ-проводник электроприёмника должен быть подключен к PEN-проводнику цепи, питающей электроприёмник, до защитно-коммутационного аппарата.

В качестве естественных заземлителей могут быть использованы:

- ✓ металлические конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землёй, в том числе железобетонные фундаменты зданий и сооружений, имеющие защитные гидроизоляционные покрытия в неагрессивных, слабоагрессивных и среднеагрессивных средах;
- ✓ металлические трубы водопровода, проложенные в земле;
- ✓ другие находящиеся в земле металлические конструкции и сооружения.

Не допускается использовать в качестве заземлителей трубопроводы горючих жидкостей, горючих и взрывоопасных газов и смесей, трубопроводы канализации и центрального отопления. Указанные ограничения не исключают необходимости присоединения таких трубопроводов к заземляющему устройству с целью уравнивания потенциалов.

Искусственные заземлители могут быть из чёрной или оцинкованной стали или медными. Искусственные заземлители не должны иметь окраски. Материал и наименьшие размеры заземлителей должны соответствовать, приведённым в таблице.

Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников, проложенных в земле

Материал	Профиль сечения	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Толщина стенки, мм
Сталь черная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	16	–	–
	для горизонтальных заземлителей	10	–	–
	Прямоугольный	–	100	4
	Угловой	–	100	4
	Трубный	32	–	3,5
Сталь оцинкованная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	12	–	–
	для горизонтальных заземлителей	10	–	–
	Прямоугольный	–	75	3
	Трубный	25	–	2
Медь	Круглый	12	–	–
	Прямоугольный	–	50	2
	Трубный	20	–	2
	Канат многопроволочный	1,8	35	–

4.5. Релейная защита

В процессе эксплуатации электрических установок могут возникнуть перегрузки отдельных участков сети, короткие замыкания, резкие понижения напряжения и другие ненормальные режимы работы электросетей. Сверхтоки перегрузки и коротких замыканий приводят к опасным перегревам проводников и аппаратов, к их повреждению, возникновению электрической дуги. Резкое снижение напряжения в сети может привести к нарушению устойчивости работы электрической системы или её узлов. Чем дольше не отключен неисправный элемент сети, тем серьезней и в большем объёме могут быть повреждения оборудования. Поэтому в каждой электрической установке необходимо обеспечить быстрое автоматическое отключение повреждённого участка, сохранив в работе все остальные части системы.

Для этой цели предназначена **релейная защита**, представляющая собой комплект специальных устройств, обеспечивающих автоматическое отключение повреждённой части электрической сети или установки. Если повреждение не представляет для установки непосредственной опасности, то релейная защита должна обеспечить сигнализацию о неисправности. Специальные аппараты, обеспечивающие автоматическое воздействие на устройства отключения или сигнализации при нарушении нормального режима работы электроустановки, называются **реле**.

Реле могут контролировать напряжение, ток, мощность, сопротивление и другие параметры электрической сети. При отклонении контролируемого параметра от заданного значения реле срабатывает и замыкает цепь соответствующих выключателей, которые отключают повреждённый элемент или участок сети.

Релейная защита должна обеспечивать быстроту и избирательность действия, надёжность работы и чувствительность. Кроме того, стоимость релейной защиты должна быть по возможности небольшой.

Быстрота действия релейной защиты предотвращает расстройство функционирования системы и нарушение нормальной работы приёмников при коротком замыкании и значительных понижениях напряжения. По времени действия релейные защиты можно разделить на быстродействующие (полное время отключения составляет примерно 0.06...2 с, что соответствует 2...10 периодам изменения тока) и с выдержкой времени (специально создаётся замедление действия).

Избирательность действия релейной защиты в выявлении повреждённого участка и его отключении; при этом неповреждённая часть электроустановки остаётся в работе.

Надёжность работы релейной защиты заключается в её правильном и безотказном действии во всех предусмотренных случаях. Она обеспечивается применением высококачественных реле и современных схем защиты, тщательным выполнением монтажа и квалифицированными эксплуатацией и обслуживанием защитных устройств.

Чувствительностью релейной защиты называют её способность реагировать на самые малые изменения контролируемого параметра. Благодаря этому уменьшаются разрушения повреждённого элемента и быстро восстанавливаются нормальные условия работы неповреждённой части установки. Чувствительность всех видов защиты оценивают коэффициентом чувствительности, значение которого нормируется ПУЭ.

Все реле по назначению различают на следующие типы:

основные – непосредственно воспринимают изменение электрических параметров (тока, напряжения, мощности, частоты и др.);

вспомогательные – выполняют в схемах защиты дополнительные функции (например, выдержки времени, передачи команды от одних реле к другим, воздействия на выключатели и т.п.);

указательные – реагируют на действие защиты (сигнализируют о срабатывании других реле).

В зависимости от характера изменения параметра, вызывающего срабатывание реле, различают следующие типы реле:

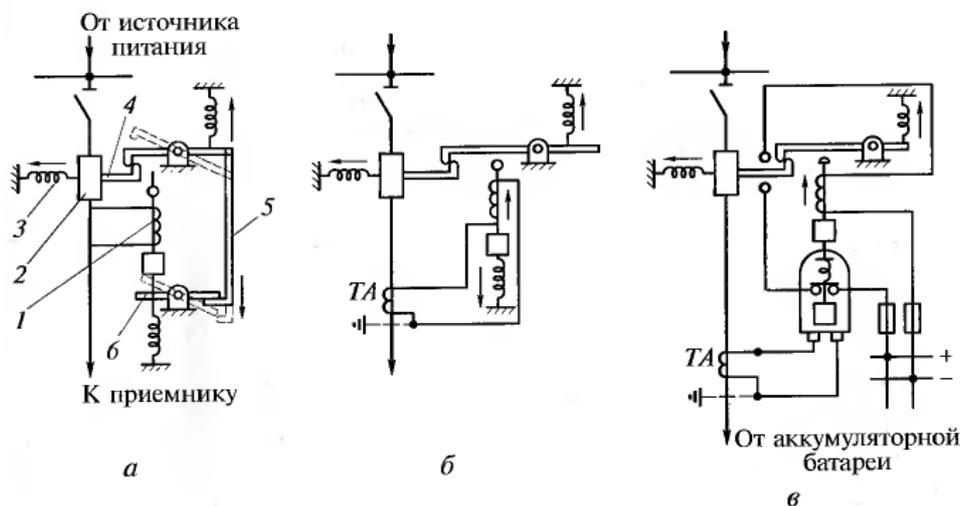
максимального действия – срабатывают, когда электрический параметр превышает определённое, заранее установленное значение;

минимального действия – срабатывают, когда электрический параметр становится менее определённого, заранее установленного значения;

дифференциального действия – реагируют на разность значений электрического параметра.

По способу воздействия на выключающий аппарат различают реле *прямого* и *косвенного* действия, а по способу присоединения к основной цепи – *первичные* и *вторичные*.

Схема максимальной защиты



а – с электромагнитным первичным реле прямого действия. При превышении током установленного значения стальной сердечник *1* втягивается в катушку и поворачивает рычаг *б*, который перемещает вниз тягу *5*. Тяга освобождает защёлку *4*, и выключатель *2* под действием пружины *3* отключается. Для таких реле не требуется наличия источника оперативного тока, но их существенный недостаток заключается в том, что для освобождения защёлки выключателя необходимо значительное механическое усилие, вследствие чего они не обладают необходимой точностью и чувствительностью. Применяют в сетях напряжением до 1000 В.

б – с вторичным реле прямого действия. Обмотки реле включаются в цепь через измерительный трансформатор тока ТА. Такие реле имеются, например, в автоматических приводах масляных выключателей.

в – с вторичным реле косвенного действия. Не оказывают непосредственного механического воздействия на отключающий механизм выключателя, а подают электрический импульс в отключающую катушку. Имеют небольшие размеры и высокую чувствительность, поскольку по их катушкам обычно протекает малый ток срабатывания, а работа, выполняемая исполнительным органом невелика. Настройка вторичных реле не требует отключения защитного элемента. Недостатком схемы защиты с вторичным реле косвенного действия является необходимость применения трансформаторов тока и источников оперативного тока. В качестве оперативного используется как постоянный, так и переменный ток. Постоянный ток применяют в схемах релейной защиты, поскольку при этом обеспечивается высокая надёжность их работы, независимо от состояния цепей переменного тока. Источником постоянного тока обычно является аккумуляторная батарея. Схемы релейной защиты на переменном оперативном токе отличаются простотой и малой стоимостью.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на *контактные* и *бесконтактные*.

По принципу работы электрические реле подразделяются на *электромагнитные*, *индукционные*, *электродинамические*, *магнитоэлектрические* и *тепловые*.

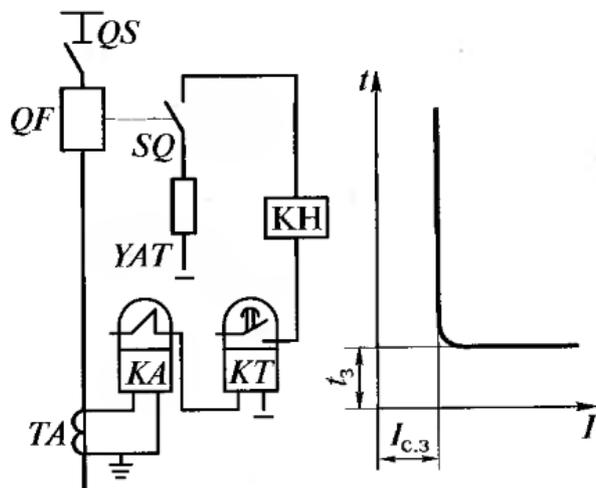
Для защиты от междуфазных коротких замыканий широко применяют максимальные токовые защиты и токовые отсечки. Их используют также для защиты от однофазных замыканий на землю.

Максимальной токовой защитой называют защиту, действующую в случаях, когда ток в защищаемой цепи превышает значение, равное максимальному рабочему току этой цепи. Такая защита является наиболее надёжной, дешевой и простой по выполнению. Её применяют для

защиты кабельных и воздушных линий при одностороннем их питании, генераторов, трансформаторов, высоковольтных электродвигателей.

Максимальная токовая защита относится к защитам с выдержкой времени. Её обычно выполняют с помощью электромагнитных реле максимального тока и времени.

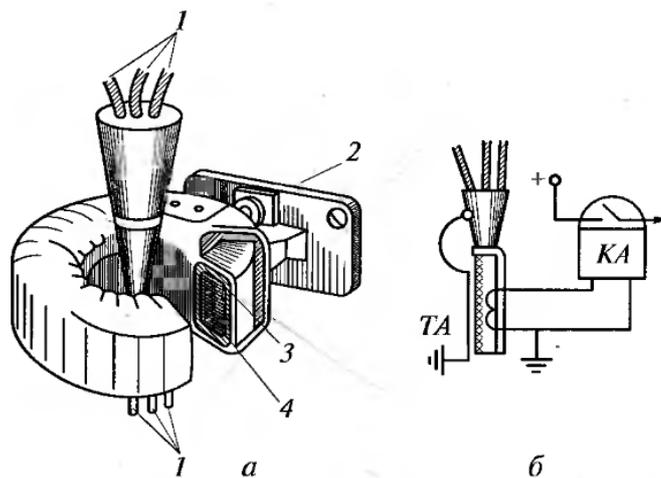
Принципиальная однолинейная схема и характеристика максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени



В нормальном режиме работы защищаемого звена контакты реле максимального тока KA и реле времени KT разомкнуты. При увеличении тока в обмотке реле KA до определённого значения $I_{с.з.}$ (ток срабатывания защиты) оно срабатывает и замыкает своими контактами цепь обмотки реле времени KT . Последнее приходит в действие и через заданную выдержку времени замыкает контактами цепь постоянного тока отключающей катушки YAT привода выключателя QF . В результате выключатель отключается. В оперативной цепи постоянного тока находятся блок-контакты SQ привода выключателя QF . Если бы этих блок-контактов не было, контакты реле KT размыкались бы при наличии тока в цепи отключающей катушки привода, вследствие чего могли бы быть повреждены из-за недостаточной мощности на размыкание. Время действия защиты t_3 зависит от времени срабатывания реле KT и не зависит от тока в обмотке токового реле KA , поэтому такую защиту называют *защитой с независимой выдержкой времени*. Указательное реле KH является вспомогательным и служит для сигнализации срабатывания реле.

В радиальных сетях с односторонним питанием максимальную токовую защиту выполняют с питающей стороны каждой линии. При этом для обеспечения селективности отключения выдержку времени защиты подбирают по ступенчатому принципу, согласно которому у каждой последующей защиты, считая по направлению к источнику питания, выдержку времени принимают на ступень времени больше, чем у предыдущей.

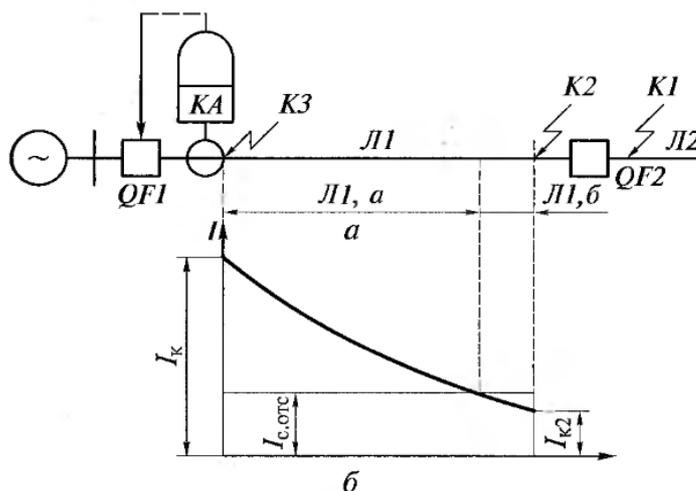
Рассмотрим пример выполнения защиты от однофазного короткого замыкания на землю кабельной сети напряжением 6 (10) кВ с заземлённой нейтралью.



Действие защиты основано на том, что в нормальном режиме суммарный магнитный поток, создаваемый трёхфазной системой токов в жилах кабеля, равен нулю. При замыкании на землю одной из фаз I кабеля симметрия токов нарушается и возникает магнитный поток в магнитопроводе 4, который наводит ЭДС в обмотке 3 трансформатора тока TA . В результате в цепи реле KA появляется ток и реле срабатывает.

Токовая отсечка может быть быстродействующей или с выдержкой времени (0,5...1 с). В отличие от максимальной токовой защиты отсечка заранее ограничивается зоной действия. Это делается для обеспечения селективности (избирательности действия), которая достигается путём выбора тока срабатывания отсечки, а не выдержки времени, как при максимальной токовой защите.

Принципиальная схема линии и характеристики, поясняющие принцип действия токовой отсечки с односторонним питанием



Известно, что ток короткого замыкания в линии определяется значением сопротивления от источника питания до места повреждения и уменьшается с удалением последнего. Наименьший ток короткого замыкания возникает при повреждении в конце линии (в точке $K1$), а наибольший – в её начале (в точке $K3$). Токовое реле KA отсекает от тока короткого замыкания $I_{к2}$, который численно равен току короткого замыкания при повреждении в точке $K2$. Ток срабатывания токовой отсечки $I_{с.отс}$ принимают больше $I_{к2}$:

$$I_{с.отс} = K_n I_{к2},$$

где K_n – коэффициент надёжности, принимаемый равным 1,2...1,5

При токе срабатывания $I_{с.отс}$ токовая отсечка действует только при коротком замыкании на отрезке LI, a и не действует на отрезке LI, b участка LI линии, а также вне этого участка, например, на участке линии $LI2$. Следовательно, токовая отсечка защищает не всю, а только часть линии.

Избирательность максимальной токовой защиты обеспечивается только в радиальных сетях с односторонним питанием, в то время как токовая отсечка может применяться в сети любой конфигурации с любым источником питания. Существенным недостатком токовой отсечки без выдержки времени является то, что она защищает только часть линии, а поэтому не может служить основной защитой линии.