## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ

## В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### 1.1. Системы электрических сетей

Системы электроснабжения классифицируются Международ­ной электротехни­ческой комиссией (МЭК) в за­висимости от способа заземления распределительной сети и применяемых 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, питающие здания и соору­жения, в зависимости от конфи­гурации токоведущих про­водников, и видов 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;

**Т** *(tеrra* – *земля*) показывает, что токоведущие про­водники хотя бы одной точкой связаны с землей (заземлён­ные сети).

Вторая буква характеризует связь с землей откры­тых проводящих частей (ОПЧ):

**Т** показывает, что ОПЧ связаны с землёй (за­землены);

**N** *(пеutral* – *нейтральный*) показывает, что ОПЧ связаны с зазем­ленной точкой сети по­средством нулевого рабочего (N) или нулевого за­щитного (РЕ) проводников, при этом предполагается, что возможно со­вмещение в одном проводнике нулевого рабочего и нулевого защитного про­водников (РЕN).

Последующие буквы (если таковые имеются) характери­зуют устрой­ство нулевого рабо­чего и нулевого защитного проводников:

**S** *(se1еctivе* – *разделенный*) – функции нулевого за­щитного и нулевого рабочего проводни­ков обеспечиваются раздельными проводниками;

**С** *(сотрletе* – *общий*) – функции нулевого защитного и нулевого рабо­чего проводников объ­единены в одном про­воднике (РЕN-проводник).

*Открытые проводящие части* (ОПЧ) — это проводящие нетокове­дущие части элек­тро­установки, доступные для прикосновения, которые могут ока­заться под напряжением при на­рушении изоляции токоведущих час­тей (ТВЧ).

Первая буква I означает, что все ТВЧ изолированы от земли, либо одна точка сети связана с землей через сопротивление, через разрядник или воздуш­ный промежуток.

Система с изо­лированной нейтралью повсюду постепенно заменя­ется трёхфазной сис­темой 230/400 *В* с заземленной нейтралью. Исполь­зование системы IТ ограничивается спе­циальным примене­нием в тех производствах, где перерыв в работе системы элек­троснабже­ния может быть опасен, например взрывоопасные производства.

Первая буква Т указывает на прямую связь, по меньшей мере, одной точки сети с землей*.* Например, питае­мая от вторичной обмотки транс­форматора, соединённой в звезду, трёхфазная распределительная сеть 127/220 *В* или 220/380 *В* с нулевым про­водни­ком с нейт­ралью, соеди­нённой с землёй через заземляющее устройство.

*Вторая буква* (Т или N) означает тип соединения между ОПЧ, за­щитным заземляю­щим проводником и землей. Вторая буква Т означает прямое соединение между ОПЧ и зем­лёй, независимое от системного заземления. Вторая буква N означает прямое соединение ОПЧ с заземлённой точкой (точ­ками) сети посредст­вом РЕN- или РЕ-проводника.

**Система TN .** Питающие сети системы ТN имеют непосредственно при­соединённую к земле точку. Открытые проводящие части электроустановок (ЭУ) присоеди­няются к этой точке посредством ну­левых за­щитных проводников.

В зависимости от устройства нулевого рабочего и нулево­го защитного проводников (НРП и НЗП соответственно) раз­личают несколько типов сис­тем заземления электриче­ских сетей.

**Система TN-C-S** – функции нулевого рабочего и нулево­го защит­ного проводников объе­динены в одном проводнике в начальной части электрической сети (см. рис. 1).



Рис. 1. Электрическая сеть с системой заземления TN-C-S

R0 – параметр (сопротивление) рабочего заземления нейтрал

 сети (на подстанции);

А1 и А2 – ОПЧ (корпуса) электроустановок;

F – предохранители;

TV – трансформатор электрической питающей подстанции

**Система TN-C**– функции НРП и НЗП проводников объеди­нены в одном проводнике по всей длине (см. рис. 2).

 

Рис. 2. Электрическая сеть с системой заземления TN-C

**Система TN-S**– нулевой рабочий и нулевой защитный про­водники работают раздельно по всей длине сети (рис. 3).



Рис. 3. Электрическая сеть с системой заземления TN-S

**Система IТ.** Электрическая сеть системы IТ не имеет непосредствен­ной связи ТВЧ с землей, а открытые проводящие части ЭУ заземлены. Первая буква I означает, что токове­дущие про­водники (части) сети изолированы от земли, т. е. отделены воздушным промежут­ком (см. рис. 4).

 

Рис. 4. Электрическая сеть с системой заземления IT

Электрические сети с рабочими напряжениями до 1 *кВ* могут вы­пол­няться с заземлен­ной нейтралью (системы заземления ТN-С, ТN-С-S, ТN-S) или с изолированной нейтралью (сис­тема заземления IТ).

В четырёхпроводных сетях трёхфазного тока и трёхпроводных сетях постоянного тока заземление нейтрали или средней точки источников тока (система заземления ТN-С) явля­ется обязательным.

### 1.2. Общие требования к защитному заземлению и защитному занулению

В общем случае заземлением называется преднамеренное электриче­ское соединение ка­кой-либо точки сети ЭУ или обо­рудования с заземляю­щим устройством (ЗУ).

*Защитным заземлением* называется заземление, выпол­ненное с це­лью обеспечения электробезопасности (ЭБ).

*Рабочим заземлением* называется заземление какой-либо точки или точек токоведущих частей ЭУ, выполняемое для обеспечения работы ЭУ (не в целях ЭБ), например глухое зазем­ление нейтрали.

*Защитным занулением* в ЭУ с напряжениями до 1 *кВ* назы­вается предна­меренное соедине­ние ОПЧ с глухозазёмленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трёхфаз­ного тока, с глухозаземлённым выводом источника однофаз­ного тока, с заземленной точкой источ­ника в сетях по­стоян­ного тока, выполняемое в целях ЭБ.

В ЭУ до 1 *кВ* с глухозаземлённой нейтралью или глухоза­землённым выводом источ­ника однофазного тока для защи­ты людей от поражения током при замыкании на корпус дол­жно быть выполнено защитное зану­ление (см. рис. 5).

Оптимальная система защиты для сетей с номинальным напряже­нием 220/400 *В* дос­тигается при использовании защитного зануления (система заземления ТN). Это объяс­ня­ется тем,что потенциал доступных для прикосновения проводящих частей (ОПЧ) при повреждении изоляции значительно ниже напряжения сети по от­ношению к земле, а вероятность отключения ЭУ при повреждении её изо­ляции с помо­щью устройств защиты от сверхтока достаточ­но высока.

Система заземления ЭС типа ТN обеспечивает удобст­во питания ЭУ при одновременном обеспечении экономич­ности.

Такая система обеспечивает защиту от поражения элект­рическим то­ком, перенапряже­ний и возгораний, вызывае­мых повреждением изоляции, при возможных нежелатель­ных от­ключениях.

Для систем с напряжением на корпусах ЭУ по отношению к земле более 150 *В* защита при повреждении изоляции обязательна. При напря­жении 150 *В* сопротивление кожи практичес­ки не оказывает заметного влия­ния на общее сопротивле­ние тела человека. В этом случае должно применяться оборудо­вание только класса I или класса II.

Переносное оборудование может быть класса 0, хотя час­то исполь­зуется и класс II. Обо­лочка оборудования класса 0 часто выполняется из изоляционного материала, что повы­шает его ЭБ.

Классы электрооборудования (ЭО) по электробезопасности:

* оборудование класса I определяется как ЭО, имеющее основную изоля­цию и снабженное контактом для присоеди­нения нулевого за­щитного РЕ-проводника к ОПЧ;
* оборудование класса II обеспечивается двойной изоля­цией, содержа­щей основную и дополнительную изоляции, или усиленной изоля­цией;
* оборудование класса III определяется оборудова­нием, в котором за­щита от поражения электрическим током в случае повреждения изо­ляции обеспечивается питанием от сети с безопасным сверхнизким напряжением [6], имеющей основную изоляцию для за­щиты ТВЧ;
* оборудование класса 0 имеет единственную изоляцию, к его ОПЧ (кор­пусам) не предусмотрено подключение НЗП.

В электросетях с изолированной нейтралью (система IT) с целью обеспечения электробезопасности применяется защитное заземление (рис. 3).

В заземлённых электрических сетях с напряжениями до 1 *кВ* (система заземления ТN) запрещается применять защитное заземление в качестве единственной меры защиты от замы­кания тока на корпус (ОПЧ) ЭУ, но разрешается исполь­зовать его в качестве дополнения к защитному зануле­нию (рис. 5).

Защитное заземление или защитное зануление ОПЧ элек­троустано­вок следует выполнять:

* при номинальном напряжении выше 50 *В* переменного тока и выше 120 *В* постоянного тока – во всех ЭУ;
* при номинальных напряжениях выше 25 *В*, но ниже 50 *В* перемен­ного тока и выше 60 *В*, но ниже 120 *В* посто­янного тока – только в поме­щениях с повышенной опасностью, особо опасных помещениях и в на­ружных уста­новках.

В ЭУ с напряжениями до 1 кВ с заземлённой нейтралью обязательно должно выполняться защитное зануление (система заземления типа TN). Приме­нение в таких ЭУ заземления корпусов электроприёмников без их за­щитного зануления (система заземления ТТ) не допус­кается.



Рис. 5. Защитное зануление в сочетании с защитным заземлением

Для ЭУ с напряжениями до 1 *кВ* переменного тока с изолированной нейтралью (система IТ) в качестве защитной меры следует применять защитное за­земление в сочетании с контролем изоляции сети или защитное отключе­ние.

### 1.3. Требования к устройству и применению заземлителей, заземляющих и защитных проводников

Заземлители должны быть связаны с магистралями за­землений не менее чем двумя проводниками, присоединён­ными к заземлителю в разных местах. В качестве заземлителей могут быть использованы нахо­дящиеся в соприкосновении сземлёй металлические стерж­ни или трубы; металличе­ские полосы; ме­таллические плиты, пластины или листы; железобетонные фундаменты; стальная арматура железобетона; стальные тру­бы водопровода в земле; другие подземные сооружения.

Материал и наименьшие размеры заземлителей должны соответство­вать приведенным в табл. 1.

*Заземляющим проводником* (ЗП) называется проводник, соединяю­щий заземляемые части с заземлителем.

*Защитным проводником* называется проводник в ЭУ с напряже­ниями до 1 *кВ*, соединяющий заземляемые части (ОПЧ) с главным зазем­ляющим зажимом или шиной.

*Главная заземляющая шина –* это шина, являющаяся частью заземляющего устройства (ЗУ) элек­троустановок с напряжениями до 1 *кВ* и предназначенная для электри­ческого присоединения нескольких проводников с целью заземления.

Главная заземляющая шина может быть выполнена внут­ри вводного устройства ЭУ с напряжениями до 1 *кВ* или от­дельно от него. В качестве главной заземляющей шины внутри вводного устройства следует использо­вать шину – РЕ. При этом сечение отдельно ус­тановленной главной зазем­ляющей шины должно быть не менее сечения РЕ (РЕМ)-проводника пи­тающей линии. Главная заземляющая шина должна быть, как правило, медной. Допускается применение главной заземляющей стальной шины.

Таблица 1

Наименьшие размеры заземлителей, про­ложенных в земле

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Профиль сечения | Диаметр*, мм* | Площадь поперечного сечения, *мм2* | Толщина стенки,*мм* |
| Сталь чёрная |  Круглый:– для вертикальныхзаземлителей– для горизонтальных за­землителей Прямоугольный Угловой Трубный | 1610––32 | ––100100– | ––443,5 |
| Стальоцинко­ван­ная |  Круглый:– для вертикальных заземлителей– для горизонтальных заземлителей Прямоугольный Трубный | 1210–25 | ––75– | 3 2 |
| Медь |  Круглый Прямоугольный Трубный | 12–20 | –50– | –22 |

*Проводник основной системы уравнивания потенциа­лов* — это проводник, электрически соединяющий проводя­щие части друг с другом для достижения на них равных потенциалов.

*РЕN-проводник* — это проводник в ЭС системы заземле­ния ТN, кото­рый одновременно выполняет функции нуле­вого защитного (РЕ) и нуле­вого рабочего (N) проводников.

### 1.4. Конструктивное исполнение искусственных заземляющих устройств

*Искусственные заземлители* применяются тогда, когда естественные заземлители не обеспечивают требуемую ве­личину сопротивления за­земления или напря­жения прикосновения. Для искусственных заземлите­лей применяют вертикаль­ные и горизонтальные неокрашенные элек­троды. В каче­стве вертикальных электродов прутковую сталь диаметром не менее 10 *мм* или угловую сталь с толщиной пол­ки уголка не менее 4 *мм*. Горизонтальные заземлители используют для гальвани­че­ского соединения между собой вертикальных заземлите­лей, а также само­стоятельно. Для этих целей применяют полосовую сталь сечением не ме­нее 48 *мм* и сталь круглого сечения диаметром не менее 6 *мм*.

Для установки *вертикальных заземлите­лей* роют траншею (рис. 6). Верхние концы по­груженных в землю вертикаль­ных электродов соединяют сваркой стальной полосой. В таких же траншеях прокладывают и горизон­таль­ные электроды. Заземляющие устройства не должны иметь ок­раски, кроме мест сварных соединений заземлителей.

В случае опасности повышенной корро­зии для заземли­телей рекомендуется использо­вать сталь только круглого про­филя и большего сечения. При повышен­ной коррозии могут при­меняться также оцинкован­ные или омед­нённые зазем­лители.

Рис. 6. Вертикальный заземлитель в траншее

Глубина прокладки *горизонталь­ных заземли­телей* должна быть не менее 700-800 мм.

## 2. УПРОЩЁННЫЙ РАСЧЁТ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

1. В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) устанавливают необходимое сопротивле­ние заземления ***R3***.

2. Определяют путём замера или расчёта возможное сопротивление растеканию естествен­ных заземлителей ***Rе***.

3. Если ***Rе*** *<* ***R3****,* то устройство искусственного заземления
не требуется. Если ***Rе*** *>* ***R3****,* то необходимо устройство искусственного за­земления:

Rи = R3Rе (R3 – Rе)-1 .

4. По табл. 2 и 3 определяют удельное сопротивление ***ρ*** грунта, ко­эффициент сезонности, зависящий от климатических зон и вида заземлителя, и определяют расчётное удельное сопротивление грунта за­землителей, *Ом·м*:

ρрасч = kс ρ ,

где ***kс*** – коэффициент сезонности.

5. Установив характер расположения заземления (в ряд или контур), определяют число вертикальных заземлителей:

nв = Rв(ηвRи)-1 ,

где ***ηв*** – коэффициент использования вертикальных заземлителей (опреде­ляется по табл. 4 и 5), где ***a*** – расстояние между электродами.

При устройстве простых заземлителей (короткий ряд вер­тикальных стержней) расчёт на этом заканчивают, не учи­тывая проводимость со­единяющей полосы, так как длина её невелика.

Т а б л и ц а 2

Приближённые значения удельного сопротивления *ρ* грунтов и воды

|  |  |
| --- | --- |
| Грунт и вода | Возможные пределы колебаний, *Ом·м* |
| ГлинаСуглинокПесокСупесокТорфЧернозёмСадовая земляКаменистый грунтВода: речная прудовая грунтовая | 8 – 7040 – 150400 – 700150 – 40010 – 309 – 5330 – 60500 – 80010 – 10040 – 5020 – 70 |

Т а б л и ц а 3а

Климатические зоны

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Характеристики климатиче­ских зон | I | II | III | IV |
| Средняя многолетняя тем­пература низшая (январь) | От –20 °С до –15°С | От –14 °С до –10 °С | От 0 °С до 0 °С | От 0 °Сдо +5 °С |
| Средняя многолетняя тем­пература высшая (июль) | От +16 °С до +18 °С | От +18 °Сдо +22 °С | От +22 °С до +24 °С | От +24 °С до +26 °С |
| Среднегодовой уровень осадков, *мм* | ~400 | ~500 | ~5000 | 300 – 500 |
| Продолжительность замер­зания вод (дней) | 190 – 170 | 150 | 100 | 0 |

Т а б л и ц а 3б

Коэффициент сезонности

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Климатические зоны | I | II | III | IV |
| ***kс*** стержневых элек­тродов(*l* = 2 – 3 *м*, глуби­на заземления 0,5 – 0,8 *м*) | 1,8 – 2 | 1,5 – 1,8 | 1,4 – 1,6 | 1,2 – 1,4 |
| ***kс*** горизонтальных элек­тродов на глубине 0,8 *м* | 4,5 – 7,0 | 3,5 – 4,5 | 2,0 – 2,5 | 1,5 – 2,0 |
| ***kс*** при длине стержней 5*м* и глубине заземления 0,7 – 0,8 *м* | 1,35 | 1,25 | 1,15 | 1,1 |

6. Определение сопротивления растеканию одного вертикального за­землителя (рис. 6) осуществляется по формуле

где ***lв*** – длина вертикального электро­да, *м*; ***t*** – глубина заложения, равная рас­стоянию от поверхности земли до середины электрода, *м*; ***d***– диаметр круглого стержневого электрода, *м*. Формула справедлива при (***lв*** >> ***d***, ***t0*** > 0,5 *м* – рис.8).

Для уголковых электродов формулы упрощаются [6]:

* для уголка с профилем 50×50×5 *мм* – ***Rв*** = 0,348 ***ρрасч***;
* для уголка с профилем 60×60×6 *мм* – ***Rв*** = 0,298 ***ρрасч***;
* для уголка с профилем 75×75×8 *мм* – ***Rв*** = 0,348 ***ρрасч***;

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты использования вертикальных заземлителей из труб, угол­ков или стержней, размещенных в ряд

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Отношение расстояния ме­жду электродами к их длине (*a/lв*) | Число электродов | *ηв*  |
| 1 | 235101520 | 0,84-0,870,76-0,800,67-0,720,56-0,620,51-0,560,47-0,50 |
| 2 | 235101520 | 0,50-0,920,85-0,880,79-0,830,72-0,770,66-0,730,65-0,70 |
| 3 | 235101520 | 0,93-0,950,90-0,920,85-0,880,79-0,830,76-0,800,74-0,79 |

При устройстве контурных заземлителей (рис. 7, рис. 8) необходимо учи­тывать и сопротивление растеканию полос горизонтального заземли­теля ***Rг****.* На площади размещения ЗУ намечают, как будут разме­щены верти­кальные заземлители с учётом их числа ***пв****,* и опре­деляют длину соедини­тельной полосы:

lг = 1,05пва,

где ***а***– расстояние между заземлителями, его обычно при­нимают как соотношение ***a/lв***, заведомо равное 1, 2, 3.

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты использования вертикальных заземлителей из труб, угол­ков или стержней, размещенных по контуру

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Отношение расстояния ме­жду электродами к их длине (*a/lв*) | Число электродов  | ηв |
| 1 | 204060100 | 0,44-0,500,38-0,440,36-0,420,33-0,39 |
| 2 | 204060100 | 0,61-0,660,55-0,610,52-0,580,49-0,55 |
| 3 | 204060100 | 0,68-0,730,64-0,690,62-0,670,59-0,65 |

7. Определяют сопротивление растеканию тока горизонтального за­землителя:

1) для круглого сечения (рис. 9,а):

2) для прямоугольного сечения (рис. 9,б):

8. С учётом коэф­фициента использования горизонтального заземлителя (табл. 6 и 7) опре­деляется величина

Rг' = Rв/ ηг .

9. С учётом горизонтальных заземлителей уточняется сопротивление растеканию вертикальных заземлителей с учётом горизонтальных зазем­лителей

 Rв' = Rг'Rв/ (Rг' – Rв) .



 4 *м*

Рис. 7. Контур заземляющего устройства (вид сверху)



Рис. 8. Заземляющее устройство (вид сбоку)



Рис. 9. Горизонтальные заземлители в грунте и их линейные размеры

10. Определяется уточнённое количество вертикальных
заземлителей, при этом их число округляется в сторону увеличения:

nв' = Rз nв / ηв .

Согласно требованиям гл. 1.7 «Заземление и защитные меры элек­тробезопасности» ПУЭ, сопротивление защитного заземления электрооборудования не должно превышать 10 *Ом* при мощности источника до 100 *кВА* и 4 *Ом* при большей мощности.

Сопротивление ***R***зв сетях до 1000 *В* с системой заземле­ния TN в зависимости от величины напряжения в любое время года должно быть не более 2,4,8 *Ом* в сетях трехфаз­ного тока при линейных напряже­ниях соответственно 660, 380, 220 *В* или сетях однофазного тока при на­пряжениях соответственно 380, 220, 127 *В*.

Т а б л и ц а 6

Коэффициент использования горизонтального заземлителя (трубы, угол­ки, полосы и т. д.) при размещении вертикального заземлителя в ряд

|  |  |
| --- | --- |
| Отношение расстоя­ния между электро­дами к их длине(*a/lв*) | *ηг* , *при числе электродов в ряд* |
|  4 |  5 | 8 |  10 | 20 |  30 | 50 |  65 |
| 123 | 0,770,890,92 | 0,740,860,90 | 0,770,890,92 | 0,620,750,82 | 0,770,890,92 | 0,310,460,58 | 0,770,890,92 | 0,200,340,47 |

Т а б л и ц а 7

Коэффициент использования горизонтального заземлителя (трубы, угол­ки, полосы и т. д.) при размещении вертикального заземлителя по контуру

|  |  |
| --- | --- |
| Отношение расстоя­ния между электро­дами к их длине (*a/lв*) | *η г* , *при числе электродов в контуре заземления* |
|  4 |  5 | 8 |  10 | 20 |  30 | 50 |  65 |
| 123 | 0,450,550,65 | 0,400,480,64 | 0,360,430,60 | 0,340,400,56 | 0,270,320,45 | 0,240,300,41 | 0,210,280,37 | 0,200,260,35 |

Сопротивление естественных заземлителей ***Rе***определя­ют путём замера в конкретной установке. Их значения мо­гут быть приблизительно такими:

* стальная водопроводная труба 2 – 4 *Ом*;
* свинцовая оболочка кабеля 2 – 3 *Ом*.

При устройстве контурных заземлителей необходимо учи­тывать и со­противление растеканию тока горизонтального заземлителя. На площади размещения ЗУ размещаем вер­тикальные заземлители и определяем длину соединитель­ной полосы.

Контур заземляющего устройства будет иметь вид, пред­ставленный на рис. 7, 8.

## 3. ЗАЩИТНОЕ ЗАНУЛЕНИЕ

### 3.1. Зануление как средство обеспечения электробезопасности

Обеспечение электробезопасности систем электропитания радио­электронной аппаратуры (разрабатываемой в дипломных проектах) с по­мощью защитного зануления проводится для следующих условий:

* электрическая сеть является четырёхпроводной сетью с глухозазем­лённой нейтралью;
* источниками фазных напряжений являются соединённые по схеме электрической звезды вторичные обмотки трансформатора распредели­тельной электрической подстанции;
* электрическая сеть выполнена с помощью четырёхжильного кабеля или трёхжильного кабеля с алюминиевой оболочкой;
* четвёртая жила четырёхжильного кабеля или алюминиевая оболочка трёхжильного кабеля одновременно исполняет роль нейтрального рабочего проводника (НРП) и нулевого защитного проводника [НЗП (в цепи НРП отсутствуют разъединители или плавкие предохрани­тели].

Для оговоренных условий схема электрической сети с занулением корпусов питаемой аппаратуры может быть представлена в виде схемы на рис. 10. Электропитание к установкам подводится через последовательно соединённые контакты ручных коммутирующих устройств (РКУ) и авто­матических отключающих устройств (АОУ). В качестве АОУ могут быть использованы плавкие предохранители.

Целью применения зануления как меры защиты является быстрое отключение повреждённой фазы электроустановки от питающей сети при одновременном снижении напряжения прикосновения на её корпусе. Реализация указанной цели достигается в результате подключения корпусов электроустановок к НЗП, т. к. в этом случае при замыкании од­ной из фаз на корпус электроустановки образуется контур короткого за­мыкания. Большой уровень тока в контуре короткого замыкания гаранти­рованно вызывает быстрое срабатывание АОУ.

Время срабатывания любых реальных АОУ конечно, поэтому в те­чение интервала времени, начиная с момента возникновения аварийной ситуации (например, пробоя изоляции) до момента завершения процесса отключения электроустановки от питающей сети с помощью АОУ, чело­век, касающийся корпуса электроустановки, может подвергаться действию электрического тока. Следовательно, для защиты человека в системах электропитания с применением зануления необходимо: уменьшение времени срабатывания АОУ и снижение уровня напряжения прикосновения на корпусах электроустановок в тече­ние интервала времени срабатывания АОУ.

 Снижение уровня напряжения прикосновения на корпусах электро­установок обеспечивается в результате повторного заземления НЗП. В связи с тем, что эффективность действия заземляющих устройств в низко­вольтных электросетях с глухозаземлённой нейтралью невысока и недос­таточна [2, 4], применение повторного заземления НЗП может рассматри­ваться как желательная, но лишь дополнительная мера к основной защитной мере – быстродействующее отключение повреждённой фазы.

Условная схема на рис. 10 в упрощённом виде иллюстрирует типич­ный вариант практической реализации участка электрической сети с за­землённым нулевым проводом для случая электроснабжения многоэтаж­ного производственного здания или здания научно-исследовательского учреждения, офиса и т. п.

Схема на рис. 10 предполагает, что магистраль силового кабеля электрической сети (МСК), обеспечивающего подвод электропитания к зданию, выполнена с помощью четырёхжильного кабеля. Одна из жил МСК подключена к заземлённой нейтрали соединённых по схеме элек­трической звезды вторичных обмоток трансформатора электрической распределительной подстанции. При вводе в здание нулевой проводник МСК повторно заземлён.

На рис. 10 также обозначено: ЦРЩ, ЭРЩ и ЛРЩ – соответственно центральный, этажный и лабораторный распределительные щиты.

В многоэтажных зданиях, подводящая магистраль силового кабеля после ЦРЩ продолжается в виде шин одного или нескольких вертикальных стволов, обычно располагаемых в зонах лестничных пролётов. Электропитание производственных помещений для размещения электрооборудования (ПРЭ) каждого этажа осуществляется путём прокладки кабелей этажной разводки, связанных с шинами вертикальных стволов посредством ЭРЩ. Электропитание и зануление корпусов защищаемого оборудования внутри производственных помещений распределяется с помощью ЛРЩ. Шина нулевого провода в точке подвода МСК к ЦРЩ подключена к по­вторному заземляющему устройству, обычно выполненному в виде зазем­ляющего контура, расположенного по периметру здания [5, 6]. Шина ну­левого проводника вертикального ствола и нулевой проводник кабеля этажной разводки являются составными частями РШНЗП.

На каждом этаже в точках ответвления от шин вертикального ствола устанавливаются РКУ и АОУ (плавкие вставки или электромагнитные от­ключающие устройства, см. рис. 1), рассчитанные на требуемые значения токов срабатывания. Например, АОУ (которые могут быть плавкими вставками), установленные в точках поэтажных ответвлений (ЭРЩ), – на номинальный ток до 400 *А*, а АОУ, установленные в отдельных производ­ственных помещениях (ЛРЩ), – на номинальный ток 10 – 40 *А*.

В простейшем и широко распространённом случае системы аварий­ного отключения электро- или радиоэлектронного оборудования пред­ставляют собой встроенный в аппаратуру включенный последовательно в цепь электропитания плавкий предохранитель.

Описанное многоуровневое использование отключающих устройств в системах электропитания не только повышает надёжность защиты, но и обеспечивает селективное отключение питаемой аппаратуры или участков электросети.

### 3.2. Оценка опасности поражения в электрической сети

###  с защитным занулением

#### *3.2.1. Опасность поражения человека электрическим током при замыкании фазы на корпус электроустановки*

Оценка опасности поражения электрическим током в электрических сетях с защитным занулением зависит не только от возможной в данной ситуации величины протекающего через тело человека тока, но также в большой степени и от интервала времени действия этого тока. В связи с этим для различных интервалов времени действия поражающего тока нормативно введены предельно допустимые значения этого тока (***Ihд***) в зависимости от времени его действия. Аналогично введены предельно до­пустимые значения напряжения прикосновения (***Uhд***), расцениваемые как безопасные. В табл. 1 согласно ГОСТ 12.1.030-81\* для напряжений сети с напряжением до 1000 *В* приведены значения ***Ihд*** и ***Uhд*** в зависимости от продолжительности действия электрического тока (***Tд***) для систем элек­троснабжения производственного (П) и бытового (Б) назначений, рабо­тающих в аварийных режимах замыкания одной из фаз на корпус.

Таким образом, оценка опасности поражения электрическим током в электрической сети с занулением корпусов электроустановок сводится к определению возможных значений тока, протекающего по телу человека, прикасающегося к корпусам аварийных электроустановок, и времени сра­батывания АОУ (например, времени выгорания плавкого предохранителя) с последующим сравнением их с предельно допустимыми значениями, приведёнными в табл. 8.

Время действия тока, протекающего по телу человека, определяется выбором типа АОУ и рассматривается ниже.

Уровень тока, протекающего по телу человека, определяется осо­бенностями аварийных режимов в конкретной электрической сети с зану­лением. Практически, как правило, случаются два типа аварийных режи­мов в электрической сети с занулением:

* замыкание одной из фаз на корпус электроустановки;
* замыкание одной из фаз на землю.

Т а б л и ц а 8

Предельно допустимые значения *Ihд* и *Uhд* для различных интервалов вре­мени действия электрического тока

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Tд , с | 0,01…0,08 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | >1,0 |
|  П | **Ihд**, мA | 650 | 400 | 190 | 140 | 105 | 75 | 50 | 6 |
| **Uhд**, В | 550 | 340 | 160 | 120 | 95 | 75 | 60 | 20 |
|  Б | **Ihд** , мA | 200 | 100 | 70 | 55 | 50 | 30 | 25 | 2 |
| **Uhд** , В | 200 | 100 | 70 | 55 | 50 | 30 | 25 | 12 |

Анализ опасности поражения электрическим током при замыкании одной из фаз на корпус электроустановки рассмотрим для случая тран­шейной прокладки силового четырёхжильного кабеля с применением по­вторного заземления нулевого защитного проводника в точке ввода сило­вого кабеля в здание. Эквивалентная схема электрической сети для указанного случая представлена на рис. 11.

Рис. 11. Эквивалентные схемы электрической сети для случая замыкания одной из фаз на корпус электроустановки

Схема на рис. 11 содержит обозначения:

***R0*** – сопротивление заземлителя нейтрали;

***ZТ/3*** – приведённое к одной фазе электрической сети значение мо­дуля комплекса полного выходного сопротивления трансформатора элек­трической подстанции;

***ZФС = RФС + jωсLФС*** – комплекс сопротивления фазного проводника МСК, ***RФС***  и  ***LФС*** – соответственно активная и индуктивная составляю­щие;

***ωс = 2πfс*** – круговая частота напряжения сети (***fс*** = 50 *Гц*);

***ZФР = RФР + jωсLФР*** – комплекс сопротивления фазных проводников кабеля разводки электропитания внутри здания, ***RФР*** и ***jωсLФР*** – соответ­ственно активная и индуктивная составляющие;

***ZNС = RNС + jωсLNС*** – комплексное сопротивление шины нулевого проводника МСК, измеренное от точки заземления нейтрали на подстан­ции до точки подключения повторного заземления, ***RNС*** и ***jωсLNС*** – соот­ветственно активная и индуктивная составляющие;

***ZNР = RNР + jωсLNР*** – комплексное сопротивление шины нулевого проводника кабеля разводки внутри здания, измеренное от точки подклю­чения НЗП к контуру повторного заземления до лабораторного распреде­лительного щита, ***RNР*** и ***jωсLNР*** – соответственно активная и индуктивная составляющие;

***R0*** и ***RП*** – активные сопротивления заземляющих устройств ней­трали и повторного заземления НЗП;

***Rдоп*** – сумма возможных дополнительных активных сопротивлений в цепи каждой из фаз. В качестве дополнительных сопротивлений могут рассматриваться, например, активные сопротивления плавких предохра­нителей, переходные сопротивления контактов коммутирующих уст­ройств и т. п.

В рассматриваемой сети корпуса электроустановок подключены к дополнительной распределительной шине нулевого защитного провод­ника (РШНЗП), соединённой с точкой подключения нулевого проводника МСК к повторному заземляющему устройству.

С учётом сделанных допущений справедлива эквивалентная схема на рис.11. Обозначим:

***ZФ = RФС + RФР + jωс*(*LФС + LФР*)**– общее комплексное сопротивле­ние фазной шины электрической сети в контуре замыкания на корпус электроустановки;

***ZN = RNС + RNР + jωс*(*LNС + LNР*)**– общее комплексное сопротивление шины нулевого провода электрической сети в контуре замыкания на кор­пус электроустановки.

Эквивалентная схема на рис.11 может быть описана системой урав­нений комплексных переменных (токов и напряжений):

 ***İФ – İN – İП =* 0**;

 ***İФ =*** (***Úф – ÚНЗП***) ***/*** (***ZФР + ZNР + ZТ/*3 *+ Rдоп***);

 ***İНЗП = ÚНЗП / ZNС  ;***

 ***İП = ÚНЗП /*** (***R0 + RП***) .

На практике всегда выполняется условие |***ZФ***| ***<< R0 + RП***, что позво­ляет получить упрощённое решение данной системы уравнений относи­тельно падения напряжения на шине нулевого провода:

 ***UНЗП  = UфZNC***( ***Z\****)-1 , (1)

где обозначено: ***Z\* = ZФ + ZN + ZТ /3 +Rдоп***.

Величина напряжения прикосновения, отсчитываемого относи­тельно потенциала земли без учёта места расположения человека (коэф­фициент ***α1***) и дополнительных сопротивлений растекания тока с ног че­ловека и сопротивления обуви (коэффициент ***α2***) [5], может рассматриваться как максимально возможная. В данном случае напряже­ние прикосновения (рис. 11) представляет сумму падений напряжения на сопротивлении повторного заземления и комплексном сопротивлении РШНЗП:

Úпр max = ÚП + ÚNР ;

 ***Uп  = UнзпRп/(R0 + Rп)-1***;

 ***UNP  = UфZNP***( ***Z\****)-1 .

Подставляя в полученные выражения значение ***ÚНЗП***  из формулы (1), находим

 ***Uпр.max  = Uф***(***k0п ZNC +ZNP*** )( ***Z\****)-1 , (2)

где обозначено: ***k0п = Rп*** (***R0 + Rп***)***-1*** .

Из полученной формулы следует, что величина напряжения прикос­новения уменьшается с уменьшением составляющих ***ZNС*** и ком­плексного сопротивления нулевого провода и с увеличением значений комплексного сопротивления ***ZФ*** и суммы активных дополнительных со­противлений ***Rдоп*** в цепи фазного провода. Снижению уровня напряжения прикосновения способствует также повторное заземление нулевого про­вода (значение коэффициента ***k0П*** уменьшается с уменьшением величины сопротивления повторного заземления).

Для вычисления модуля напряжения прикосновения удобно ввести обозначения:

 ***R Ф\*= RФC + RФР + RNС+ RNР + ZТ /*3 *+ Rдоп***; (3)

 ***LФ\*= LФC + LФР + LNС + LNР*** . (4)

С учётом введённых обозначений (3) и (4) получаем формулу для расчёта максимальной величины напряжения прикосновения:

 . (5)

Возможен реальный случай прикосновения к занулённому корпусу электроустановки, находящейся за пределами зоны растекания тока замы­кания на землю (например, при использовании выносного устройства по­вторного заземления). В этом случае следует принять ***α1*** = 1, а коэффици­ент ***α2*** определяется по следующей формуле [5]:

 ***α1 = Rп***(***Rп + 1, ρо расч***)-1 , (6)

где ***Rh***  = 1000 *Ом* – расчётное значение сопротивления тела человека; ***ρо расч*** – расчётное удельное сопротивление основания, на котором предпо­лагается нахождение человека (различные виды грунта или пола) [6], *Ом·м*.

Требуемый уровень безопасности, обеспечиваемый системой с за­землённым нулевым проводом, рассчитанный по приведённым формулам, должен удовлетворять очевидному условию:

 Úпр max < Úпр. доп , (7)

где допустимое значение напряжения прикосновения (***Úпр. доп***) определя­ется из табл. 8 с учётом времени срабатывания отключающих устройств.

#### *3.2.2. Опасность поражения человека электрическим током при замыкании одной из фаз на землю*

Кроме рассмотренного в п. 3.2.2 случая аварийного замыкания одной из фаз на корпус электроустановки в электрической сети с заземлённым нулевым проводом возможна другая разновидность аварийного режима – замыкание одной из фаз на землю. Схема электрической сети и её эквива­лентная схема для данного случая приведены на рис. 12, где ***Rзм*** – сопро­тивление замыкания, характеризующее процесс растекания тока в грунте земли в точке максимального потенциала при замыкании фазы на землю.

Сопротивление ***Rзм*** обычно больше сопротивления специально вы­полненного заземления нейтрали (***Rзм > R0***) и может иметь значение от не­скольких десятков *ом* и выше. Однако при достаточно хорошем контакте с сильно увлажнённым грунтом величина сопротивления замыкания мо­жет составлять 15 – 20 *Ом* [5].

Величинами сопротивления фазного и нулевого проводников в дан­ном случае без заметной погрешности можно пренебречь из-за их относи­тельной малости по сравнению с величинами сопротивления заземлителей и замыкания.

 а б

Рис. 12. Электрическая и эквивалентная схемы сети для случая замыкания фазы на землю

С учётом сделанного допущения из эквивалентной схемы на рис. 12,б следует выражение для напряжения прикосновения к корпусу занулённой электроустановки:

  (8)

Из эквивалентной схемы на рис. 12,б следует, что величина тока в контуре замыкания ограничена относительно большой величиной сопро­тивления замыкания фазы на землю и, следовательно, в большинстве слу­чаев срабатывания отключающих устройств не произойдёт. Таким обра­зом, напряжение, появляющееся на занулённых корпусах электроаппаратуры при замыкании фазы на землю, может существовать длительное время, создавая опасность поражения электрическим током.

В связи с тем, что при замыкании на землю во многих случаях уста­новка автоматически не отключается (из-за малой величины тока замыка­ния), длительно допустимым до устранения причины аварии принимается значение напряжения прикосновения, непревышающее 20 *В* (ГОСТ 12.1.038-82\*).

Если принять в качестве реально возможного минимальное значение сопротивления замыкания фазы на землю равным 15 *Ом* [5], а величины сопротивлений заземления нейтрали и повторного заземления НЗП рав­ными нормативным значениям, т.е. ***R0*** = 4 *Ом* и ***RП*** = = 10 *Ом* для ***UФ***= 220 *В*, то расчётная максимальная величина напряжения прикосно­вения (для случая наиболее тяжёлых условий, когда ***α1***= 1 – человек на­ходится за пределами зоны растекания) и ***α2*** = 1 (сумма дополнительных сопротивлений мала по сравнению с сопротивлением тела человека) будет иметь значение: ***Uпр max*** ≈ 35 *В*. Если же принять (***RП*** ≈ ***R0***) = 4 *Ом*, что часто и бывает на практике, то при ***Rзм*** = 15 *Ом* получим ***Uпр max*** ≈ 26 *В*.

Таким образом, наличие повторного заземления НЗП, удовлетво­ряющего требованиям ПУЭ, в общем случае не обеспечивает безопас­ность прикосновения к занулённым корпусам электроустановок при за­мыкании фазы на землю.

Для обеспечения электробезопасности при замыкании фазы на землю имеются несколько возможностей:

* использовать повторное заземление НЗП;
* уменьшить значения коэффициента ***α1*** путём выравнивания распределе­ния потенциала земли в зоне обслуживания. Эта мера реа­лизуема обычно лишь при строительстве новых зданий;
* уменьшить значение коэффициента ***α2*** в результате использования пола с хорошими изолирующими свойствами [см. формулу (8)]. Вели­чины удельного сопротивления полов, выполненных из некоторых ма­териалов, приведены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Удельные сопротивления некоторых разновидностей полов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал пола | Состояниепола | Влажностьпола, % | Удельное со­противление, × 106  Ом·м |
| Метлахские плитки |  Сухой Влажный Мокрый | 60 – 6565 – 7575 – 100 | 80,4 – 95,610,1 – 21,62,2 – 3,8 |
| Дубовый паркет |  Сухой Влажный Мокрый | 60 – 6565 – 7575 – 100 | 160,4 – 185,645,4 – 68,71,7 – 2,9 |
| Берёзовый паркет,крашеные доски |  Сухой Влажный Мокрый | 60 – 6565 – 7575 – 100 | 51,9 – 75,818,0 – 29,91,5 – 2,9 |
| Бетон |  Сухой Влажный Мокрый | 60 – 6565 – 7575 – 100 | 56,1 – 105,26,4 – 17,81,8 – 2,8 |
| Цемент |  Сухой Влажный Мокрый | 60 – 6565 – 7575 – 100 | 24,0 – 38,00,8 – 1,80,08 – 0,15 |

### 3.3. Расчёт зануления

#### *3.3.1. Расчёт на отключающую способность*

Для автоматического отключения электроустановки от сети при за­мыкании фазы на занулённый корпус необходимо, чтобы значение тока однофазного короткого замыкания ***Iкз*** удовлетворяло условию

 ***Iкз / Iпр nom > kI треб*** , (9)

где ***Iпр nom*** – номинальное значение тока плавкого предохранителя или тока срабатывания автоматического выключателя; ***kI  треб*** – требуемый коэффи­циент кратности тока через предохранитель в аварийном режиме. Значение коэффициента ***kI*** определяется типом используемых авто­матических отключающих устройств (АОУ). Если в качестве отключаю­щих устройств используются плавкие предохранители (плавкие вставки), то с целью обеспечения быстрого отключения необходимо обеспечить ***kI***≥ 3 (***kI  треб*** = 3); во взрывоопасных помещениях – ***kI*** ≥ 4 (***kI  треб*** = 4). Если в качестве отключающего устройства используются электро­магнитные АОУ с малыми задержками времени, то для коммутируемых токов до 100 *А* принимают ***kI  треб***= 1,4. Если же в качестве АОУ исполь­зуются автоматические выключатели, имеющие зависимую от величины тока временную задержку то принимают ***kI  треб*** = 3, а во взрывоопасных помещениях ***kI  треб*** = 6.

Значение ***Iкз*** зависит от величины фазного напряжения и общего со­противления контура короткого замыкания. Для расчёта величины ***Iкз*** можно использовать эквивалентную схему электрической сети на рис. 11 и ранее полученное решение описывающей её системы уравнений. При этом заме­тим, что сопротивления зазем­ляющих устройств на величину тока короткого замыкания практически не оказывают влияния и, следовательно, эквивалентная схема для расчёта тока короткого замыка­ния может быть существенно упрощена.

С учётом модуля выходного сопротивления фазы трансформатора электрической подстанции ***ZТ/3*** и выше обоснованных упрощений эквива­лентная схема для расчёта тока короткого замыкания принимает вид, по­казанный на рис. 13.

 

Рис. 13. Упрощённая эквивалентная схема для расчёта тока

 ко­роткого замыкания на корпус электроустановки

Непосредственно из эквивалентной схемы следует, что

 ***Iкз = Uф***(***ZT/***3 + ***ZФN***)-1 , (10)

где ***ZФN = ZФС + ZФР + ZNС + ZNР + Rдоп*** – комплексное сопротивление петли фаза – нуль. Для расчёта модуля тока короткого замыкания согласно [5] рекомендуется пользоваться приближённым вариантом формулы (12), обеспечивающим несколько более жёсткие требования безопасности. Для этого в формуле (11) следует считать:

,

где ***RФ = RФС + RФР*** и ***LФ = LФС + LФР*** – полные значения активного и ин­дуктивного сопротивлений фазного проводника данного участка электри­ческой сети; ***RN = RNС + RNР*** и ***LN = LNС + LNР*** – полные значения актив­ного и индуктивного сопротивлений нулевого проводника данного участка электрической сети.

Величина ***ZТ*** зависит от параметров трансформатора распредели­тельной электрической подстанции: его мощности, конструктивного ис­полнения и схемы соединения его обмоток. Для расчётов можно исполь­зовать значения ***ZТ*** из табл. 10 по данным, приведённым в [5].

Т а б л и ц а 10

Ориентировочные значения полных выходных сопротивлений масляных распределительных трансформаторов

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Мощность транс­форма­тора, кВт | Номинал высокого напряжения, кВ | ZТ , Ом– при схеме соединения обмоток транс­форматора |
| *звезда/звезда* | *треугольник/звезда* |
| 25 | 6 – 10 | 3,110 | 0,906 |
| 40 | 6 – 10 | 1,949 | 0,562 |
| 100 | 6 – 1020 ­– 35 | 0,7990,764 | 0,2260,327 |
| 250 | 6 – 1020 ­– 35 | 0,3120,305 | 0,0900,130 |
| 400 | 6 – 1020 ­– 35 | 0,1950,101 | 0,056– |

Значения активных составляющих полных сопротивлений фазного и нулевого проводов определяются по известной формуле:

 ***R =*** ***ρпр lпр*** (***sпр***)-1 , (11)

где ***ρпр*** – удельное сопротивление материала проводника (***ρпр*** = 0,018 – для меди, ***ρпр*** = 0,028 – для алюминия), *Ом·мм/м2*; ***lпр*** – длина проводника, *м*; ***sпр*** – сечение проводника, *мм2* .

Требуемое сечение жил используемых силовых кабелей определя­ется их долговременной токовой нагрузкой. В табл. 11 приведены допус­тимые длительные токовые нагрузки для выпускаемых промышленно­стью кабелей для некоторых стандартных сечений жил [2].

Т а б л и ц а 11

Допустимые значения длительно протекающего тока для кабелей с алюми­ниевыми жилами и стандартными сечениями жил, *А*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Sж , мм2* | 4 | 10 | 25 | 50 | 95 | 150 | 185 |
| 3 жилы | 38 | 70 | 115 | 175 | 255 | 355 | 385 |
| 4 жилы | 35 | 65 | 105 | 160 | 235 | 325 | 355 |

Длина подводящей магистрали силового кабеля от подстанции до точки ввода в здание обычно не превышает 250 *м*, поэтому для ориенти­ровочного выбора ее можно принять равной 150 – 200 *м*.

Длина вертикального ствола внутри здания определяется номером и высотой этажа. Для производственных зданий высоту этажа можно при­нять равной 4 – 5 *м*. Длина кабелей этажной разводки, в зависимости от расположения помещения относительно вертикального ствола, может из­меняться в пределах от нескольких метров до нескольких десятков мет­ров. Для расчётов ориентировочно можно принять длину кабеля этажной разводки равной 40 – 60 *м*.

Следует иметь в виду, что сечение жил кабелей поэтажной разводки выбирается меньше сечения жил кабеля (или шин) вертикального ствола в соответствии с их меньшей токовой нагрузкой. Ориентировочно можно принять этажную токовую нагрузку, в число этажей здания раз меньшей величины общего длительно потребляемого зданием тока.

Сечения жил кабеля вертикального ствола и подводящего магист­рального кабеля можно считать одинаковыми. Следует также иметь в виду, что согласно ПУЭ [2] допускается использование кабелей, четвёртая жила которых, используемая в качестве нулевого провода, имеет сечение не менее половины сечения основных жил.

Неодинаковость сечений жил кабелей на различных участках сис­темы энергоснабжения зданий следует учитывать при расчёте активного сопротивления и индуктивности петли фаза – нейтраль. Указанные пара­метры целесообразно рассчитывать отдельно для каждого участка и затем просуммировать. В таком случае величины активных и индуктивных со­ставляющих петли фаза – нейтраль будут определяться суммами:

 ***Rф-н=*** (***RФ + RN***)***мск +*** (***RФ + RN***)***квс +*** (***RФ + RN***) ***квр + ZТ /3 + Rдоп***; (12)

 ***L ф-н=*** (***LФ + LN***)***мск +*** (***LФ + LN***)***квс +*** (***LФ + LN***)***кэр*** , (13)

где ***RФ= RФC + RФР*** *;* ***RN= RNC + RNР*** ;  ***L Ф= L ФC + L ФР*** ;  ***L N= L NC + L NР***

– слагаемые активных и индуктивных соответствующих участков петли фаза – нейтраль, в формулах (12) и (13) помеченных индексами: «*мск*» – для участка магистрали силового кабеля, «*квс*» » – для участка кабелей вертикального ствола и «*кэр*» » – для участка кабелей этажной разводки.

Для определения индуктивности эквивалентных петель различных участков электрической сети при однофазном замыкании совокупность фазного и нулевого проводников в первом приближении можно рассмат­ривать как эквивалентную двухпроводной линии и, следовательно, ис­пользовать известную формулу для двухпроводной линии с проводами круглого сечения одинакового диаметра:

  , (14)

где ***L*** – рассчитываемая индуктивность двухпроводнной линии, *Гн*; ***lк***– длина кабеля на данном участке электрической сети, *м*; ***μ*** – относительная магнитная проницаемость среды (для воздушной среды ***μ*** = 1); ***dж*** – диа­метр жилы кабеля на данном участке электрической сети, *м*; ***D*** – расстоя­ние между проводниками двухпроводной линии (расстояние между осе­выми линиями жил кабеля), *м*. Формула (14) определяет полную индуктивность петли фаза-нейтраль как двухпроводной линии, поэтому при расчёте индуктивных составляющих формулы (13) для отдельных участков петли фаза-нейтраль необходимо брать лишь половинные значе­ния от полученных по формуле (14).

#### *3.3.2. Выбор плавких предохранителей для радиоэлектронной аппаратуры с занулением корпусов*

В радиоэлектронной аппаратуре широко распространён простейший способ защиты от коротких замыканий с помощью плавких предохрани­телей, по сути выполняющих роль первой ступени в многоуровневой сис­теме защиты в электрической сети с заземленной нейтралью. Очевидно, при правильном выборе номинала предохранителя замыкание фазы на корпус аппаратуры должно обеспечивать его эффективное перегорание, не оказывая при этом влияния на состояние элементов защиты более вы­соких уровней.

Параметры плавких предохранителей или АОУ других типов, встраиваемых в радиоэлектронную аппаратуру, как правило, удовлетво­ряют условию надёжного отключения (7). При этом заметим, что необхо­димость проверки выполнения условия (7) остаётся обязательным элемен­том расчёта системы с заземлённым нулевым проводом.

Отмеченное вовсе не означает, что использование плавких предо­хранителей полностью решает проблему обеспечения безопасности при замыкании фазы на корпус. Человек, касающийся одного из занулённых корпусов радиоэлектронной аппаратуры, в одном из которых произошло замыкание фазы на корпус, в течение интервала времени выгорания пре­дохранителя будет подвергаться действию напряжения прикосновения. Следовательно, для обеспечения достаточных условий безопасности, кроме выполнения условия (10), необходимо, чтобы в течение интервала времени выгорания предохранителя напряжение прикосновения не пре­вышало нормативных величин, указанных в табл. 8.

Время выгорания предохранителей является нелинейной функцией кратности тока короткого замыкания относительно номинального тока предохранителя (***kI***) и с увеличением кратности тока уменьшается. В табл. 12 и 13 приведены ампер-секундные характеристики некоторых типов плавких предохранителей.

Т а б л и ц а 12

Ампер-секундные характеристики плавких предохранителей ВП1, ВП2, ВП3

|  |  |
| --- | --- |
| Номи­нальный ток, А | Время выгорания предохранителя, с |
| *kI*= 2,1 | *kI* = 2,75 | *kI* = 4,0 | *kI* = 5,0 | *kI*= 10 |
| *max* | *min* | *max* | *min* | *max* | *min* | *max* | *min* |
| 0,25 | 0,92 | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,015 | 0,02 | 0,008 |
| 0,5 | 0,85 | 0,07 | 0,10 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,014 |
| 1,0 | 1,08 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | 0,06 | 0,025 | 0,035 | 0,017 |
| 2,0 | 1,00 | 0,10 | 0,12 | 0,04 | 0,08 | 0,03 | 0,04 | 0,018 |
| 3,15 | 2,20 | 0,17 | 0,22 | 0,07 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,019 |
| 4,0 | 2,20 | 0,21 | 0,23 | 0,07 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,022 |
| 5,0 | 2,20 | 0,24 | 0,29 | 0,08 | 0,09 | 0,04 | 0,06 | 0,028 |

При использовании плавких предохранителей в радиоэлектронной аппаратуре с относительно небольшим токопотреблением (до нескольких ампер) в общем случае можно учитывать их активное сопротивление при расчёте напряжения прикосновения путём его включения в состав вели­чины ***Rдоп*** (рис. 11). Увеличение активной составляющей полного сопро­тивления цепи фазного провода приводит к снижению уровня напряжения прикосновения. В табл. 12 приведены значения активных сопротивлений плавких предохранителей ВП1, ВП2, ВП3 для некоторых значений их но­минальных токов (***Iпр nom***).

 Т а б л и ц а 13

Ампер-секундные характеристики плавких предохранителей ВП3Б

|  |  |
| --- | --- |
| Номи-нальный ток, *А* | Время выгорания предохранителя, *с* |
| *kI*=2,1 | *kI* = 2,75 | *kI* = 4,0 | *kI* = 5,0 | *kI*= 10 |
| *max* | *min* | *max* | *min* | *max* | *max* | *min* | *max* |
| 1,0 | 1,20 | 0,14 | 0,16 | 0,06 | 0,09 | 0,041 | 0,06 | 0,023 |
| 2,5 | 0,77 | 0,24 | 0,27 | 0,07 | 0,08 | 0,06 | 0,07 | 0,025 |
| 4,0 | 3,00 | 0,25 | 0,30 | 0,09 | 0,15 | 0,06 | 0,08 | 0,030 |
| 5,0 | 4,30 | 0,33 | 0,43 | 0,16 | 0,18 | 0,08 | 0,10 | 0,040 |
| 8,0 | 4,50 | 0,41 | 0,43 | 0,13 | 0,25 | 0,10 | 0,14 | 0,032 |
| 10,0 | 4,60 | 0,42 | 0,51 | 0,18 | 0,21 | 0,12 | 0,14 | 0,034 |

При расчёте безопасности электроустановок большой мощности с током потребления в несколько десятков ампер вместо плавких предохра­нителей целесообразно использовать автоматические отключающие уст­ройства. Время отключения автоматических выключателей теплового действия составляет 0,2 – 0,5 *с*. Время полного отключения электромаг­нитных выключателей обычно меньше 0,1 *с* [5].

Т а б л и ц а 14

Активные сопротивления плавких предохранителей ВП1, ВП2, ВП3

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Iпр nom , А | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 |
| **Rпр** , Ом | 1,2 | 0,4 | 0,3 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,025 |

###  3.4. Порядок расчёта зануления

При написании раздела «Безопасность и экологичность проекта» в дипломных проектах при рассмотрении вопросов, связанных с обеспече­нием безопасности проектируемого радиоэлектронного оборудования, возможны две типичные ситуации:

* проектируемая аппаратура питается от электрической сети непосредст­венно или посредством других устройств, также разрабатываемых в дипломном проекте;
* проектируемая аппаратура питается от электрической сети посредст­вом устройств-посредников, не разрабатываемых в дипломном про­екте.

Примером таких устройств-посредников может служить, в частно­сти, преобразователь входного переменного напряжения сети 220 *В* в вы­ходное напряжение постоянного тока.

Необходимо иметь в виду, что в аварийных ситуациях прикоснове­ние к корпусам преобразователя, работающего от сети с фазным напря­жением 220 *В*, и устройства, питающегося, например, напряжением 5 *В* с выхода преобразователя, одинаково опасно.

При написании раздела «Безопасность и экологичность проекта» в дипломных проектах может быть рекомендован приведённый ниже ори­ентировочный порядок проведения расчётов, связанных с обеспечением безопасности проектируемой радиоэлектронной аппаратуры.

**1.** Определяется токопотребление производственным (или бытовым) зданием, в котором предполагается размещение проектируемой аппара­туры. При отсутствии конкретных данных можно принять величину по­требляемого фазного тока в пределах 100 – 200 *А* или согласовать этот во­прос с преподавателем.

**2.** Определить фактические или предполагаемые параметры системы электроснабжения производственного (бытового) здания с учётом разме­щения проектируемого оборудования:

* в соответствии с рис. 2 длину подвода магистрали силового кабеля от подстанции до точки его ввода в здание;
* с учётом номера и высоты этажа, на котором предполагается разме­щение проектируемой аппаратуры, длину силовых шин вертикального ствола от точки ввода в здание до точки этажного ответвления (этажного распределительного щита);
* длину кабеля этажной разводки от этажного распределительного щита до лабораторного распределительного щита.

При отсутствии конкретных данных необходимые данные следует согласовать с преподавателем-консультантом.

**3.** По величине потребляемого по каждой фазе тока определяют тре­буемый уровень мощности трансформатора электрической подстанции: ***PТ= 3Uф maxIф max*** , где ***Uф max*** и ***Iф max*** – максимальные значения напряже­ния фазы и потребляемого зданием по каждой фазе тока. Максимальное значение напряжения фазы принимается стандартным: ***Uф maxIф = 1,1 Uф nom***(***Uф nom***= = 220 *В*). По найденной величине и табл. 10 определяют мощ­ность типового трансформатора с соответствующим значением ***ZТ***.

**4.** В соответствии с токопотреблением на каждом участке электриче­ской сети определяют требуемое сечение жил кабеля.

**5.** По формулам (11) – (14) определяют активные сопротивления и индуктивности фазного и нулевого проводов для различных участков электрической сети.

**6.** По формуле (10) рассчитывают ток короткого замыкания ***Iкз*** .

**7.** По данным расчётов в основных разделах проекта или в резуль­тате дополнительных расчётов определяют величину потребляемого по каждой фазе тока и с некоторым запасом (до ближайшего номинала) под­бирают плавкий предохранитель или автоматический выключатель с тре­буемым током срабатывания. Для сравнительно маломощной аппаратуры с потребляемым током до нескольких ампер условие (9), как правило, вы­полняется. В этом случае значение коэффициента ***kI*** оказывается доста­точно большим, поэтому можно считать обоснованным использование плавких предохранителей в качестве АОУ. Если значение коэффициента ***kI*** < 3, что может случиться при защите сильноточной аппаратуры, то в этом случае целесообразно перейти к ис­пользованию автоматических отключающих устройств.

**8.** Вычисляют значение коэффициента кратности тока выгорания предохранителя: ***kI = Iкз/IФЭУ***, где ***IФЭУ*** – потребляемый проектируемой электроустановкой ток по каждой фазе в нормальном режиме.

***9.*** Используя результаты расчётов, выполненных согласно п. 5, по формуле (5) вычисляют величину напряжения прикосновения, возникаю­щего при замыкании фазы на корпус.

**10.** По таблицам 8, 12 и 13 проверяют по критерию безопасности полу­ченный уровень напряжения прикосновения с учётом времени выгорания предохранителя, зависящего от полученного значения коэффициента ***kI***. При необходимости корректируют выбор типа и номинала предохрани­теля. В затруднительных ситуациях при расчётах следует учитывать ак­тивное сопротивление предохранителей (табл. 14). Аналогичным образом может быть проведена коррекция выбора автоматического выключателя.

**11.** В соответствии с материалами п. 3.2.3 оценивают опасность пора­жения электрическим током в случае прикосновения к занулённому кор­пусу электроустановки при замыкании фазы на землю и при необходимо­сти определяют меры обеспечения безопасности.

**12.** Конструктивная разработка проектируемой аппаратуры должна предусматривать встроенное размещение элементов установки плавкого предохранителя выбранного типа и номинала или установку автоматиче­ского отключающего устройства надлежащего типа.

# *БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. ГОСТ Р 50571 (МЭК-364) . Электроустановки зданий ч.4. – М.: Гос­стандарт России, 1994 – 2000*.*
2. ГОСТ 12.1.030-81\*. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземле­ние, зануление.
3. ГОСТ 12.1.038-82\*. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допусти­мые уровни напряжения прикосновения и токов.
4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2003. – 260 с.
5. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 486 с.
6. Маньков В. Д., Заграничный С. Ф. Защитное заземление и защитное зануление электроустановок: справочник. – СПб. : Политехника, 2005. – 400 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

[1. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 1](#_Toc196289772)

[1.1. Системы электрических сетей 1](#_Toc196289773)

[1.2. Общие требования к защитному заземлению и защитному занулению 4](#_Toc196289774)

[1.3. Требования к устройству и применению заземлителей, заземляющих и защитных проводников 6](#_Toc196289775)

[1.4. Конструктивное исполнение искусственных заземляющих устройств 7](#_Toc196289776)

[2. УПРОЩЁННЫЙ РАСЧЁТ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ 8](#_Toc196289777)

[3. ЗАЩИТНОЕ ЗАНУЛЕНИЕ 13](#_Toc196289778)

[3.1. Зануление как средство обеспечения электробезопасности 13](#_Toc196289779)

[3.2. Оценка опасности поражения в электрической сети](#_Toc196289780)

[с защитным занулением 17](#_Toc196289781)

[3.3. Расчёт зануления 23](#_Toc196289782)

[3.4. Порядок расчёта зануления 30](#_Toc196289783)