

**Министерство образования и науки Российской  
Федерации**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного  
транспорта

Кафедра «Автотранспортная и техносферная  
безопасность»

**Методические указания к практическим  
занятиям**

**по дисциплине «Электробезопасность»**

для студентов ВлГУ,

обучающихся по направлению **20. 03.01**

**Техносферная безопасность**

составитель Туманова Н.И.

Владимир – 2016г.

## Содержание

1. ТЕМА 1. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ
2. **ТЕМА 2 ЗАЩИТНОЕ ЗАНУЛЕНИЕ. РАСЧЕТ  
СХЕМЫ ЗАНУЛЕНИЯ НА ОТКЛЮЧАЮЩУЮ  
СПОСОБНОСТЬ.**
3. **ТЕМА 3 ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**
4. **ТЕМА 4. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В  
ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 300 МГц...300 ГГц**

## ТЕМА 1. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от опасного и вредного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и электростатических разрядов.

Организационные мероприятия по электробезопасности – это правильная организация и внедрение безопасных методов работ; обучение и инструктаж электротехнического персонала; контроль и надзор за выполнением правил техники безопасности; механизация и автоматизация технологических процессов.

Технические мероприятия по электробезопасности – это обеспечение нормальных метеорологических условий в рабочей зоне, нормированной освещенности, применение ограждений, блокировок коммутационных электроаппаратов, спецодежды и спецобуви, а также необходимых защитных мер и средств.

В качестве технических защитных мер в электроустановках применяют:

1. для защиты от случайного прикосновения (опасного приближения) человека к токоведущим элементам:

- малые напряжения;
- электрическое разделение сетей;
- контроль и профилактику повреждений изоляции;

- компенсацию емкостной составляющей тока замыкания на землю;

- двойную изоляцию;

2. для защиты человека от поражения электрическим током в случае прикосновения к нетоковедущим элементам, оказавшимся под напряжением в результате неисправности электрооборудования:

- защитное заземление;
- зануление;
- защитное отключение.

Необходимые меры в каждом конкретном случае зависят от вида электрических сетей и возможных вариантов подключения к ним человека, типа электроустановок, их параметров и условий эксплуатации.

### **Защитное заземление**

Защитным заземлением называют преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Заземлению подлежат следующие части электрооборудования:

- корпуса электрических машин, трансформаторов, светильников и других аппаратов;
- приводы электрических аппаратов;
- каркасы распределительных щитов, шкафов и т.п.;
- металлические конструкции распределительных устройств, оболочки и броня кабелей, стальные трубы электропроводки, шинопроводы, короба и другие конструкции;
- металлические корпуса передвижных и переносных электроприемников, а также электрооборудование, размещенное на движущихся частях станков, машин и механизмов.

Допускается не выполнять заземления корпусов электрических машин, аппаратов и электромонтажных конструкций, установленных на заземленных основаниях и основаниях, на которых уже установлено заземленное оборудование при условии обеспечения надежного электрического контакта основания и корпусов.

Заземлению не подлежат корпуса электроприемников с двойной изоляцией.

При замыкании токоведущих частей электроустановок на корпус прикосновение к нему так же опасно, как и прикосновение к фазе, если корпус не имеет контакта с землей. Если же корпус заземлен, то напряжение на корпусе окажется равным

$$U_3 = I_3 \cdot R_3,$$

а напряжение прикосновения (напряжение, действующее на человека) составит

$$U_{\text{пр}} = U_3 \cdot a_1 \cdot a_2,$$

где  $I_3$  – ток замыкания на землю;  $R_3$  – сопротивление заземляющего устройства;  $a_1$  – коэффициент напряжения прикосновения (зависит от формы заземляющего электрода, сопротивления грунта и расстояния человека от места расположения заземлителя), который близок к 0, если человек находится рядом с заземлителем, и приближается к 1 при удалении от заземляющего электрода на расстояние более 20 метров;  $a_2$  – коэффициент, учитывающий соотношение сопротивлений тела человека, его обуви и опорной поверхности ног;  $a_2$  может принимать значения намного меньше 1, но при повышенной влажности, наличии проводящего пола и проводящей пыли в помещении  $a_2$  близок к 1.

Приведенные выражения показывают, что безопасность повышается при малых значениях тока замыкания на землю, малых сопротивлениях заземляющих устройств и расстояниях от места заземления. Безопасность выше в сухих помещениях без проводящей пыли и полом с диэлектрическим покрытием. Эти выводы послужили основой рекомендаций по применению и расчету заземляющих устройств.

В трехфазных сетях с заземленной нейтралью напряжением до 1000 В заземление неэффективно, так как ток замыкания на землю зависит от сопротивления заземляющего устройства (с уменьшением сопротивления ток возрастает и сохраняются большие значения напряжения прикосновения). Сети с заземленной нейтралью напряжением более 1000 В дополнительно снабжаются отключающими устройствами. Большой ток в фазном проводе, замкнутом на заземленный корпус, приводит к срабатыванию токовой защиты и отключению источника питания.

В сетях с изолированной нейтралью ток замыкания на землю определяется проводимостью изоляции неповрежденных фазных проводов, а от сопротивления заземления не зависит. Уменьшая сопротивление

заземляющего устройства, удастся снизить напряжение прикосновения до безопасных значений.

Таким образом, заземление рекомендуется применять в трехфазных сетях с напряжением до 1000 В при изолированной нейтральной точке источника и в сетях более 1000 В с любым режимом нейтрали.

Аналогичные рекомендации даются для однофазных сетей переменного тока и сетей постоянного тока: следует применять заземление в однофазных сетях и сетях постоянного тока, изолированных от земли (в трехпроводных сетях – с изолированной средней точкой) при напряжениях до 1000 В и в любых сетях с напряжением более 1000 В.

В сетях с изолированной нейтралью кроме заземления требуется обеспечить контроль изоляции. В сетях напряжением более 1000 В устанавливается защитное отключение.

Заземление (или зануление) электроустановок следует выполнять при напряжении 380 В и выше переменного тока и напряжении 440 В и выше постоянного тока в помещениях любых типов (в соответствии с классификацией по электрической опасности); при напряжениях от 42 до 380 В переменного тока и



напряжениях от 110 до 440 В постоянного тока – только в помещениях с повышенной опасностью; при напряжениях менее 42 В переменного тока и менее 110 В постоянного тока только во взрывоопасных зонах и в сварочных автоматах.

Проектирование защитного заземления начинается с определения требуемой величины сопротивления заземляющего устройства  $R_{\text{д}}$ . Правилами устройства электроустановок потребителей нормируются сопротивления заземления в зависимости от напряжения и мощности электроустановок, подлежащих заземлению.

В установках напряжением до 1000 В и мощностью до 100 кВ·А сопротивление заземления должно быть не более 10 Ом. При такой небольшой мощности протяженность сети мала и ток замыкания на землю не превышает 2 А. Даже если принять коэффициенты  $a_1 = a_2 = 1$ , напряжение прикосновения не превысит длительно допустимое значение – 20 В.

В установках напряжением до 1000 В и мощностью более 100 кВ·А ток замыкания на землю может достигать 10 А, и максимальное значение сопротивления заземляющего устройства следует снизить до 4 Ом.

В электроустановках напряжением свыше 1000 В и малых токах замыкания на землю (менее 500 А) для сопротивления заземления должно выполняться условие

$$R_3 \leq 250 / I_3,$$

но при этом сопротивление не может быть более 100 м.

В электроустановках напряжением более 1000 В и больших токах замыкания на землю сопротивление заземления должно быть не более 0,5 Ом.

Необходимо отметить, что в установках напряжением свыше 1000 В напряжение прикосновения даже при правильно выполненном заземлении остается опасным (250—300 В) и безопасность персонала обеспечивается за счет дополнительных мер – защитного отключения, особых правил поведения и обучения работников.

Второй этап проектирования заземления – выбор типа заземляющего устройства.

Для заземления электроустановок в первую очередь должны быть использованы естественные заземлители. Искусственные заземлители применяют при необходимости с целью снижения напряжения

прикосновения, сопротивления заземления или плотности тока замыкания до нормативных значений.

В качестве естественных заземлителей рекомендуются проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы, кроме трубопроводов горючих газов, жидкостей и смесей; металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей; металлические конструкции гидротехнических сооружений; нулевые провода воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В с повторными заземлителями при количестве линий не менее двух; рельсовые пути магистральных неэлектрифицированных железных дорог.

Сопротивление естественных заземлителей  $R_E$  можно рассчитать с помощью формул, приведенных в табл. 1. Методика расчета одинакова для естественного и искусственного заземляющих устройств и рассматривается ниже. Разница состоит в том, что параметры искусственного заземлителя предварительно выбираются ориентировочно, а параметры естественного заземлителя известны точно. При определении сопротивления заземления железобетонных конструкций

удовлетворительные результаты дает умножение значения удельного сопротивления почвы на коэффициент 1,8. В расчетах используются размеры конструкций, а не арматуры.

Одним из основных элементов заземляющего устройства, кроме самого заземлителя, является заземляющий проводник. Сопротивление заземляющего проводника в большинстве случаев приближается по значению к сопротивлению заземлителя и должно учитываться на всех этапах проектирования.

В качестве заземляющих проводников могут быть использованы специально предусмотренные для этого проводники; металлические конструкции зданий, сооружений и производственных установок; металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы, кроме трубопроводов горючих веществ, канализации и центрального отопления; защитные металлические оболочки кабелей и электропроводок; арматура железобетонных строительных конструкций и фундаментов.

Критериями пригодности проводника в качестве элемента заземления служат малое сопротивление и непрерывность электрической цепи. В цепи заземляющих

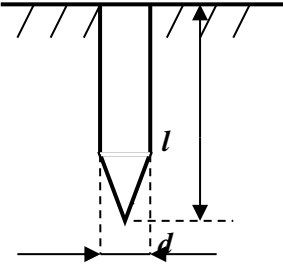
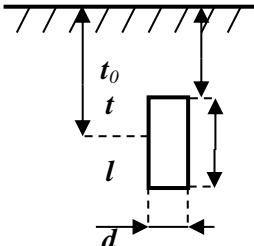
проводников не должно быть разъединяющих приспособлений и предохранителей. Прокладку заземляющих проводников в сухих помещениях без агрессивных сред допускается производить непосредственно по стенам. Во влажных и сырых помещениях, а также при наличии агрессивной среды проводники следует прокладывать на расстоянии не менее 10 мм от стен.

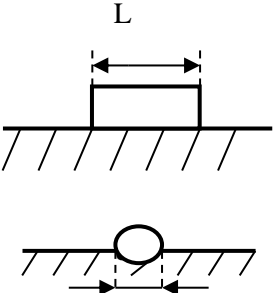
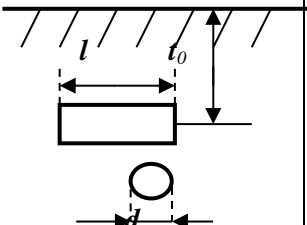
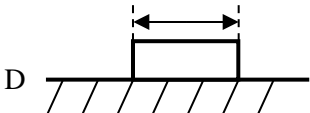
Заземляющие проводники соединяются между собой сваркой. Места соединения стыков после сварки должны быть окрашены.

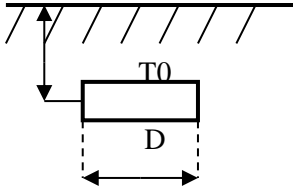
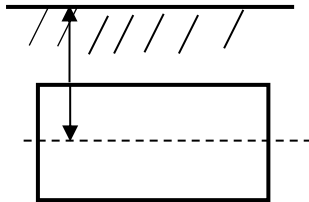
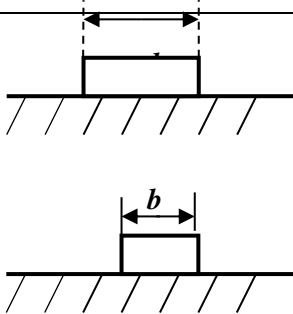
Присоединение заземляющих проводников к частям оборудования, подлежащим заземлению, выполняется сваркой или болтовым соединением. Присоединение должно быть доступно для осмотра. Для болтовых соединений предусматриваются меры против ослабления и коррозии. Каждая часть электроустановки, подлежащая заземлению, должна быть присоединена к сети заземления при помощи отдельного ответвления. Последовательное соединение заземляемых частей не допускается.

Таблица 1.

## Сопротивление одиночных заземлителей растеканию тока

№ п/п	Тип заземлителя	Схема	Формула	Дополни-тельные указания
1	Трубчатый или стержневой у поверхности грунта		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l > d$  Для уголка с шириной полки $b$ , $d=0,95b$
2	Трубчатый или стержневой в грунте		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$	$l < d; t_0 \geq 0,5m$  Для уголка с шириной полки $b$ , $d=0,95b$

3	Протяженный круглого сечения : стержень, труба, кабель и т.п. На поверхности грунта		$R_3 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$l > d$  Для полосы шириной $b$ , $d=0,5b$
4	То же в грунте		$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{t_0 d}$	$l > 4t_0 > d$  Для полосы шириной $b$ , $d=0,5b$
5	Круглая пластина на поверхности грунта		$R_3 = \frac{\rho}{2D}$	$D$ – диаметр пластины

6	То же в грунте		$R_3 = \frac{\rho}{4D} \left( 1 + \frac{2}{\pi} \times \arcsin \frac{D}{\sqrt{16t_0^2 + D^2}} \right)$	$2t_0 > D$
7	Пластиначтый в грунте, пластина поставлена на ребро		$R_3 = \frac{\rho}{4\sqrt{\pi F}} \left( \frac{\pi}{2} + \arcsin \sqrt{\frac{F}{4t^2\pi + F}} \right)$	$t > \sqrt{\frac{F}{\pi}}$ $F$ – площадь пластины, м <sup>2</sup>
8	Протяженный полосовой на поверхности грунта		$R_3 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{4l}{6}$	-



Примечание:  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м;  $R_3$  – сопротивление заземлителя, Ом.

Наиболее широкое распространение имеют трубчатые заземлители, которые соединяются полосовым заземлителем.

Соединение заземляющих проводников с заземлителями выполняется сваркой. Сварные швы, расположенные в земле, необходимо покрывать битумным лаком или другими материалами для защиты от коррозии.

Заземление переносных электроприемников должно осуществляться специальной жилой, расположенной в одной оболочке с фазными жилами и присоединяемой к корпусу электроприемника и специальному контакту вилки соединителя. Сечение этой жилы должно быть равным сечению фазных проводников. Использование для этой цели нулевого рабочего проводника, в том числе расположенного в общей оболочке, не допускается.

При использовании естественных заземляющих проводников, их размеры сопоставляют с минимально допустимыми (табл. 2.). Затем выполняют расчет их сопротивления.

Таблица 2.

**Минимальные размеры заземляющих  
проводников в электроустановках напряжением до  
1000 В**

Проводники	Медь	Алюминий	Сталь в здании	Сталь снаружи	Сталь в земле
Неизолированные проводники: сечение, мм <sup>2</sup> диаметр, мм	4	6	- 5	- 6	- 10
Изолированные провода: сечение, мм <sup>2</sup>	-	-	-	-	-
Угловая сталь: толщина полки, мм	1,5	2,5	2	2,5	4
Полосовая сталь: сечение, мм <sup>2</sup> толщина, мм	-	-	24 3	48 4	48 4
Водогазопроводные трубы: толщина стенки, мм	-	-	2,5	2,5	3,5
Тонкостенные трубы: толщина стенки, мм	-	-	1,5	2,5	Не допуст.

Расчет осуществляется по формулам табл. 1, если проводник не имеет изоляции и расположен в земле или на ее поверхности.

Для проводников, не соприкасающихся с землей, применяют следующие формулы:

- сопротивление проводников из немагнитных материалов (медь, алюминий)

$$Z_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} = \rho \cdot l / S, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{пр}}$  – полное сопротивление проводника, Ом;  $R_{\text{пр}}$  – активное сопротивление проводника, Ом;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника (для алюминия  $2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, для меди  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м);  $l$  – длина проводника, м;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>;

- сопротивление проводников из магнитных материалов (сталь, электротехническое железо)

$$\begin{aligned} Z_{\text{пр}} &= (R_{\text{пр}}^2 + X_{\text{пр}}^2)^{0,5}; \\ R_{\text{пр}} &= a \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5} / P; \\ X_{\text{пр}} &= b \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot f^{0,5} / P; \end{aligned} \quad (2)$$

где  $X_{\text{пр}}$  – реактивное сопротивление проводника, Ом;  $a$ ,  $b$  – удельные сопротивления (активное и реактивное) определяются по графикам Неймана в зависимости от плотности тока (рис. 1); значение тока замыкания принимается равным 10 А в установках напряжением до 1000 В и фактическому значению в электроустановках напряжением свыше 1000 В;  $f$  – частота электрической сети, Гц;  $P$  – периметр поперечного

сечения проводника, см.

Если сопротивление естественного заземляющего устройства с учетом сопротивления заземляющего проводника удовлетворяет требованиям безопасности, проектирование заземления на этом заканчивается. В случае, если сопротивление заземляющего устройства превышает допустимое значение, проводится расчет дополнительного искусственного устройства заземления, которое необходимо подключить параллельно естественному.

Искусственные заземляющие устройства могут быть реализованы в виде контурного (распределенного) или в виде выносного (сосредоточенного) заземления. Контурные заземлители представляют собой систему горизонтальных металлических конструкций, заглубленных в землю и расположенных на территории размещения установки, подлежащей заземлению (электростанции, распределительные станции, трансформаторы и др. силовые устройства). Контурные заземляющие устройства проектируются и устанавливаются уже в процессе строительства, а потому имеют ограниченное применение, несмотря на очевидные преимущества в эффективности и надежности. Область

применения контурных заземлителей распространяется на электроустановки напряжением более 1000 В. Учитывая статистические данные, которые свидетельствуют о том, что подавляющая часть (около 80%) электротравм происходит при эксплуатации установок напряжением менее 1000 В, остановимся на проектировании выносных заземлителей.

Выносное заземляющее устройство представляет собой совокупность вертикальных и горизонтальных электродов, электрически соединенных между собой и присоединенных к корпусу заземляющим проводником. В качестве вертикальных электродов используют обычно стальные стержни диаметром 10 – 16 мм и длиной 2,5 – 5 м, угловую сталь с шириной полки 40 – 65 мм или стальные трубы диаметром 50 – 60 мм, толщиной стенок не менее 3,5 мм и длиной 2,5 – 3,0 м. Горизонтальный электрод, обеспечивающий электрическое соединение вертикальных, изготавливают из полосовой стали шириной 20 – 40 мм и толщиной 4 мм или из стали круглого сечения диаметром 10 – 12 мм. В установках напряжением более 1000В горизонтальные заземлители выбирают по термостойкости, исходя из допустимой температуры нагрева (400 °С). Вертикальные электроды в

плане размещают в ряд или по контуру. Верхние концы вертикальных электродов (а значит и горизонтальный электрод) располагают на глубине 0,5 – 0,8 м от поверхности земли. В ряде случаев верхний слой земли имеет сравнительно малое удельное сопротивление (например, в районах вечной мерзлоты), тогда целесообразно использовать протяженные горизонтальные заземлители (без вертикальных).

Заземлители не следует размещать вблизи горячих трубопроводов, в местах, где возможны пропитка грунта нефтепродуктами или механическое повреждение электродов (железнодорожные пути). В случае опасности коррозии следует применять оцинкованные заземлители или увеличивать их сечение.

Расчет заземлителей электроустановок напряжением до 35 кВ включительно выполняют методом коэффициентов использования, предполагая, что почва однородна в местах расположения электродов. Цель расчета – определение количества, размеров и расположения электродов, при которых сопротивление заземляющего устройства не превысит допустимого значения.

Предлагается следующая последовательность расчета:

1. Определяют допустимое значение сопротивления заземляющего устройства  $R_{\text{д}}$ , исходя из мощности установки, режима нейтрали и режима безопасности помещения.

2. Рассчитывают сопротивление естественных заземлителей  $R_{\text{е}}$  по формулам табл. 3, принимая значение удельного сопротивления почвы по таблице 3. В тех случаях, когда это возможно, удельное сопротивление почвы определяют экспериментально.

3. Вычисляют сопротивление заземляющего проводника естественных заземлителей  $R_{\text{п1}}$  по формулам (1) и (2), а также рис. 1.

4. Проверяют возможность ограничиться использованием естественного заземляющего устройства по формуле

$$R_{\text{е}} + R_{\text{п1}} \leq R_{\text{д}}. \quad (3)$$

5. Находят допустимое сопротивление искусственного заземляющего устройства (если неравенство (3) не выполняется) по формуле

$$R_{\text{ид}} = R_{\text{д}} \cdot (R_{\text{е}} + R_{\text{п1}}) / (R_{\text{е}} + R_{\text{п1}} - R_{\text{д}}). \quad (4)$$

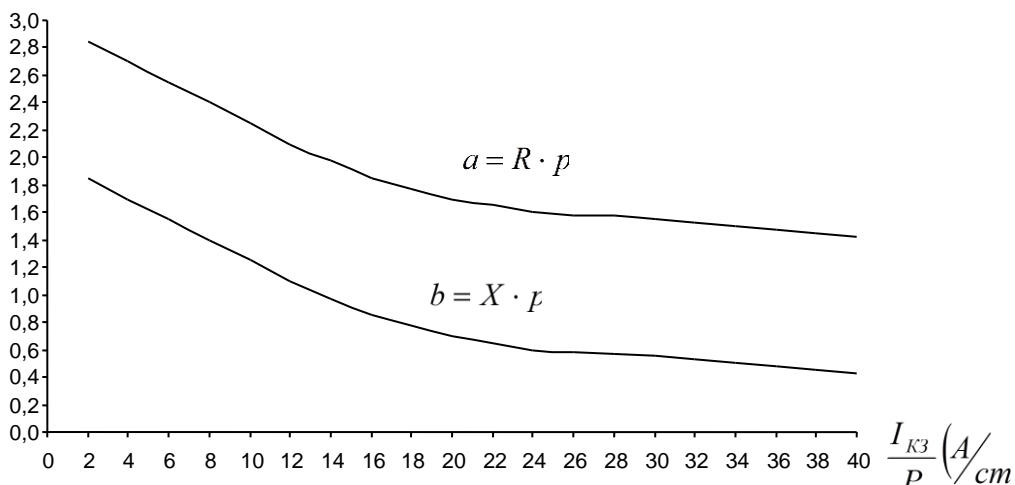
6. Определяют допустимое сопротивление искусственного заземлителя

$$R_{зд} = R_{ид} - R_{п2}, \quad (5)$$

где  $R_{п2}$  – сопротивление заземляющего проводника искусственного заземляющего устройства, которое рассчитывается по формулам (1), (2) и рис. 1.

**Рис. 1. Графики для расчета активного и реактивного сопротивлений стальных проводников**

$a$  и  $b$  Ом·см/км



7. Вычисляют расчетное значение сопротивления одного вертикального электрода  $R_{вр}$  по формулам табл. 1.



8. Находят ориентировочное количество вертикальных заземляющих электродов

$$n_o = R_{вр} / R_{зд}. \quad (6)$$

9. Определяют расположение вертикальных электродов (в ряд или по контуру), расстояние между ними –  $a$ , причем это расстояние рекомендуется выбирать больше длины электродов  $l$ . По табл. 3 находят значение коэффициента использования вертикальных электродов  $\eta_v$  и уточненное их количество

$$n = n_o / \eta_v. \quad (7)$$

Затем определяют уточненное значение сопротивления вертикального электрода

$$R_{в1} = R_{вр} / \eta_v. \quad (8)$$

10. Определяют длину горизонтального электрода, соединяющего все вертикальные

$$L = 1.05 \cdot a(n-1). \quad (9)$$

Таблица 3.

**Коэффициенты использования  $\eta_v$  вертикальных электродов без учета влияния горизонтального электрода**

Расположение вертикальных электродов	Отношение $a/l^*$	Количество вертикальных электродов **				
		2	4	6	10	20
Электроды, расположенные в ряд	1	0,85	0,73	0,65	0,59	0,48
	2	0,91	0,83	0,77	0,74	0,67
	3	0,94	0,89	0,85	0,81	0,76
Электроды, расположенные по контуру	1	-	0,69	0,61	0,56	0,47
	2	-	0,78	0,73	0,68	0,63
	3	-	0,85	0,80	0,76	0,71

\*  $a$  – расстояние между вертикальными электродами, м;  $l$  – длина вертикальных электродов, м.

\*\* При количестве электродов, отличающихся от указанных в таблице, коэффициенты использования определяются интерполяцией.

По формулам табл. 1 определяют расчетное значение сопротивления горизонтального электрода  $R_{гр}$ . По табл. 4 определяют значение коэффициента использования горизонтального электрода  $\eta_{г}$  и реальное значение сопротивления по формуле

$$R_{г} = R_{гр} / \eta_{г}. \quad (10)$$

Таблица 4.

**Коэффициенты использования  $\eta$  горизонтального электрода, соединяющего вертикальные электроды**

Расположение вертикальных электродов	Отношение $a/l^*$	Количество вертикальных электродов **				
		2	4	6	10	20
Электроды, расположенные в ряд	1	0,85	0,77	0,72	0,62	0,42
	2	0,94	0,80	0,84	0,75	0,56
	3	0,96	0,92	0,88	0,82	0,62
Электроды, расположенные по контуру	1	-	0,45	0,40	0,34	0,27
	2	-	0,55	0,48	0,40	0,32
	3	-	0,70	0,64	0,56	0,45

\*  $a$  – расстояние между вертикальными электродами, м;  $l$  – длина вертикальных электродов, м.

\*\* При количестве электродов, отличающихся от указанных в таблице, коэффициенты использования определяются интерполяцией.

11. Проверяют соответствие общего сопротивления искусственного заземлителя  $R_z$  допустимому значению  $R_{зд.}$ , считая, что вертикальные электроды соединены между собой параллельно и параллельно горизонтальному электроду. Если расчетное значение сопротивления превышает допустимое, изменяют параметры заземлителя.

Формула для определения общего сопротивления искусственного заземлителя

$$R_3 = R_{\Gamma} \cdot R_{B1} / (R_{B1} + n \cdot R_{\Gamma}). \quad (11)$$

**Пример.** Определить количество, размеры и расположение электродов искусственного заземления для электроустановки напряжением 380 В мощностью 15 кВт. Существует возможность подключения естественного заземляющего устройства, сопротивление которого по результатам измерения составило 45 Ом. Почва в районе размещения электроустановки – однородная твёрдая супесь. В качестве электродов заземления можно использовать стальные стержни диаметром 15 мм. Для соединения корпуса с заземлителем предполагается использовать стальную ленту сечением  $(4 \cdot 7) \text{ мм}^2$ . Расстояние от электроустановки до предполагаемого расположения заземлителя 50 м.

**Решение:**

1. В соответствии с требованиями правил устройства электроустановок (ПЭУ) сопротивление заземляющего устройства для электроустановки напряжением до 1000 В и мощностью менее 100 кВт·А должно быть не более 10 Ом; т.е.  $R_d = 10 \text{ м.}$

2. Так как сопротивление естественного заземляющего устройства  $R_e + R_{п1} = 45 \text{ Ом}$  (из условий задачи) больше допустимого, т.е. неравенство (3) не выполняется, необходимо параллельно ему подключить искусственное заземляющее устройство. Максимальное допустимое сопротивление искусственного заземляющего устройства определим по формуле (4)

$$R_{ид} = 45 \cdot 10 / (45 - 10) = 12,85 \text{ Ом}.$$

3. Заземляющий проводник, который предлагается заданием, соответствует нормам по толщине 4 мм (см. табл. 4.2), но не соответствует по сечению, так как сечение проводника  $28 \text{ мм}^2$ , а требуемое для наружной проводки  $48 \text{ мм}^2$ . Следовательно, необходимо использовать две параллельно соединённые жилы. Общая площадь сечения составляет при этом  $56 \text{ мм}^2$ .

Сопротивление заземляющего проводника определяется для каждой жилы в отдельности по формулам (2) с использованием рис. 1.

$$R_{пр} = 2,7 \cdot 0,05 \cdot 50^{0,5} / 2,2 = 0,43 \text{ Ом};$$

$$X_{пр} = 1,6 \cdot 0,05 \cdot 50^{0,5} / 2,2 = 0,26 \text{ Ом}.$$

В формулах использованы следующие значения параметров:

$$l = 50 \text{ м} = 0,05 \text{ км}; f = 50 \text{ Гц}; P = 22 \text{ мм} = 2,2 \text{ см}; a = 2,7; b = 1,6.$$

С учётом параллельного соединения двух проводников

$$Z_{\text{пр}} = 0,5 \cdot (0,43^2 + 0,26^2)^{0,5} = 0,25 \text{ Ом}.$$

4. Допустимое сопротивление искусственного заземлителя определяется по формуле (5)

$$R_{\text{зд}} = 12,85 - 0,25 = 12,6 \text{ Ом}.$$

5. Определяется сопротивление одного вертикального электрода. Из табл. 1 с учётом рекомендаций ПУЭ выбираем формулу, расположенную во второй строке (для стержня, расположенного вертикально в грунте). Подставляем в формулу следующие значения параметров:

$\rho = 400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  – удельное сопротивление твёрдой супеси, взятое из табл. 5;

*Таблица 5.*

***Ориентировочные значения удельных электрических сопротивлений различных земель и воды***

Вид земли и воды	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·м	
	Возможные пределы изменения	Значения, рекомендуемые для расчета
1. Кокс	2-5	4
2. Торф	10-30	20
3. Садовая земля	20-60	50

4. Чернозем	10-50	40
5. Гранит	1000-1200	1200
6. Сланцы	10-100	90
7. Пахотная	20-180	150
8. Лёсс	200-300	300
9. Аргелиты	10-60	50
10. Алевриты	100-300	250
11. Мел	20-100	90
12. Скальные	1000 - 3000	3000
13. Гравий,	4000 - 7000	6000
14. Известняк	150-200	200
15. Известняк	1000-2000	2000
16. Глины	3-80	60
17. Глины	40-80	80
18. Суглинок	5-40	30
19. Суглинок	50-150	150
20. Песок	300 - 700	700
21. Песок	500-1 500	1 500
22. Супесь	20-60	50
23. Супесь	100-200	200
24. Супесь	200-400	400
25. Мергели	10-100	100
26. Мергели	100-250	200
27. Мергели	250-400	350
28. Вода морская	0,2-1,0	1,0
29. Вода речная	10-100	70
30. Вода	40-50	50
31. Вода	20-70	60

$l = 4$  м – длина одного электрода, выбирается произвольно в пределах, рекомендуемых ПУЭ;

$d = 0,015$  м – диаметр электрода в соответствии с заданием;

$t = l/2 + h = 2,5$  м – глубина расположения середины вертикального электрода, где  $h = 0,5$  м – расстояние от поверхности земли до верхнего края электрода, выбирается произвольно с учётом рекомендаций ПУЭ.

$$R_{\text{в1}} = 400[\ln(2 \cdot 4 / 0,015) + 0,5 \ln(14/6)] / (2\pi \cdot 4) = 106,5 \text{ Ом.}$$

6. Ориентировочное количество вертикальных электродов находится по формуле (6) и округляется до большего целого числа

$$n_0 = 106,5 / 12,6 = 9 \text{ шт.}$$

7. В соответствии с нормативными документами выбирается способ расположения электродов “в ряд” и расстояние между ними  $a = 4$  м.

Коэффициент использования вертикальных электродов находится интерполяцией значений, приведённых в табл. 5;  $\eta_{\text{в}} = 0,63$ .

По формуле (7) находится уточнённое число электродов



$$n = 9/0,63 \approx 14 \text{ шт.}$$

По формуле (8) – уточнённое значение сопротивления одного вертикального электрода:

$$R_{в1} = 106,5/0,63 = 168 \text{ Ом.}$$

8. Находится длина горизонтального электрода (формула (9))

$$L = 1,05 \cdot 4 \cdot 13 = 54,6 \text{ м.}$$

Из табл. 1 в соответствии с принятым расположением электродов выбираем формулу в 4-й строке;

Для горизонтальных и вертикальных электродов используется одинаковый стальной стержень диаметром  $d = 0,015 \text{ м.}$

Находится расчётное сопротивление горизонтального электрода

$$R_{гр} = 400 \ln[54,6^2 / (0,5 \cdot 0,015)] / (2\pi \cdot 54,6) = 15 \text{ Ом.}$$

По таблице определяется коэффициент использования горизонтального электрода  $\eta_r = 0,6$  и уточнённое значение сопротивления горизонтального электрода (формула (10))

$$R_r = 15/0,6 = 25 \text{ Ом.}$$

9. Определяется уточнённое сопротивление заземлителя (формула (11))

$$R_3 = 25 \cdot 168 / (168 + 14 \cdot 25) = 8,1 \text{ Ом.}$$

Полученное значение меньше допустимого, а это значит, что расчёт завершён.

*Таблица 6.*

***Коэффициенты использования  $\eta_n$ , параллельно уложенных горизонтальных полосовых электродов***

Длина полосы, м	Число полос , шт.	Расстояние между полосами, м				
		1	2,5	5,0	10,0	15,0
15	2	0,63	0,75	0,83	0,92	0,96
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
	20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
25	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,23	0,31	0,43	0,57	0,66
	20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
50	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
	20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44
75	5	0,31	0,38	0,45	0,53	0,58
	10	0,18	0,25	0,31	0,41	0,47
	20	0,11	0,16	0,22	0,31	0,38
100	5	0,30	0,36	0,43	0,51	0,57
	10	0,17	0,23	0,28	0,37	0,44
	20	0,10	0,15	0,20	0,28	0,35

Задание: Рассчитать совмещенное ЗУ для цеховой трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ, подсоединенной к

электросети с изолированной нейтралью. При этом принять: разомкнутый контур ЗУ, в качестве вертикального электрода - уголок шириной  $b_e = 16$  мм;  $\sigma = 50$  м, горизонтальный электрод -  $S_e = 40$  мм<sup>2</sup>;  $d_r = 12$  мм.

Исходные данные: Грунт каменистый,  $H_0 = 0,5$  м,  $l_{воз} = 15$  км,  $l_{каб} = 60$  км,  $n_e = 6$  шт,  $l_e = 2,5$  м,  $a_b = 5$  м,  $R_e = 15$  Ом.

Расчет:

Расчетный ток замыкания на землю:

$$J_3 = \frac{U_{л} \cdot (35 \cdot l_{каб} + l_{воз})}{350} = \frac{6 \cdot (35 \cdot 60 + 15)}{350} = 36,3 \text{ А}$$

где  $U_{л}$  - линейное напряжение сети, кВ;  $l_{каб}$  - общая длина подключенных к сети кабельных линий, км;  $l_{воз}$  - общая длина подключенных к сети ЛЭП, км.

Определение расчетного удельного сопротивления грунта:

$$\rho_{расч} = \rho_{табл} \cdot \psi = 700 \cdot 1,3 = 910 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

где  $\rho_{табл} = 700$  Ом · м - измеренное удельное сопротивление грунта (из табл.7 для каменистого грунта);  $\psi = 1,3$  - климатический коэффициент, принятый по табл.8 для каменистого грунта.

Таблица 7

Удельные сопротивления грунтов и воды

Грунт	Значения $\rho_{табл}$ , Ом·м	Грунт, вода	Значения $\rho_{табл}$ , Ом·м
Торф	10...30	Каменистый	500...800
Чернозем	9...53	Скальный	$10^4...10^5$
Садовая земля	30...60	Вода:	
Глина	8...20	речная	10...100
Суглинок	40...150	прудовая	40...50
Супесь	150...400	грунтовая	20...70
Песок	400...700	в ручьях	10...60

Таблица 8

Значения климатических коэффициентов для грунта

Г р у н т	Глубина заложения, м	Значения $\psi$
Торф	0...2	1.1
Садовая земля	0...3	1.32
Гравий с примесью глины	0...2	1.2
Глина	0...2	1.36
Гравий с примесью песка	0...2	1.3
Песок	0...2	1.56
Известняк	0...2	1.51
Суглинок	0.8...3.8	1.5

Определение необходимости искусственного заземлителя и вычисление его требуемого сопротивления.

Сопротивление ЗУ  $R_3''$  выбирается из табл. 9 в зависимости от U ЭУ

Таблица 9

Предельное допустимое сопротивление ЗУ для ЭУ напряжением выше 1кВ в сети с изолированной нейтралью

Использование ЗУ	Сопротивление ЗУ, Ом	Удельное сопротивление грунта, Ом·м
Для ЭУ U до 1 кВ и выше	$R_3'' = 125 / I_3 \leq 4$	} $\rho \leq 500$
Для ЭУ U > 1 кВ	$R_3'' = 250 / I_3 \leq 10$	
Для ЭУ U до 1 кВ и выше	$R_3'' = 0.25 \rho / I_3 \leq 100$	} $500 < \rho \leq 5000$
Для ЭУ U > 1 кВ	$R_3'' = 0.50 \rho / I_3 \leq 100$	
Для ЭУ U до 1 кВ и выше	$R_3'' = 1250 / I_3 \leq 100$	} $\rho > 5000$
Для ЭУ U > 1 кВ	$R_3'' = 2500 / I_3 \leq 100$	

и  $\rho_{расч}$  в месте сооружения ЗУ, а также режима нейтрали данной электросети:

$$R_3'' = \frac{0.25 \rho}{J_3} = \frac{0.25 \cdot 910}{36,3} = 6,3 \text{ Ом} \leq 100 \text{ Ом}$$

$R_e > R_3^H, \Rightarrow$  искусственный заземлитель необходим.  
Его требуемое заземление:

$$R_u \leq \frac{R_e \cdot R_3^H}{R_e - R_3^H} \leq 10,9 \text{ Ом}$$

Определение длины горизонтальных электродов для разомкнутого контура ЗУ:

$$l_z = n_b \cdot a_b = 6 \cdot 5 = 30 \text{ м}$$

где  $a_b$  - расстояние между вертикальными электродами  $n_b$ .

Расчетное значение сопротивления вертикального электрода:

$$\begin{aligned} H &= H_0 + 0,5 \cdot l_e = 05 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ м} \\ R_e &= \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot l_e} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l_e}{d_e} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot H + l_e}{4 \cdot H - l_e} \right) = \\ &= \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,016} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 2,5}{4 \cdot 1,75 - 2,5} \right) = 354 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Расчетное значение сопротивления горизонтального электрода по (формуле г) :

$$\begin{aligned} R_z &= \frac{\rho_{расч}}{2 \cdot \pi \cdot l_z} \cdot \ln \frac{l_z^2}{d_z \cdot H_0} = \\ &= \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \cdot \ln \frac{30^2}{0,012 \cdot 0,5} = 57 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Коэффициенты использования для вертикальных и горизонтальных электродов по данным табл. 10 равны:  $\eta_b = 0,73$ ,  $\eta_r = 0,48$ .

Таблица 10

Коэффициенты использования вертикальных и горизонтальных электродов

Число вертикальных электродов $n_v$ , шт.	Отношение расстояний между электродами к их длине $\alpha_\theta$					
	1		2		3	
	$l_\theta$	$l_r$	$l_\theta$	$l_r$	$l_\theta$	$l_r$
Электроды размещены в ряд (разомкнутый контур)						
2	0.85	0.85	0.91	0.94	0.94	0.96
4	0.73	0.77	0.83	0.80	0.89	0.92
6	0.65	0.72	0.77	0.84	0.85	0.88
10	0.59	0.62	0.74	0.75	0.81	0.82
20	0.48	0.42	0.67	0.56	0.76	0.68
Электроды расположены по контуру (замкнутый контур)						
4	0.69	0.45	0.78	0.55	0.85	0.70
6	0.61	0.40	0.73	0.48	0.80	0.64
10	0.56	0.34	0.68	0.40	0.76	0.56
20	0.47	0.27	0.63	0.32	0.71	0.45
40	0.41	0.22	0.58	0.29	0.66	0.39
60	0.39	0.20	0.55	0.27	0.64	0.36
100	0.36	0.19	0.52	0.23	0.62	0.33

Расчетное сопротивление группового заземлителя:

$$R = \frac{R_\theta \cdot R_z}{R_\theta \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_\theta \cdot n_\theta} =$$

$$= \frac{354 \cdot 57}{354 \cdot 0,48 + 57 \cdot 0,73 \cdot 6} = 48 \text{ Ом}$$

$R > R_u$ , значит увеличиваем количество электродов

Принимаем  $n = 25$ .

$l_\theta = 125 \text{ м}$

$R_z = 17,2 \text{ Ом}$

По табл. 10  $\eta_\theta = 0,63$ ,  $\eta_z = 0,32$

$R = 15.84$

$$R > R_u$$

$$n_{\theta} = 45$$

$$l_2 = 225 \text{ м}$$

$$R_2 = 10,3 \text{ Ом}$$

По табл. 6.9

$$\eta_{\theta} = 0,58, \quad \eta_2 = 0,29$$

$$R = 10,8 \text{ Ом}$$

$$R_K = R_e \cdot R / (R_e + R) \leq R^M_3$$

$$R_K = 15 \cdot 10,8 / (15 + 10,8) = 6,27 \text{ Ом} \leq 6,3 \text{ Ом}$$

$R_e$  – естественное сопротивление, Ом;

$R_u$  – сопротивление искусственного заземлителя, Ом;

$R_{\theta}$  – сопротивление вертикального электрода, Ом;

$R_2$  – сопротивление горизонтального электрода, Ом;

$R$  – сопротивление группового заземлителя, Ом;

$R_K$  – общее сопротивление комбинированного ЗУ, Ом;

$\eta_{\theta}, \eta_2$  – коэффициент использования вертикального и горизонтального электродов;

$a_{\theta}$  – расстояние между электродами, м;

$l_{\theta}$  – длина электродов, м;

$n_{\theta}$  – количество вертикальных электродов.

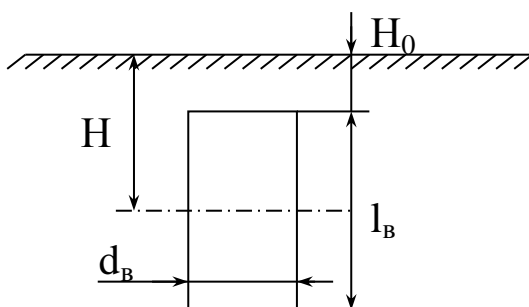


Рис. 1. Вертикальный электрод

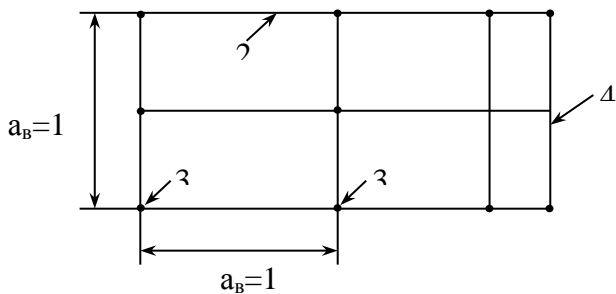


Рис. 2. План комбинированного ЗУ  $R_n$

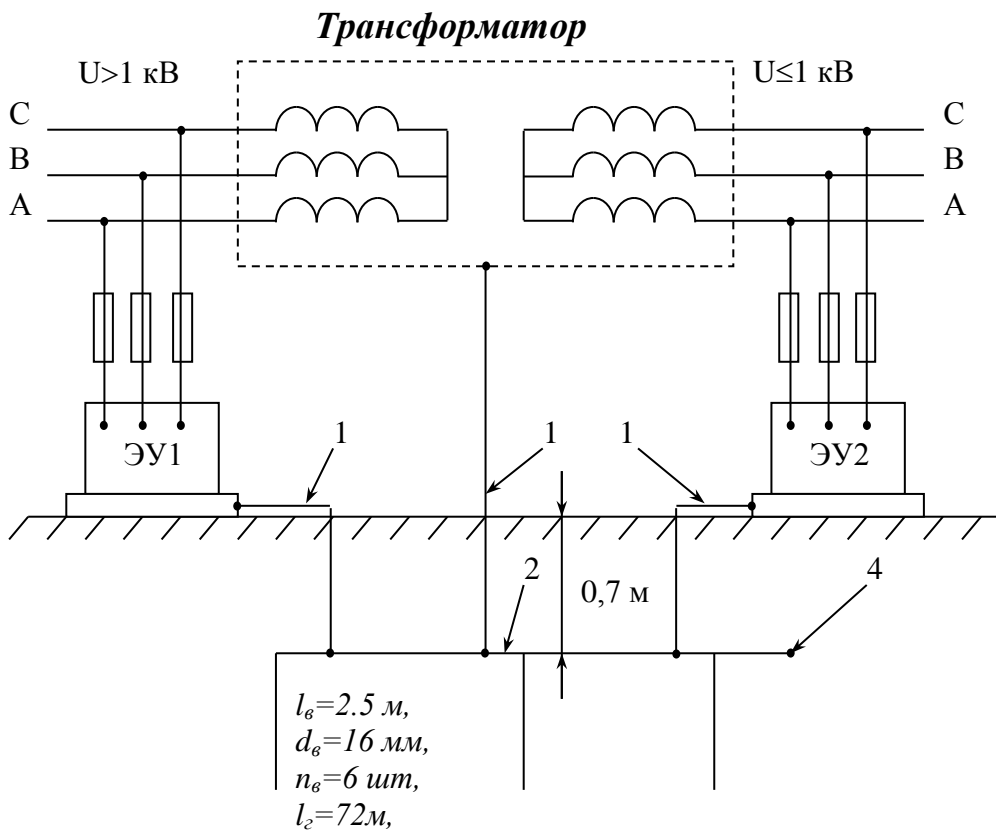




Рис. 3. Схема использования освещенного ЗУ в системе защитного ЭУ напряжением до и выше 1 кВ

- 1 – заземляющий проводник;
- 2 – горизонтальный заземлитель;
- 3 – вертикальный заземлитель;
- 4 – естественный заземлитель (пруток) с  $R_e = 15 \text{ Ом}$ ;
- ЭУ1 – высоковольтная ЭУ;
- ЭУ2 – низковольтная ЭУ.

Конструктивные решения:

1. присоединение корпусов электромашин, трансформаторов, аппаратов, светильников и т.п., металлических корпусов передвижных и переносных ЭУ и ЗУ при помощи заземляющего проводника сечением не менее  $10 \text{ мм}^2$ .
2. расположение ЗУ, как правило, в непосредственной близости от ЭУ. Оно должно из естественных и искусственных заземлителей. При этом в качестве естественных заземлителей следует использовать проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов и смесей), обсадные трубы скважин, металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей, и

другие элементы. Для искусственных заземлителей следует применять только стальные заземлители.

### **Вопросы для самоконтроля по теме «Заземление»**

1. Какие факторы должны учитываться при выборе технических способов к средств защиты?
2. Как классифицируются помещения по степени опасности поражения электрическим током?
3. Какие технические способы и средства защиты должны применяться для обеспечения электробезопасности?
4. Каковы основные условия безопасности в передвижных электроустановках?
5. Каковы меры обеспечения электробезопасности станочного оборудования?
6. Что может быть использовано в качестве естественных заземлителей?
7. Какие требования предъявляются к искусственным заземлителям?
8. Что такое защитное заземление?
9. В каких электроустановках должно быть выполнено заземление или зануление?
10. Что может быть использовано в качестве естественных заземлителей?

11. Какие части электроустановок подлежат заземлению или занулению?

12. Какое оборудование не подлежит заземлению?

13. Каким образом производится заземление аппаратов, щитков, шкафов и ящиков с электрооборудованием напряжением до 1000 В?

14. Как заземляются краны?

15. Каковы особенности заземления лифтов?

16. В чем заключаются особенности выполнения заземляющих устройств во взрывоопасных помещениях?

17. Можно ли объединять заземлители сетей переменного и постоянного тока?

18. Можно ли применять общее заземляющее устройство, для заземления электроустановок различных назначений и напряжений?

18. Что входит в объем испытаний заземляющих устройств?

20. Каким образом проверяется состояние элементов заземляющего устройства?

## **ТЕМА 2. ЗАЩИТНОЕ ЗАНУЛЕНИЕ. РАСЧЕТ СХЕМЫ ЗАНУЛЕНИЯ НА ОТКЛЮЧАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ.**

Понятие "зануление" в последнее время все больше заменяется определением такого вида обеспечения электробезопасности, как «заземляющая система с нулевым заземленным проводом». Однако в действующем ГОСТ 12.1.009-76 "Электробезопасность. Термины и определения (поняти) зануление" осталось, и им достаточно часто пользуются энергетики.

Под занулением понимается преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением, с нулевым защитным проводником. Зануление как защитное мероприятие применяется только в трехфазных четырехпроводных сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, в однофазных двухпроводных сетях переменного тока с глухозаземленным выводом источника тока, а также в трехпроводных сетях постоянного тока с глухозаземленной средней точкой источника. Учитывая ограниченный объем книги, дальнейшее изложение материала будет рассматриваться для трехфазных

Принципиальная схема зануления приведена на рис. 2:



1 – корпус электроустановки; 2 – аппараты защиты; 3 – нулевой защитный проводник;  $r_0$ ,  $r_{II}$  –

сопротивления заземления нейтрали и нулевого защитного проводника.

Исходя из определения понятия “зануление” и анализа принципиальной схемы, можно выделить основные элементы.

**Нулевой защитный проводник (НЗ)**, к которому осуществляется электрическое подсоединение (участок *а-б* на схеме) нетоковедущих элементов электропотребителей. Такое соединение позволяет превратить замыкание на корпус в однофазное короткое замыкание, т.е. между фазным и нулевым защитным проводниками с целью создания значительного по величине тока короткого замыкания  $I_k$ , необходимого для надежного срабатывания аппаратов защиты и тем самым автоматического отключения поврежденной электроустановки от питающей её сети. Нулевой защитный проводник следует отличать от нулевого рабочего проводника, который также соединен с заземленной точкой источника тока или ее эквивалентом, но предназначен для подключения однофазных электропотребителей.

**Аппараты защиты** (2 на рис. 2), которыми могут являться плавкие вставки предохранителей или

максимальные автоматы, устанавливаемые для защиты от токов короткого замыкания; магнитные пускатели со встроенной тепловой защитой; контакторы в сочетании с тепловыми реле для защиты от перегрузки; автоматы с комбинированными расщепителями и др.

**Повторные заземлители** ( $r_{\Pi}$  на рис. 2), необходимые для дополнительного заземления нулевого защитного проводника, хотя они и не влияют на отключающую способность схемы зануления, и в этом смысле без них можно обойтись. Однако при отсутствии повторного заземления нулевого защитного проводника существует электроопасная ситуация для человека пока существует замыкание фазы на корпус. Кроме этого, в случае обрыва нулевого защитного проводника эта опасность резко повышается, так как напряжение относительно земли некоторых зануленных электропотребителей может достигать фазного напряжения сети.

Таким образом, образование пути прохождения тока  $I_z$  (см. рис. 2) через участок земли за счет повторного заземления значительно уменьшает опасность поражения током, но не может устранить ее полностью. В связи с

этим требуется тщательная прокладка нулевого защитного проводника, чтобы исключить возможность его обрыва.

Целью расчета зануления является определение условий, при которых зануление быстро и надежно отключает поврежденную электроустановку от сети и обеспечивает безопасность прикосновения человека к зануленным частям электропотребителей в аварийный период. Основой расчета зануления является проверка на отключающую способность аппаратов защиты, а также расчет заземления  $r_0$  нейтрали из условия безопасности при замыкании фазового провода на землю и расчета повторных заземлений нулевого защитного проводника  $r_{\text{п}}$ .

### **Вопросы для самоконтроля по теме «Защитное зануление»**

1. Каким образом можно проверить условия срабатывания защитных аппаратов при однофазном замыкании в сетях с заземленной нейтралью?
2. Для каких целей необходимо повторное заземление нулевого провода?
3. Какие мероприятия по обеспечению надежности системы зануления необходимо проводить в электроустановках напряжением до 1000 В?



4. Что может быть использовано в качестве нулевых защитных проводников?

5. Какие существуют способы соединений и присоединений заземляющих и нулевых защитных проводников?

6. В чем сущность зануления?

7. Можно ли обеспечить безопасность сети с заземленной нейтралью при выполнении только заземления электроприемника?

8. Каковы условия обеспечения автоматического отключения аварийного участка в сети с заземленной нейтралью?

9. Каким образом выполняется зануление осветительных установок во взрывоопасных и пожароопасных помещениях?

10. Какие мероприятия по обеспечению надежности системы зануления необходимо проводить в электроустановках напряжением до 1000 В?

11. Почему не разрешается использование металлических конструкций зданий в качестве нулевого провода?

12. Может ли осуществляться в одном помещении заземление одних электроприемников и зануление других?

13. Можно ли использовать сеть заземления в качестве нулевого провода?

14. Для каких целей необходимо повторное заземление нулевого провода?

15. Каким образом можно проверить условия срабатывания защитных аппаратов при однофазном замыкании в сетях напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью?

### **Расчет на отключающую способность**

При возникновении электроопасной ситуации (например, замыкании фазы на зануленный корпус) электроустановка автоматически отключается, если величина тока однофазного короткого замыкания  $I_K$ , А, удовлетворяет условию

$$I_K \geq K \cdot I_{\text{ном}}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток плавкой вставки предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя, А;  $K$  - коэффициент кратности тока.

Значение коэффициента  $K$  определяется в зависимости от выбора аппарата защиты. Согласно ПУЭ для плавкого элемента предохранителя  $K=3$  (во взрывоопасных зонах  $K=4$ ). Для нерегулируемых расщепителей и регулируемого расщепителя с уставкой

тока автоматического выключателя величина коэффициента  $K$  тоже равна 3 (во врывоопасных зонах  $K=6$ ). Значения  $I_{\text{НОМ}}$  некоторых стандартных предохранителей для использования в сетях с напряжением 220 и 380 В приведены в табл. 7.

Таблица 7.

**Значения  $I_{\text{НОМ}}$  предохранителей**

Тип предохранителя	$I_{\text{НОМ}}$ , А	Тип предохранителя	$I_{\text{НОМ}}$ , А
НПИ-15	6,10,15	ПН2-400	200,250,300,350 400
НПИ-60М	20,25,35,45,60	ПН2-600	300,400,500,600
ПН2-100	30,40,50,60,80,100	ПН2-1000	500,600,750,800
ПН2-250	80,100,120,150,200, 250		1000

При защите сетей автоматическими выключателями только с электромагнитным расцепителем кратность тока необходимо принимать не менее 1,4 для  $I_{\text{НОМ}} \leq 100$  А и не менее 1,25 для  $I_{\text{НОМ}} > 100$  А.

Расчетные схемы зануления на отключающую способность, соответствующие принципиальной схеме, приведены на рис. 3.

Значение  $I_{\text{к}}$  замыкания будет определяться фазным напряжением  $U_{\text{ф}}$  и сопротивлением соответствующих цепей: полным сопротивлением трансформатора  $Z_{\text{т}}$ , фазного провода  $Z_{\text{ф}}$ , нулевого защитного проводника  $Z_{\text{нз}}$ , внешнего индуктивного

сопротивления, обусловленного взаимоиנדукцией проводников  $X_{\Pi}$ , а также от активных сопротивлений заземлений нейтрали трансформатора  $r_0$  и повторного заземления нулевого защитного проводника  $r_{\Pi}$  (рис 3 а).

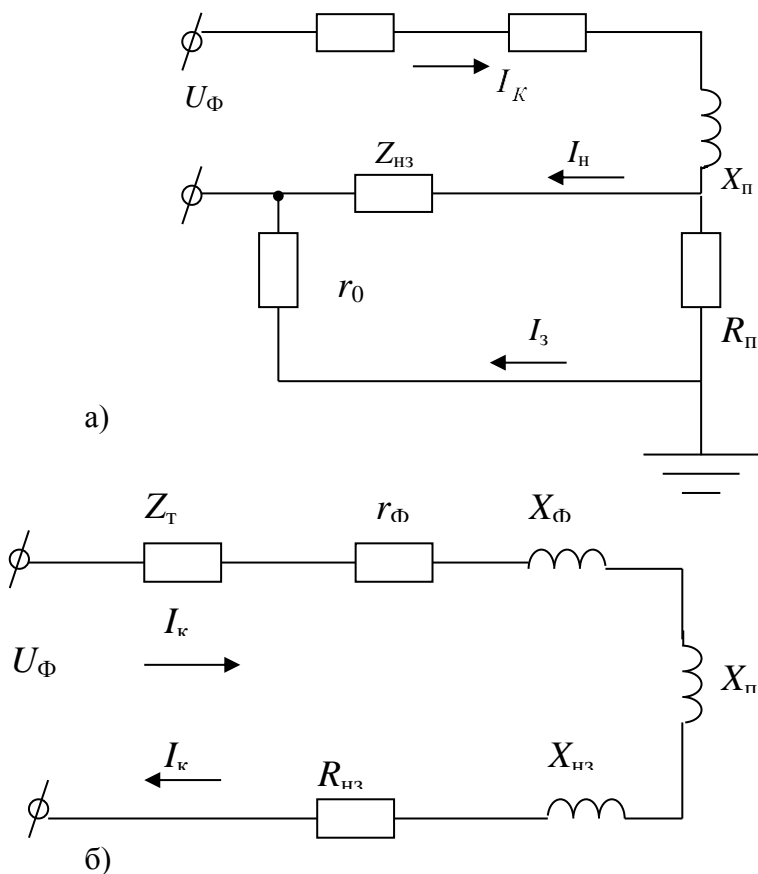


Рис. 3. Расчетные схемы зануления на отключающую способность:

а – полная; б – упрощенная

Если учесть, что  $r_0$  и  $r_{\Pi}$ , как правило, велики по сравнению с другими сопротивлениями цепей, расчетная схема упрощается (рис 3 б), а выражение для тока короткого замыкания  $I_K$  будет

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_\phi}{\frac{\bar{Z}_T}{3} + \bar{Z}_\Phi + \bar{Z}_{H3} + jX_\Pi}$$

или

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_\phi}{\frac{\bar{Z}_T}{3} + \bar{Z}_\Pi},$$

где  $\bar{Z}_T, \bar{Z}_\Phi, \bar{Z}_{H3}$  – комплексы полных сопротивлений трансформатора, фазного и нулевого защитного проводников, Ом;  $\bar{Z}_\Pi = \bar{Z}_\Phi + \bar{Z}_{H3} + jX_\Pi$  – комплекс полного сопротивления петли фаза-нуль, Ом.

При практических расчетах удобнее применять приближенную формулу для модуля тока короткого замыкания, в которой модули сопротивлений цепей складываются арифметически

$$I_K = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_\Pi}, \quad (13)$$

где  $Z_\Pi = \sqrt{(R_\Phi + R_{H3})^2 + (X_\Phi + X_{H3} + X_\Pi)^2}$  – модуль

полного сопротивления петли фаза – нуль, Ом;  $Z_T$  – модуль сопротивления трансформатора, Ом.

Учитывая (13), расчетная формула для зануления (12) преобразуется к виду

$$KI_{\text{НОМ}} \leq \frac{U_{\Phi}}{\frac{Z_T}{3} + \sqrt{(R_{\Phi} + R_{\text{НЗ}})^2 + (X_{\Phi} + X_{\text{НЗ}} + X_{\Pi})^2}}. \quad (14)$$

В этом выражении при заданной электрической сети (мощность питающего трансформатора, материал и геометрические параметры фазных проводников) неизвестными являются сопротивления нулевого защитного проводника  $R_{\text{НЗ}}$  и  $X_{\text{НЗ}}$ . Вычисление их обычно не производится, а в соответствии с ПУЭ выбирается сечение и материал нулевого защитного проводника из условия равенства полной проводимости его не менее 50% полной проводимости фазного провода, т.е.  $Z_{\text{НЗ}} \leq 2Z_{\Phi}$ . Выполнение этого условия предполагает обеспечение требуемого соотношения (12).

При реализации зануления в качестве нулевых защитных проводников “Правила устройства электроустановок” рекомендуют использовать изолированные или без изоляции проводники, а также

различные металлические конструкции зданий и сооружений, подкрановые пути, стальные трубы электропроводок, трубопроводы и т.п. Поэтому расчет зануления на отключающую способность превращается в проверку достаточности проводимости петли фаза – нуль по выражению (14), составляющие которого вычисляются или выбираются следующим образом.

**Значение  $Z_t$ , Ом,** выбирается в зависимости от мощности трансформатора  $P$ , кВ·А, номинального напряжения обмоток высшего напряжения  $U$ , кВ, и схемы соединения обмоток “звезда-звезда”  $Y/Y_n$  или “треугольник-звезда”  $\Delta/Y_n$  с четвертым нулевым защитным проводником с низкой стороны трансформатора (табл. 8).

**Значения  $R_\phi$  и  $R_{нз}$ , Ом,** определяются по известным данным – сечению, длине и материалу проводников. Для проводников из цветных металлов

$$R_\phi, R_{нз} = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, равное для меди 0,018, а для алюминия 0,028 Ом мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – длина проводника, м;  $S$  – сечение, мм<sup>2</sup>.

*Таблица 8.*

***Полное сопротивление трансформаторов, Ом***

$P$ , кВ·А	$U$ , кВ	$Z_T$ , Ом		$P$ , кВ·А	$U$ , кВ	$Z_T$ , Ом	
		$Y/Y_H$	$\Delta/Y_H$			$Y/Y_H$	$\Delta/Y_H$
25	6-10	3,11	0,906	400	6-10	0,195	0,056
40	6-10	1,949	0,562		20-35	0,191	-
63	6-10	1,237	0,36	630	6-10	0,129	0,042
	20-35	1,136	0,407		20-35	0,121	-
100	6-10	0,799	0,226	1 000	6-10	0,081	0,027
	20-35	0,764	0,327		20-35	0,077	0,032
160	6-10	0,487	0,141	1 600	6-10	0,054	0,017
	20-35	0,478	0,203		20-35	0,051	0,02
250	6-10	0,312	0,09				
	20-35	0,305	0,13				

Для стальных проводников активное сопротивление  $R_\phi$ ,  $R_{H3}$  определяется с помощью табл. 9 по формуле  $R_\phi$ ,  $R_{H3}=R_1 \cdot l$ , где  $R_1$  – активное сопротивление 1 км проводника круглого или прямоугольного сечения, Ом/км;  $l$  – длина проводника, км.

Значения  $X_\phi$  и  $X_{H3}$  для стальных проводников оказываются достаточно большими и также определяются с помощью табл. 9 по аналогичной формуле

$$X_\phi, X_{H3} = X_1 \cdot l,$$



где  $X_1$  индуктивное сопротивление 1 км проводника, Ом/км;  $l$  – длина проводника, км.

Таблица 9.

**Активные  $R_1$  и индуктивные  $X_1$  сопротивления  
стальных проводников при переменном токе 50 Гц,  
Ом/км**

Раз- меры, мм	Сече- ние, мм <sup>2</sup>	Плотность тока, $i_n$ , А/мм <sup>2</sup>							
		0,5		1,0		1,5		2	
		$R_1$	$X_1$	$R_1$	$X_1$	$R_1$	$X_1$	$R_1$	$X_1$
Полоса прямого сечения									
20×4	80	5,24	3,14	4,20	2,52	3,48	2,09	2,97	1,81
30×4	120	3,66	2,20	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,25
30×5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	-	-
40×4	160	2,80	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,96
50×4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,77
50×5	250	2,10	1,26	1,60	0,96	1,28	0,77	-	-
60×5	300	1,77	1,06	1,34	0,8	1,08	0,65	-	-
Проводник круглого сечения									
5	19,63	17,0	10,2	14,4	8,65	12,4	7,45	10,7	6,35
6	28,27	13,7	8,20	11,2	6,70	9,4	5,65	8,0	5,02
8	50,27	9,60	5,75	7,5	4,50	6,4	3,84	5,3	3,54
10	78,54	7,20	4,32	5,4	3,24	4,2	2,52	-	-
12	113,1	5,60	3,36	4,0	2,40	-	-	-	-
14	150,9	4,55	2,73	3,2	1,92	-	-	-	-
16	201,1	3,72	2,23	2,7	1,60	-	-	-	-

При выборе  $X_1$  также необходимо знать профиль, сечение проводника и ожидаемую плотность тока  $i_n$ , А/мм<sup>2</sup>. Для медных и алюминиевых проводников значения  $X_\phi$  и  $X_{нз}$  сравнительно малы (около 0,0156 Ом/км), поэтому ими в формуле (14) можно пренебречь.

**Значение  $X_\Pi$ , Ом,** может быть определено по известной из теоретических основ электротехники формуле для индуктивного сопротивления двухпроводниковой линии (с проводами круглого сечения одинакового диаметра  $d$ , м)

$$X_\Pi = \omega L = \omega \frac{\mu\mu_0}{\pi} l \ln \frac{2D}{d}, \quad (15)$$

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

Для линии длиной  $l = 1$  км, проложенной в воздушной среде ( $\mu=1$ ) при частоте тока  $f = 50$  Гц ( $\omega=314$  рад/с), уравнение (15) принимает вид, Ом/км:

$$X_\Pi = 314 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi} 10^3 \ln \frac{2D}{d} = 0,1256 \ln \frac{2D}{d}. \quad (16)$$

Из этого уравнения видно, что внешнее индуктивное сопротивление зависит от расстояния между проводами  $D$  и их диаметра  $d$ . Однако поскольку  $d$  изменяется в незначительных пределах, влияние его также незначительно и, следовательно,  $X_{\Pi}$  зависит в основном от  $D$  (с увеличением расстояния растет сопротивление). Поэтому *нулевые защитные проводники необходимо прокладывать по возможности совместно или в непосредственной близости от фазных проводников.*

При малых значениях  $D$ , соизмеримых с диаметром проводов  $d$ , сопротивление  $X_{\Pi}$  незначительно (не более 0,1 Ом/км) и им можно пренебречь. В практических расчетах обычно принимают  $X_{\Pi} = 0,6$  Ом/км, что соответствует расстоянию между проводами 0,7 – 1,0 м.

Обычно источник питания и линия электропередачи заданы. Тогда необходимо выбрать соответствующий автоматический выключатель, используя приведенные выше рекомендации, и провести расчет на срабатывание выключателя. Если в результате расчета условие (12) выполняется, то расчет окончен. Если условие (12) не выполняется, то необходимо увеличить сечение проводников и в первую очередь нулевого защитного проводника и повторить расчет.

## **Расчет заземления нейтрали и повторного заземлений**

Проектный расчет заземления нейтрали источника питания и повторного заземления выполняются аналогично расчету защитного заземления электроустановок. При этом сопротивление заземляющего устройства, к которому подсоединяются нейтрали источников питания (трансформаторов), не должны превышать значений, указанных в табл. 10. Эти сопротивления должны быть обеспечены с учетом использования естественных заземлителей и заземлителей повторных заземлений нулевого проводника воздушной линии напряжением до 1000 В при числе отходящих линий не менее двух. При этом следует устраивать искусственные заземлители, сопротивление которых также приведено в табл. 10.

Таблица 10.

**Сопrotивление заземления нейтрали источника  
питания и повторных заземлений нулевого проводника**

Напряже ние сети В	Сопrotивление заземления нейтрали трансформатора, Ом		Сопrotивление повторного заземления нулевого провода Ом	
	Эквивалентное (с учетом есте- ственных зазе- млителеев и по- вторных зазем- лений)	В том числе тольк искусственных заземлителеев	Эквивалентн ое сопrotивлени е всех повторных заземлителеев	В том числе сопrotивлени каждого заземлителеев
660/380	2	15	5	15
380/220	4	30	10	30
220/127	8	60	20	60

**Пример расчета зануления на отключающую  
способность**

Для производственного помещения, в котором установлен металлообрабатывающий станок, а также стенд для снятия характеристик обработки детали и контроля ее параметров используется электрическая сеть напряжением 380/220 В. Линия выполнена из медных проводников сечением 25 мм<sup>2</sup> (диаметр 5,64 мм) и питается от трансформатора мощностью 400 кВ·А, напряжение первичной обмотки трансформатора 10 кВ, а схема соединения обмоток “звезда - звезда” (Y/Y<sub>н</sub>).

Нулевой защитный проводник выполнен в виде стальной защитной полосы сечением 50х4 мм и проложен

в 40 см от фазных проводников. Проверить, обеспечивается ли отключающая способность зануления в сети, показанной на рис.4, относительно электродвигателя 1 металлообрабатывающего станка и станда 2. Двигатель защищен предохранителями с плавкими вставками ( $I_{ном}=50$  А), а стенд имеет автоматический выключатель с  $I_{ном}=50$  А с электромагнитным расцепителем.

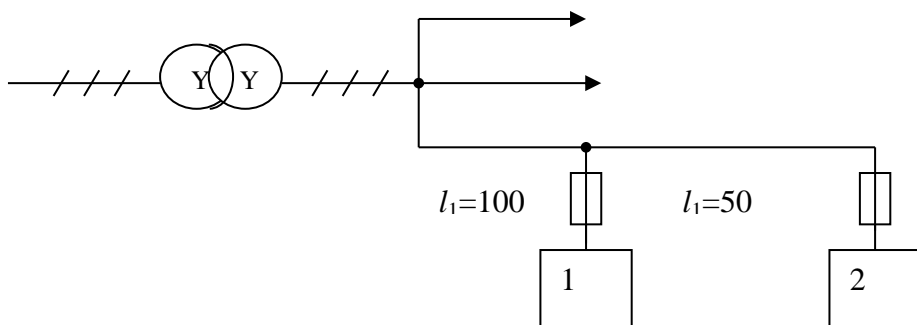


Рис. 4.4. Электрическая сеть с электродвигателем и стандом

**Решение.** По табл. 8 находим сопротивление обмоток трансформатора  $Z_T = 0,195$  Ом. По формуле (14) рассчитываем сопротивление проводников петли “фаза - нуль” на участке  $l_1 = 100$  м

$$R_{\Phi} = p \cdot \frac{l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 100}{25} = 0,072 \text{ Ом} .$$

Для фазных проводников из меди принимаем  $X_{\phi} = 0$ . Так как для плавких вставок  $K=3$ , то ожидаемый ток короткого замыкания в нулевом защитном проводнике

$$I_k = 3 \cdot 50 = 150 \text{ А}, \quad (17)$$

а плотность тока

$$i_H = \frac{I_k}{S} = \frac{150}{50 \cdot 4} = 0,75 \text{ А/мм}^2.$$

Из табл. 4.9 находим для нулевого защитного проводника  $R_1=2,04 \text{ Ом/км}$ ,  $X_1=1,22 \text{ Ом/км}$ . Тогда для участка  $l_1$  имеем соответственно

$$R_{\text{нз}}=2,04 \cdot 0,1=0,204 \text{ Ом}; X_{\text{нз}}=1,22 \cdot 0,1=0,122 \text{ Ом}.$$

Внешнее индуктивное сопротивление проводников рассчитываем по формуле (4.16) с учетом, что  $l_1=0,1 \text{ км}$

$$X_{\Pi} = 0,1256 \cdot 0,1 \ln \left( \frac{2 \cdot 0,4}{0,00564} \right) = 0,062 \text{ Ом}.$$

Модуль полного сопротивления петли “фаза - нуль” будет

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(0,072 + 0,204)^2 + (0,122 + 0,062)^2} = 0,331 \text{ Ом}.$$

Тогда расчетное значение тока  $I_k$

$$I_K = \frac{220}{\frac{0,195}{3} + 0,331} = 555,6 \text{ А.} \quad (18)$$

Сравнивая значения  $I_K$ , полученные из выражений (17) и (18), делаем вывод, что условие (4.14) выполняется и отключение электродвигателя станка при нарушении изоляции фазных проводников обеспечивается.

Для станда проводим аналогичные расчеты при условии  $l_2=150$  м, а для выбранного выключателя выбираем  $K=1,4$ . Ожидаемый ток короткого замыкания  $I_K=1,4 \cdot 50=70$  А, а  $i_n=0,35$  А/мм<sup>2</sup>. Принимая  $i_n=0,5$  А/мм<sup>2</sup>, по табл. 3 находим  $R_1=2,28$  Ом/км,  $X_1=1,37$  Ом/км. Тогда  $R_{нз}=2,28 \times 0,15=0,342$  Ом,  $X_{нз}=1,37 \cdot 0,15=0,206$  Ом. Для петли “фаза - нуль” значение  $X_n$  вычисляем по формуле (16)  $X_n=0,106$  Ом, а  $Z_n=0,518$  Ом. Окончательно находим

$$I_K = \frac{220}{0,195/3 + 0,518} = 373,4 \text{ А.}$$

Рассчитанное значение больше величины  $K \cdot I_{ном}=70$  А. Следовательно, условие отключения станка в аварийной ситуации также выполняется.

### **Задачи для самостоятельного решения**

Задание 1. С металлического шара радиусом  $r = 0,5$  м, Погруженного в землю на глубину  $t_1 = 3$  м, стекает ток



$I_3 = 80$  А, который подается к шару по изолированному проводу.

Требуется определить потенциал  $\varphi_D$  на поверхности земли в точке  $D$  на расстоянии  $x = 3$  м от вертикали, проходящей через центр шара, и потенциал заземлителя (шара)  $\varphi_3$ . Удельное сопротивление земли  $\rho = 90$  Ом·м.

Задание 2. Два одинаковых стержневых заземлителя (электрода) круглого сечения забиты в землю вертикально на всю их длину. Расстояние между их центрами  $\underline{S} = 5$  м. Электроды соединены между собой проводником, с каждого из них в землю стекает ток  $I_3 = 5$  А.

Длины электродов  $l = 5$  м; диаметры  $d = 0,05$  м, земля однородная, ее удельное сопротивление  $\rho = 100$  Ом·м; длина шага человека  $a = 0,8$  м.

Требуется определить потенциалы электродов, их сопротивления стеканию тока, а также максимальные значения напряжений прикосновения и шага для человека, находящегося между электродами на прямой, соединяющей их центры.

Вычисление произвести, полагая, что сопротивление стеканию тока с ног человека и сопротивление его обуви равны нулю; в итоге изобразить

схему размещения электродов, потенциальные кривые и буквенные обозначения величин.

Задание 3. В трехфазной сети с изолированной нейтралью прошел обрыв фазы 1 в непосредственной близости от питающего трансформатора. В это же время возникло короткое замыкание фазы 3 на заземленный корпус электродвигателя, которого касался человек.

Напряжение сети  $U = 380$  В; сопротивление заземления корпуса потребителя электроэнергии  $r_3 = 52$  Ом; сопротивление изоляции фаз сети относительно земли  $r_1 = 512$  Ом,  $r_2 = 490$  Ом; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом; удельное сопротивление земли  $\rho = 120$  Ом·м; расстояние от человека до заземлителя  $L \geq 20$  м.

Сопротивление обуви пострадавшего принять равным нулю. Определить значение тока  $I_h$ , проходящего через тело человека.

Задание 4. На воздушной трехфазной линии электропередачи (ВЛ) с заземленной нейтралью произошел обрыв провода, который упал на металлический полушар, лежащий на земле.

Человек, стоявший на земле и прикасавшийся в это время к заземленному корпусу потребителя электроэнергии, был смертельно поражен током.

Измерениями установлено, что ток стекающий с оборванного провода в землю через полушар,  $I_3 = 63$  А. радиусы полушаров  $r_1 = r_2 = 0,5$  м; расстояния от центров полушаров до точки, где стоял пострадавший,  $L_1 = 2$  м,  $L_2 = 1$  м; удельное сопротивление земли  $\rho = 200$  Ом·м; сопротивление тела человека  $R_h = 1000$  Ом.

Требуется вычислить напряжение прикосновения, под которым оказался пострадавший, с учетом сопротивления растекания тока в землю с ног человека (сопротивления основания).

Предмет, которого касался оборвавшийся провод, следует уподобить полушару радиусом  $r_1$ , лежащему на земле, а заземлитель нейтрали сети принять также в виде полушара радиусом  $r_2$ .

Задание 5. В четырехпроводной осветительной сети 380/220 В небольшой протяженности, отключенной от источника питания для измерения сопротивления ее изоляции, был смертельно поражен током монтер, стоящий на резиновом изолирующем ковре и коснувшийся одной рукой токоведущей части, находящейся под напряжением, а другой – отключенного участка нулевого рабочего провода.

Потребители этой сети – только лампы

накаливания. Все они были отключены (вывинчены из патронов) за исключением трех ламп, каждая мощностью  $P_{\text{л}} = 60 \text{ Вт}$ .

При расследовании обстоятельств несчастного случая было установлено: изолирующий резиновый ковер, на котором стоял пораженный монтер, исправен; сопротивления относительно земли изоляции проводов отключенного участка сети составили каждого фазного провода  $r_1 = r_2 = r_3 = r = 4520 \text{ Ом}$  и нулевого рабочего провода  $r_{\text{н}} = 3110 \text{ Ом}$ ; сопротивление заземления нейтрали трансформатора  $r_0 = 4 \text{ Ом}$ ; емкости проводов относительно земли незначительны вследствие небольшой длины проводов, поэтому ими можно пренебречь.

Требуется определить значение тока  $I_h$ , мА, поразившего человека; оценить опасность смертельного поражения человека током (по значению тока) в случае, если бы в сети были отключены все лампы, как того требуют правила.

Сопротивление тела человека принять равным  $1000 \text{ Ом}$ ; пренебречь емкостями проводов относительно земли.

Задание 6. В цеховой электросети напряжением  $380/220\text{В}$  с глухозаземленной нейтралью (сопротивление заземления нейтрали  $r_0 = 4 \text{ Ом}$ , сопротивление

повторного заземления нулевого провода  $r_n = 11 \text{ Ом}$ ) произошел обрыв нулевого защитного провода, что не повлияло на работу оборудования.

Через некоторое время возникло замыкание одной из фаз на корпус электродвигателя за местом обрыва нулевого провода.

Определите опасность поражения электрическим током по напряжению прикосновения к зануленному оборудованию в аварийный период в сети с наличием повторного заземления нулевого провода (а) и без повторного заземления нулевого провода (б).

### **ТЕМА 3 ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

#### **Задание 1**

В производственном помещении располагается технологическое оборудование, в котором используется взрывоопасное вещество. Технологический процесс - установка затаривания мешков мукой

Определить класс и размер взрывоопасной зоны внутри и вне помещения.

Исходные данные:

1. Технологическое оборудование располагается в точках №6,8,10,14;

2. используемое в технологическом процессе вещество: мучная пыль.

. максимальный объём взрывоопасной смеси:  
120 м.куб.

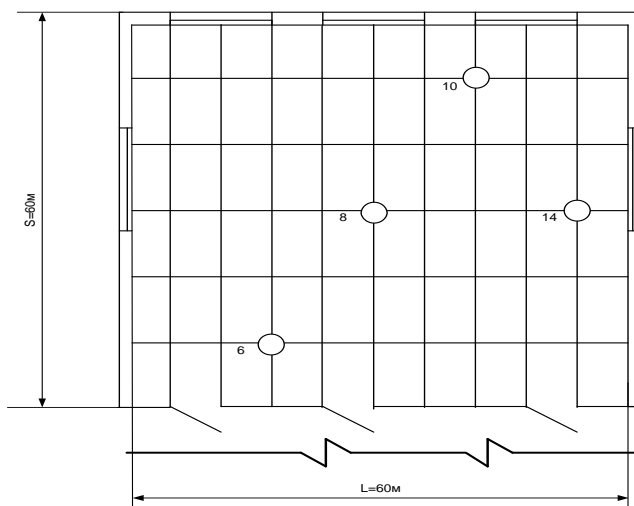
. внутренние габариты помещения:

длина  $L=60$  м.;

высота  $h=4$  м.;

ширина  $S=60$ м..

5. объём размещённого оборудования  
 $V_{\text{обор.}}=2400$  м.куб.



Решение

1.1 Определение класса взрывоопасной зоны

Основное вещество, используемое в технологическом процессе - мучная пыль.

Согласно таб.7.3.4 ПУЭ мучная пыль - взрывоопасное вещество.

Т.к. технологический процесс затаривания мешков мукой происходит открыто, то образование взрывоопасных концентраций возможно при нормальных условиях. Исходя из этого делаем вывод, что в помещении образовывается взрывоопасная зона класса В-II (п. 7.3.45 ПУЭ).

## 1.2 Расчёт размера взрывоопасной зоны.

Для определения взрывоопасной зоны:

а) находим объём помещения:

$$V_{\text{пом}} = S \cdot L \cdot h = 60 \cdot 60 \cdot 4 = 14400 \text{ м}^3$$

где  $V_{\text{пом}}$  - объём помещения,  $\text{м}^3$ ;

$S$  - ширина помещения, м;

$L$  - длина помещения, м;

$h$  - высота помещения, м.

б) находим свободный объём помещения:

$$V_{\text{пом.св.}} = V_{\text{пом}} - V_{\text{обор}} = 14400 - 2400 = 12000 \text{ м}^3$$

где  $V_{\text{пом.св.}}$  - свободный объём помещения, м.куб.;

$V_{\text{обор}}$  - объём размещённого оборудования;

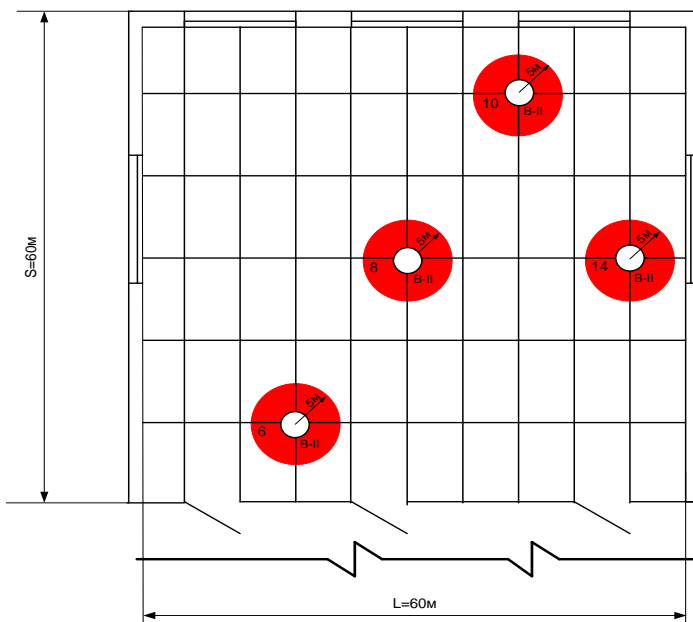
в) находим отношение объёма ВЗОС к свободному объёму помещения:

$$K = \left( \frac{V_{ВЗОС}}{V_{ПОМ.св}} \right) \cdot 100\% = \frac{120}{12000} \cdot 100\% = 1\%$$

где К - отношение свободного объёма помещения к объёму ВЗОС, %

Вывод: объём взрывоопасной смеси менее 5 % свободного объёма помещения, значит, взрывоопасная зона класса В-П занимает пространство в пределах 5 метров по горизонтали и вертикали от технологического аппарата, из которого возможно выделение пыли. Помещение за пределами ВЗОС следует считать не взрывоопасным





(п.7.3.39 ПУЭ).

Схема размещения взрывоопасных зон

Задание 2

Укажите причины возникновения короткого замыкания, перегрузки и других пожароопасных явлений в осветительной аппаратуре

Пожарная безопасность светильника означает практическую невозможность загорания, как самого прибора, так и окружающей среды. Поэтому при конструировании осветительных приборов с лампами накаливания необходимо выбирать комплектующие

изделия и материалы с температурными параметрами, соответствующими температурному режиму работы. Основным показателем пожарной безопасности является соответствие температур конструктивных элементов светильника допустимым значениям, как в рабочем, так и в аварийном режиме работы. Теоретически рассчитать температуру нагрева различных элементов светильника достаточно трудно из-за сложности математического аппарата и большого количества экспериментальных величин. Поэтому на практике чаще используют экспериментальные исследования температурных характеристик, сравнивая их с предельно допустимыми. Последние, как правило, выпускаются в виде различной нормативно-технической документации НТД (ОСТы, ГОСТы, нормативы, справочники и т.д.).

Поскольку большая часть энергии переходит в тепловую, то становится очевидным возможный нагрев ламп и арматуры до высоких температур. Так, температура на колбах ламп накаливания в зависимости от их мощности может достигать  $160^{\circ}\text{C}$ , а при загрязнении более  $300^{\circ}\text{C}$ .

Пожарная опасность светильников с лампами накаливания обусловлена:

☐ уменьшением воздушного промежутка между колбой лампы и стеклянным колпаком светильника при замене лампы на большую мощность;

☐ разрыв колб ламп;

☐ выпадение колб ламп или раскаленных спиралей;

☐ ослабление контактов подключения проводов (искрение, зажигание пластмассы);

☐ короткие замыкания в местах ввода.

Пожарная опасность светильников с люминесцентными лампами обусловлена:

☐ температура дросселя может достигать 120 °С, и имеющийся материал рассеивателя может воспламениться от этих температур;

☐ при неисправностях может сильно увеличиться ток дросселя, что приведет к расплавлению и воспламенению мастик или наполнителей, используемых для заливки дросселей;

☐ при стартерной схеме зажигания определенную опасность представляют стартеры (внутри которых находится бумажный конденсатор и картонные прокладки);

□ температура на поверхности трубок люминисцентных ламп вблизи от электродов достигает 7-80 °С;

□ особую опасность представляют рассеиватели, из горючих материалов. Наличие таких рассеивателей в случае возникновения пожара усиливает скорость его развития и затрудняет условия тушения.

Пожарная опасность светильников с лампами ДРЛ обусловлена тем, что температура на поверхности колб ламп достигает 300-400 С, а наличие пускорегулирующего аппарата приводит практически к тем же пожароопасным явлениям которые имеют место при эксплуатации люминесцентных светильников.

### Задание 3

Привести схему распределения электроэнергии напряжением до 1 кВ механического цеха.

Описать функциональное назначение используемых в приведённой схеме распределительных устройств.

1. Распределительное устройство вторичного напряжения. Служит для распределения и передачи электроэнергии.

2. Электроприёмник с двигателем.

. Силовой пункт. Предназначен для передачи и распределения электроэнергии между силовыми потребителями (электродвигателями, генераторами, трансформаторами, станками и т.д.), защиты сети от ненормальных режимов работы.

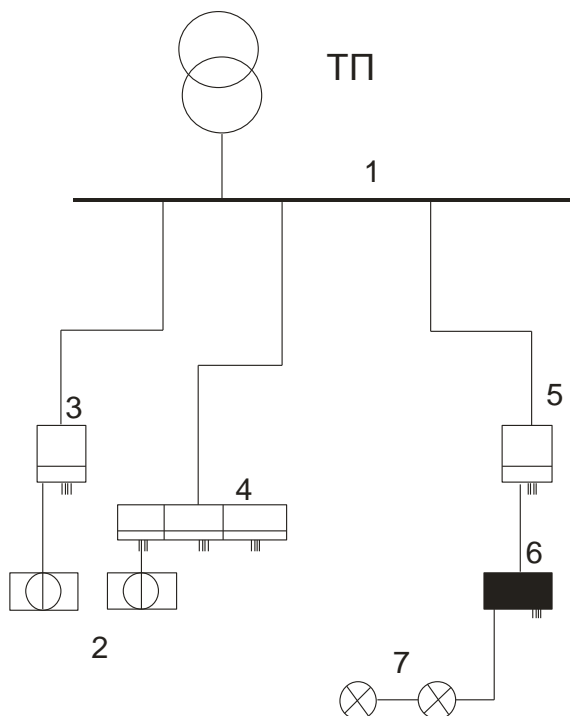


Рис.1 Схема распределения электроэнергии внутри цеха

. Щит управления. ЩУ предназначены, главным образом, для дистанционного и автоматического

управления электроприводами. В тоже время щиты управления осуществляют распределение электроэнергии.

. Магистральный осветительный щиток. Осуществляет распределение электроэнергии между групповыми осветительными щитками. Оборудуются аппаратами защиты для защиты сети от ненормальных режимов работы.

. групповой осветительный щиток . Предназначен для распределения и передачи электроэнергии в осветительную (не силовую) сеть. Оборудуется аппаратами защиты для защиты сети от ненормальных режимов работы.

. электроосветительные приборы. предназначены для освещения мест работы .

#### Задание 4

В неразветвлённой цепи переменного тока:

$R_1=50\text{Ом}$ ;  $R_2=11\text{Ом}$   $L=630\text{ мГн}$ ;  $C=500\text{мкФ}$ ;  $Q_L=35\text{вар}$ .

Определить следующие параметры электрической цепи однофазного переменного тока:  $I, U, Z, S, P, Q, \cos \varphi$ . Построить в масштабе векторную диаграмму и определить характер цепи

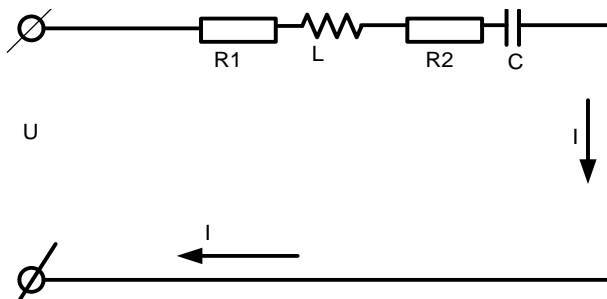


Схема электрической цепи

Решение

1. Находим полные сопротивления ветвей:

$$Z = \sqrt{(r^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{((R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{((50 + 11)^2 + (197.82 - 6.37)^2}$$

где:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 6.37 \text{ Ом}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 630 \cdot 10^{-3} = 197.82 \text{ Ом}$$

Так как  $X_L > X_C$ , следовательно характер цепи активно - индуктивный.

2. Находим коэффициенты мощности цепи:

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{61}{200.93} = 0.3035$$

$$\sin \varphi = \frac{(X_L - X_C)}{Z} = \frac{(197.82 - 6.37)}{200.93} = 0.9528$$

Находим величину угла сдвига фаз между напряжением и током:

$$\varphi = \arccos 0.3035 = 72.3298^\circ$$

Зная, что  $Q_L = 35$ вар, определим ток  $I$  по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{Q_L}{X_L}} = \sqrt{\frac{35}{197.82}} = 0.421 A$$

Определяем напряжение в сети по формуле:

$$U = I \cdot Z = 0.421 \cdot 200.93 = 84.592 B$$

.Определяем мощность цепи:

полная мощность

$$S = U \cdot I = 84.592 \cdot 0.421 = 35.613 BA$$

реактивная мощность:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 84.592 \cdot 0.421 \cdot (0.9528) = 33.932 \text{вар}$$

активная мощность

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 84.592 \cdot 0.421 \cdot (0.3035) = 10.809 Bm$$

3. Построение векторной диаграммы:

выписываем значения токов и напряжений на сопротивлениях цепи:

а) в неразветвлённой части цепи ток одинаков для любого участка цепи:

$$I = 0.421 A;$$

Напряжение на активном сопротивлении:



$$U_A = I \cdot R = 0.421 \cdot 61 = 25.681B ,$$

напряжение на индуктивном сопротивлении:

$$U_L = I \cdot X_L = 0.421 \cdot 197.82 = 83.282B ,$$

напряжение на ёмкости:

$$U_C = I \cdot X_C = 0.421 \cdot 6.37 = 2.682B ,$$

принимаем масштаб:

по напряжению  $M_U = 5.364 \text{ В/см}$ ;

по току  $M_i = 0.0842 \text{ А/см}$ .

определяем длины векторов:

$$l_i = \frac{I}{M_i} = \frac{0.421}{0.0842} = 5 \text{ см}$$

длина векторов токов:

$$l_{Ua} = \frac{U_a}{M_U} = \frac{25.681}{5.364} = 4.788 \text{ см} ;$$

$$l_{UL} = \frac{U_L}{M_U} = \frac{83.282}{5.364} = 15.526 \text{ см} ;$$

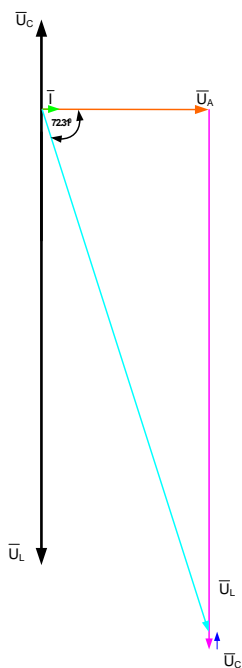
$$l_{UC} = \frac{U_C}{M_U} = \frac{2.682}{5.364} = 0.5 \text{ см} ;$$

в) выполняем построение диаграммы в следующей последовательности:

1. произвольно на плоскости в масштабе откладываем вектор напряжения  $\vec{I}$ , т.к. ток одинаков на всём участке цепи.

2. строим вектора токов  $U_a, U_L, U_C$ .

. геометрическим сложением векторов получим вектор общего напряжения. Т.к. вектор общего тока опережает напряжение  $U$ , то характер цепи будет активно-индуктивный и угол  $\varphi$  - положительный.



Построение векторной

диаграммы

Задание 6

Выбрать тип аппарата защиты и его параметры для защиты сети 380/220 В трёхфазных электродвигателей по условиям обеспечения пожарной безопасности. Определить необходимое сечение жил питающих проводников.

Выбрать тип теплового магнитного пускателя. Подобрать  $I_0$  теплового реле и определить необходимое число делений шкалы, на которое необходимо установить поводок регулятора реле.

Напряжение сети: 380/220В. Двигатель: номинальная мощность  $P_n=17\text{кВт}$ ;

$\cos\varphi=0.86$ ; КПД  $\eta=0.89$ ; коэффициент пуска  $K_n=7$

Электропроводка: кабель ПВ, способ прокладки - в трубах

Класс взрывоопасной зоны: В-Ia

Решение

6.1. Рассчитываем номинальный ток электродвигателя

$$I_H = \frac{P_P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{17 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.86 \cdot 0.89}$$

где  $P_P$  - рабочая мощность электродвигателя, кВт;

$P_H$  - номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$U_{\text{Л}}$  - линейное напряжение сети, В;

$\cos \varphi$  - коэффициент мощности двигателя;

$\eta$  - КПД двигателя.

2. Определяем необходимое сечение жил кабеля в соответствии с условием  $I_{\text{доп}} \leq 1.25 I_{\text{НОМ}}$ , (двигатель с короткозамкнутым ротором и расположен во взрывоопасной зоне В-Iа (7.3.97ПУЭ)). По таб. 1.3.4 ПУЭ выбираем  $S=8\text{мм}^2$ , при котором

$$I_{\text{доп}} = 43\text{А} > 1.25 \cdot 33.745 = 42.182\text{А}$$

6.3 Выбираем тепловое реле в соответствии с условием  $I_{\text{Н.Р.}} \geq I_{\text{НОМ}}$  По прилож.2 таб.2.6 этому условию удовлетворяет реле ТРН-40 с номинальным током  $I_{\text{Н.Р.}}=40\text{А} \geq I_{\text{Н}}=33.745\text{А}$ . По условию  $I_0 \leq I_{\text{Н}}$ , выбираем нагревательный элемент реле. Этому условию удовлетворяет нагревательный элемент с током нулевой уставки  $I_0 = 32\text{А}$  (см. прилож.2, таб.2.6).

Для выполнения условия  $I_{\text{уст}}=I_{\text{Н}}$  тепловое реле необходимо отрегулировать. Рассчитываем количество делений, на которое необходимо повернуть поводок регулятора реле. Для реле, у которого  $I_0=32\text{А}$

$$N = N_1 + N_2 = \frac{(I_0 - I_{\text{Н}})}{c \cdot I_0} + \frac{(t_{\text{ОКР}} - 30)}{10} = \frac{(32 - 33.745)}{0.055 \cdot 32} + \frac{(25 - 30)}{10} = -0.99 - 0.5$$

6.4.Выбираем предохранитель ПР-2. В соответствии с условием  $I_{H.A.} \geq I_{НОМ}$  , По табл.2.5, прилож. 2 принимаем  $I_{НОМ. ПР.}=60A \square 33.745A$

.5. Выбираем плавкую вставку в соответствии с условием  $I_{H.ВСТ.} \geq I_{НОМ}$  . По таб. 2.5 , прилож. 2 принимаем  $I_{H.ВСТ.}=35A$

.6 Проверяем выбранную плавкую вставку на устойчивость работы при пуске двигателя (на отсутствие ложных отключений) по условию,

$$I_{H.ВСТ.} \geq \frac{I_{ПУСК}}{\alpha}$$

где  $\square=3$  в соответствии с табл. 4.3(8).

$I_{ПУСК}$  - пусковой ток двигателя, который равен

$$I_{ПУСК} = K_{ПУСК} \cdot I_H = 7 \cdot 33.745 = 236.215A$$

Проверяем:

$$35 < \frac{236.215}{3} = 78.74A$$

Вывод: Выбранная плавкая вставка и предохранитель условию не удовлетворяет.

Корректируем выбор плавкой вставки и предохранителя:

выбираем  $I_{H.ПР.}=100A$ ,  $I_{H.ВСТ.}=80 A$  (см. таб. 2.5 прилож. 2). Очевидно, что  $80A < 78.74A$ , т.е. при пусках ложных отключений не будет.

Ответ:  $S_{ПВ}=8mm^2$ ,

ПР-2 ( $I_{H.ВСТ.}=80A$ ,  $I_{H.ПР.}=100A$ )

ТРН-40 ( $I_0=32A$ ,  $N=-1$  деление)

### Задание 5

В четырехпроводную трёхфазную цепь с линейным напряжением 220В включены три однофазных приёмника и один симметричный трёхфазный приёмник номинальные параметры, которых:

Однофазные приёмники с  $U_{НОМ}=220V$ :

1.  $P_{НОМ}=14кВт$ ,  $\cos\varphi=1$
2.  $Q_{НОМ}=14квар$ ,  $\cos\varphi=0$ , характер ёмкостной
3.  $P_{НОМ}=10кВт$ ,  $Q_{НОМ}=10квар$ , характер ёмкостной

Трёхфазный симметричный потребитель с  $U_{НОМ}=127V$ :

.  $P_{НОМ}=16кВт$ ,  $Q_{НОМ}=12квар$ , характер индуктивный

Начертить схему включения указанных приёмников в трёхфазную сеть. Построить совмещённую топографическую векторную диаграмму напряжений и

токов. Графически определить ток в линейных проводах трёхфазной системы.

Решение

Сопротивления элементов схемы замещения приёмников рассчитываем, используя их номинальные данные.

Таким образом, для однофазных приёмников:

№1

Т.к.  $P_{НОМ}=14\text{кВт}$ ,  $\cos\varphi=1$

$$\sin\varphi = 0$$

$$Z_{\text{вс}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos\varphi = \frac{220^2}{14000} \cdot 1 = 3.457\text{Ом}$$

$$R_{\text{вс}} = Z_{\text{вс}} \cdot \cos\varphi = 3.457 \cdot 1 = 3.457\text{Ом}$$

$$X_{\text{вс}} = Z_{\text{вс}} \cdot \sin\varphi = 3.457 \cdot 0 = 0$$

$\varphi=0^\circ$ , род нагрузки активный

№2

Т.к.  $Q_{НОМ}=14\text{квар}$ ,  $\cos\varphi=0$ ,

$$\sin\varphi = 1$$

$$Z_{\text{св}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\text{НОМ}}} \cdot \sin\varphi = \frac{220^2}{14000} \cdot 1 = 3.457\text{Ом}$$

$$R_{\text{св}} = Z_{\text{св}} \cdot \cos\varphi = 3.457 \cdot 0 = 0$$

$$X_{\text{св}} = Z_{\text{св}} \cdot \sin\varphi = 3.457 \cdot 1 = 3.457\text{Ом}$$

$\varphi = -90^\circ$  т.к. род нагрузки ёмкостной

№3

Т.к.  $P_{НОМ} = 16 \text{ кВт}$ ,  $Q_{НОМ} = 12 \text{ квар}$

$$\sin \varphi = \frac{Q_{НОМ}}{\sqrt{Q_{НОМ}^2 + P_{НОМ}^2}} = \frac{10}{\sqrt{10^2 + 10^2}} = 0.7071$$

$$\cos \varphi = 0.7071$$

$$Z_{a\phi} = \frac{U_{НОМ}^2}{P_{НОМ}} \cdot \cos \varphi = \frac{220^2}{10000} \cdot 0.7071 = 3.422 \text{ Ом}$$

$$R_{a\phi} = Z_{a\phi} \cdot \cos \varphi = 3.422 \cdot 0.7071 = 2.42 \text{ Ом}$$

$$X_{a\phi} = Z_{a\phi} \cdot \sin \varphi = 3.422 \cdot 0.7071 = 2.42 \text{ Ом}$$

$\varphi = -45^\circ$ , т.к. род нагрузки ёмкостной

Сопротивление симметричного трёхфазного приёмника:

№4

Т.к.  $P_{НОМ} = 16 \text{ кВт}$ ,  $Q_{НОМ} = 12 \text{ квар}$

$$\sin \varphi = \frac{Q_{НОМ}}{\sqrt{Q_{НОМ}^2 + P_{НОМ}^2}} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 16^2}} = 0.6$$

$$\cos \varphi = 0.8$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = \frac{U_{НОМ}^2}{Q_{НОМ}} \cdot \sin \varphi = \frac{127^2}{12000} \cdot 0.6 = 0.806 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = Z_1 \cdot \cos \varphi = 0.806 \cdot 0.8 = 0.6448 \text{ Ом}$$

$$X_1 = X_2 = X_3 = Z_1 \cdot \sin \varphi = 0.806 \cdot 0.6 = 0.4836 \text{ Ом}$$



$\varphi = 36.87^\circ$ , т.к. род нагрузки индуктивный

Схема включения приёмников определяется в зависимости от их номинального напряжения  $U_{НОМ}$  и линейного напряжения трёхфазной цепи  $U_{Л}$ . Если  $U_{НОМ} = U_{Л}$ , то используется соединение треугольником.

Если же  $U_{НОМ} = U_{\phi} = \frac{U_{Л}}{\sqrt{3}}$ , то звездой.

Т.о., однофазные приёмники с  $U_{НОМ} = 220В$  необходимо подключить к трёхфазной сети с  $U_{ЛИН} = 220В$  треугольником. Трёхфазный приёмник с  $U_{НОМ} = U_{\phi} = 127В$  следует подключить звездой.

Схема включения приёмников к трёхфазной сети приведена на рис.1.

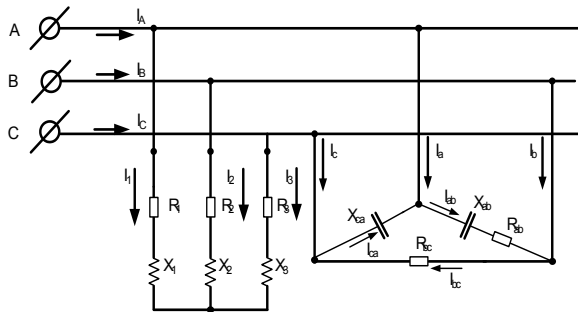


рис.1 Схема включения приёмников к трёхфазной сети

Определяем фазные и линейные токи однофазных приёмников. Фазные токи однофазных приёмников:

$$I_{bc} = \frac{U_{\phi}}{Z_{bc}} = \frac{220}{3.457} = 63.639 \text{ A} \quad (\text{ток } I_{bc} \text{ совпадает по}$$

фазе с напряжением  $U_{bc}$  по фазе)

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220}{3.457} = 63.639 \text{ A} \quad (\text{ток } I_{ca} \text{ опережает}$$

напряжение  $U_{ca}$  по фазе на угол  $90^0$ )

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220}{3.422} = 64.29 \text{ A} \quad (\text{ток } I_{ab} \text{ опережает}$$

напряжение  $U_{ab}$  по фазе на угол  $45^0$ )

Определяем фазные и линейные токи трёхфазного приёмника:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{127}{0.806} = 157.568 \text{ A}$$

Линейные токи несимметричных однофазных приёмников определяем графически при построении векторной диаграммы:

$$I_{ca} = 63.639 \text{ A}, I_{ab} = 64.29 \text{ A}, I_{bc} = 63.639 \text{ A}$$

Принимаем масштаб:

по току  $M_I = 12.729 \text{ A/cm}$

по напряжению  $M_U = 25.4 \text{ V/cm}$

$$l_A = l_B = l_C = \frac{U_\phi}{M_U} = \frac{127}{25.4} = 5 \text{ см}$$

$$l_{ia} = \frac{I_{ca}}{M_i} = \frac{63.639}{12.729} = 5 \text{ см} \quad (\text{ток } I_{ca} \text{ опережает}$$

напряжение  $U_{ca}$  по фазе на угол  $90^0$ );

$$l_{ia6} = \frac{I_{a6}}{M_i} = \frac{64.29}{12.729} = 5.05 \text{ см} \quad (\text{ток } I_{ab} \text{ опережает}$$

напряжение  $U_{ab}$  по фазе на угол  $45^0$ );

$$l_{ic} = \frac{I_{6c}}{M_i} = \frac{63.639}{12.729} = 5 \text{ см} \quad (\text{ток } I_{bc} \text{ совпадает по фазе с}$$

напряжением  $U_{bc}$  по фазе).

$$I_a = M_i \cdot l_{ia} = 12.729 \cdot 9.917 = 126.233 A,$$

$$I_6 = M_i \cdot l_{ia6} = 12.729 \cdot 9.947 = 126.615 A,$$

$$I_c = M_i \cdot l_{ic} = 12.729 \cdot 2.591 = 32.981 A.$$

Полагая, что точка О на диаграмме соответствует точке цепи потенциал, которой равен нулю. Откладываем от неё в масштабе вектора фазных напряжений  $U_A, U_B, U_C$ , сдвинутых друг относительно друга на угол  $120^0$ . Получим точки а, b, c, соответствующие точкам А, В, С цепи. Разность векторов фазных напряжений представляет собой вектора линейных напряжений соответственно  $U_{ab}, U_{ac}, U_{cb}$ .

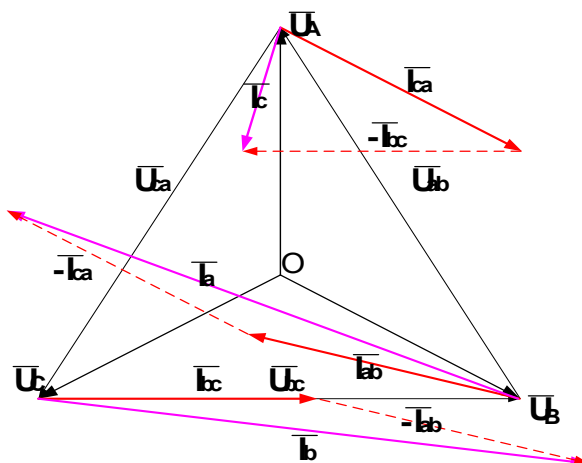
Построение векторов фазных и линейных токов несимметричных трёх однофазных приёмников, соединённых треугольником выполняется в следующей последовательности:

откладываем относительно векторов напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{cb}$  соответственно вектора  $I_{ab}$ ,  $I_{ac}$ ,  $I_{cb}$  несимметричных трёх однофазных приёмников.

Линейные токи определяем разностью векторов фазных токов:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}; I_b = I_{bc} - I_{ab}; I_c = I_{ca} - I_{bc} \text{ (измерив}$$

длину полученных векторов  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  и зная масштаб можно узнать числовое значение линейного тока ).



Построение векторной топографической диаграммы:

для однофазных приёмников  $U_A = U_B = U_C = 220\text{В}$

$$I_{bc} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{bc}} = \frac{220}{3.457} = 63.639\text{А}$$

(ток  $I_{bc}$  совпадает по фазе с напряжением  $U_{bc}$  по фазе)

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220}{3.457} = 63.639\text{А}$$

(ток  $I_{ca}$  опережает напряжение  $U_{ca}$  по фазе на угол  $90^0$ )

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220}{3.422} = 64.29\text{А}$$

(ток  $I_{ab}$  опережает напряжение  $U_{ab}$  по фазе на угол  $45^0$ )

Для трёхфазного приёмника

$$I_{i1} = I_{i2} = I_{i3} = \frac{127}{0.806} = 157.568\text{А}$$

, т.к. род нагрузки индуктивный, то ток отстает по фазе на напряжение на угол  $36.87^0$

Принимаем масштаб:

по току  $M_i = 12.729\text{ А/см}$

по напряжению  $M_u = 25.4\text{ В/см}$

Определяем длину векторов напряжений и токов:

$$l_A = l_B = l_C = \frac{U_{\Phi}}{M_u} = \frac{127}{25.4} = 5\text{см}$$

$$l_{ica} = \frac{I_{ca}}{M_i} = \frac{63.639}{12.729} = 5 \text{ см}$$

$$l_{iaa} = \frac{I_{aa}}{M_i} = \frac{64.29}{12.729} = 5.05 \text{ см}$$

$$l_{iac} = \frac{I_{ac}}{M_i} = \frac{63.639}{12.729} = 5 \text{ см}$$

$$l_{i1} = l_{i2} = l_{i3} = \frac{I}{M_i} = \frac{157.568}{12.729} = 12.379 \text{ см}$$

Полагая, что точка О на диаграмме соответствует точке цепи потенциал, которой равен нулю. Откладываем от неё в масштабе вектора фазных напряжений  $U_A, U_B, U_C$ , сдвинутых друг относительно друга на угол  $120^\circ$ . Получим точки а, b, c, соответствующие точкам А, В, С цепи. Разность векторов фазных напряжений представляет собой вектора линейных напряжений соответственно  $U_{ab}, U_{ac}, U_{cb}$ .

Откладывая от точки О векторы однофазных приёмников  $I_1, I_2, I_3$  в соответствии с их расчётными длинами.

Построение векторов фазных и линейных токов несимметричных трёх однофазных приёмников, соединённых треугольником выполняется в следующей последовательности:

откладываем относительно векторов напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{cb}$  соответственно вектора  $I_{ab}$ ,  $I_{ac}$ ,  $I_{cb}$  несимметричных трёх однофазных приёмников.

Линейные токи определяем разностью векторов фазных токов:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}; I_b = I_{bc} - I_{ab}; I_c = I_{ca} - I_{bc} \text{ (измерив}$$

длину полученных векторов  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  и зная масштаб можно проверить числовое значение линейного тока ).

Определяем токи в линейных проводниках, используя первый закон Кирхгофа.

Для построения вектора тока  $I_A = I_1 + I_a$  с конца вектора  $I_1$  откладываем вектор  $I_a$  и получаем результирующий вектор  $I_A$ . Аналогично строим вектора:

$$I_B = I_2 + I_b$$

$$I_C = I_3 + I_c$$

Определяем длину векторов  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  с помощью линейки:

$$l_{iA}=13.81\text{см } l_{iB}=19.44\text{см } l_{iC}=12.94\text{см}$$

$$I_A = M_i \cdot l_{iA} = 12.729 \cdot 13.81 = 175.79 A$$

$$I_B = M_i \cdot l_{iB} = 12.729 \cdot 19.44 = 247.45 A$$

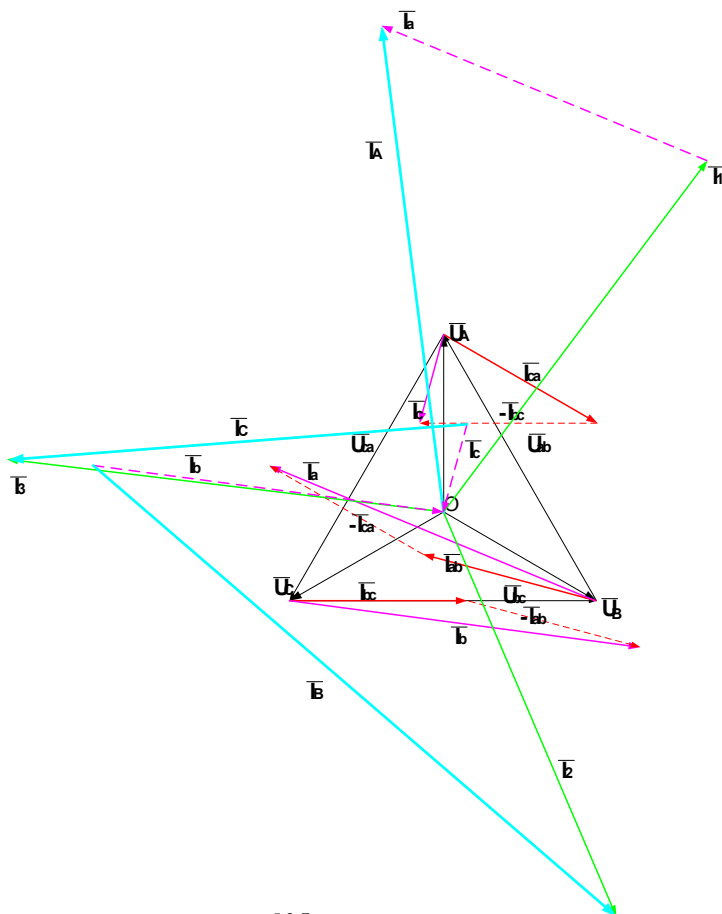
$$I_C = M_i \cdot l_{iC} = 12.729 \cdot 12.94 = 164.71 A$$

Ответ:

$$I_A = 175.79 A$$

$$I_B = 247.45 A$$

$$I_C = 164.71 A$$



Задание 7

В цехе получения казеина (класс зоны В-II)  
установлено следующее электрооборудование:



☐ электропроводка выполнена кабелем АНРГ способ прокладки - на скобах;

☐ электродвигатели серии АТД2 с маркировкой по взрывозащите ВЗТ4-В;

☐ ключи управления типа КУ-96 с маркировкой по взрывозащите МОГ;

☐ магнитные пускатели серии ПМ-722А-1000 с маркировкой по взрывозащите НМА;

☐ светильники типа плафон-В4 с маркировкой по взрывозащите ВЗТ4-В;

☐ выключатели для включения светильников ВКМ-1(2) с маркировкой по взрывозащите IP68.

Необходимо:

1. дать заключение о соответствии требований пожарной безопасности силового и осветительного электрооборудования классу и среде взрывоопасной зоны

2. указать знаки взрывозащиты по ГОСТ, ПИВРЭ, ПИВЭ.

Решение

1. Определяем категорию и группу взрывоопасной смеси казеина с воздухом.

Согласно п. 7.3.63, таб.7.3.4, таб.7.3.2 ПУЭ взрывоопасная смесь казеина относится:

по ГОСТ - ПАТ2;

по ПИВРЭ - 1Т2;

по ПИВЭ - 1Б

2. Обосновываем соответствие  
электрооборудования требованиям пожарной  
безопасности и ПУЭ.

Устанавливаем необходимые уровни (таб.7.3.10 -  
7.3.12 ПУЭ) взрывозащиты электрооборудования и  
составляем требуемую маркировку по взрывозащите:

двигателя - уровень 1; 1ExdIIAT2

светильника - уровень 2; 2ExdIIAT2

для аппаратов управления - уровень 1; 1ExdIIAT2

Переводим маркировку по ПИВРЭ и ПИВЭ  
применяемого силового и осветительного оборудования в  
соответствующую ГОСТ 12.2.020.76\*:

- ☐ двигатель (ВЗТ4-В) - 1ExdIIВТ4
- ☐ светильник (ВЗТ4-В) - 1ExdIIВТ4
- ☐ ключ управления (МОГ) - 1ExeIIСТ4
- ☐ магнитные пускатели (НМА) - 2ExeIIСТ1
- ☐ выключатели (IP68) - IP68

Определяем соответствие  
электрооборудования требованиям пожарной  
безопасности и ПУЭ:

☐ электропроводки выполнены кабелем АНРГ - на скобах, не соответствует способу прокладки 7.3.118 ПУЭ;

☐ электродвигатели серии АТД2 с маркировкой по взрывозащите ВЗТ4-В (1ExdПВТ4) соответствуют п.7.3.63, 7.3.65 и таб.7.3.10 ПУЭ;

☐ магнитные пускатели серии ПМ-722А-1000 с маркировкой по взрывозащите НМА (2ExeПСТ1) не соответствуют таб.7.3.11 ПУЭ и п.7.3.63 ПУЭ по уровню взрывозащиты и температурному классу электрооборудования;

☐ светильники типа плафон-В4 с маркировкой по взрывозащите ВЗТ4-В (1ExdПВТ4) соответствуют п.7.3.76 и таб.7.3.12 ПУЭ;

☐ выключатели для включения светильников ВКМ-1(2) с маркировкой по взрывозащите IP68 не соответствуют уровню взрывозащиты и температурному классу электрооборудования п. таб.7.3.11 и п.7.3.63 ПУЭ;

☐ ключи управления типа КУ-96 с маркировкой по взрывозащите МОГ (1ExeПСТ4) соответствуют п. 7.3.65, таб.7.3.11 и п.7.3.63 ПУЭ.

**Заключение**

Выключатели для управления светильниками расположить за пределами взрывоопасной зоны (п.7.3.71 ПУЭ); установленные магнитные пускатели серии ПМ-722А-1000 с маркировкой по взрывозащите НМА (2ЕхеIICT1) заменить на магнитные пускатели с маркировкой по взрывозащите не ниже 1ЕхdIIАТ2; электропроводку проложить в трубах либо пылеуплотненных каналах (п.7.3.118 ПУЭ).

#### **ТЕМА 4. РАСЧЕТ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 300 МГц...300 ГГц**

Частота электромагнитного поля определяет особенности его воздействия на человека. Это вызывает необходимость нормирования ЭМП и защиты от него в различных диапазонах частот [1...3].

В данном практическом занятии рассмотрены нормирование и защита от ЭМП в следующих диапазонах частот:

№ 9 – 300...3000 МГц (длина волны 1...0,1 м);

№ 10 – 3...30 ГГц (длина волны 10...1 см);

№ 11 – 30...300 ГГц (длина волны 1...0,1 см).

У источников ЭМП различают зоны: ближнюю (зона индукции) и дальнюю (зона излучения).

Ближняя зона реализуется на расстоянии  $r \leq \frac{\lambda}{6}$  [(ЭМП еще не сформировалось), где  $\lambda$  – длина волны]; дальняя зона – на расстоянии  $r > \frac{\lambda}{6}$  (ЭМП сформировалось).

В этом случае обе составляющие ЭМП – электрическая и магнитная – в диапазоне 300 МГц...300 ГГц оцениваются поверхностной плотностью потока энергии (ППЭ) (интенсивностью облучения  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>).

Предельно допустимую плотность потока энергии ЭМП в диапазоне частот 300 МГц...300 ГГц на рабочих местах и в местах возможного нахождения персонала радиотехнических объектов (РТО) устанавливают, исходя из допустимого значения энергетической нагрузки на организм человека и времени его пребывания в зоне облучения. Однако во всех случаях она не должна превышать 10 Вт/м<sup>2</sup> (1000 мкВт/см<sup>2</sup>), а при наличии рентгеновского излучения или высокой температуры воздуха в рабочих помещениях (выше 28 °С) – 1 Вт/м<sup>2</sup> (100 мкВт/см<sup>2</sup>).

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

### 1. Нормирование ЭМП.

Предельно допустимая плотность потока энергии ЭМП от РТО, Вт/м<sup>2</sup> (мкВт/см<sup>2</sup>),

$$ППЭ = W_N/T, \quad (1)$$

где  $W_N$  – нормированное значение допустимой энергетической нагрузки на организм человека, Вт · ч/м<sup>2</sup> (мкВт · ч/см<sup>2</sup>).

Нормированные значения допустимой энергетической нагрузки на организм человека составляют [3]:

2 Вт · ч/м<sup>2</sup> (200 мкВт · ч/см<sup>2</sup>) – для всех случаев облучения, исключая облучение от вращающихся и сканирующих антенн;

20 Вт · ч/м<sup>2</sup> (2000 мкВт · ч/см<sup>2</sup>) – для случаев облучения от вращающихся и сканирующих антенн.

Допустимое время пребывания в зоне облучения 8 ч.

В соответствии с санитарными нормами предельно допустимая плотность потока энергии ЭМП на территории жилой застройки при круглосуточном облучении не должна превышать 5 мкВт/см<sup>2</sup> [3].

При одновременном воздействии ЭМП от  $k$  источников в диапазоне 300 МГц...300 ГГц суммарная плотность потока энергии, Вт/м<sup>2</sup> (мкВт/см<sup>2</sup>),

$$ППЭ_{\Sigma} = ППЭ_1 + ППЭ_2 + \dots + ППЭ_k, \quad (2)$$

где  $ППЭ_1, ППЭ_2, \dots, ППЭ_k$  – плотность потока энергии от первого, второго и  $k$ -го источников ЭМП, Вт/м<sup>2</sup> (мкВт/см<sup>2</sup>).

## 2. Защита от электромагнитных полей.

2.1. Защита от ЭМП на рабочем месте может быть обеспечена защитой временем, защитой расстоянием, экранированием источника излучения, уменьшением мощности излучения, экранированием рабочего места, применением средств индивидуальной защиты (СИЗ).

### 2.2. Защита временем.

Защита временем предусматривает ограничение времени пребывания человека в рабочей зоне (в зоне облучения ЭМП).

При заданной (измеренной на рабочем месте) ППЭ максимальное время пребывания человека на рабочем месте (в зоне облучения), ч,

$$T = W_N / ППЭ_{\Sigma}. \quad (3)$$

### 2.3. Защита расстоянием.

Расстояние от рабочего места до излучающей антенны РТО, м,

$$r = [(P_{\text{ср}}\sigma)/(12,56\text{ППЭ}_{\Sigma})]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $P$  – средняя мощность излучения, Вт;  $\sigma$  – коэффициент усиления антенны.

Средняя мощность излучения

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}}\tau / T_{\text{с}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{имп}}$  – мощность излучения в импульсе, Вт;  $\tau$  – длительность импульса, с;  $T_{\text{с}}$  – период следования импульсов, с.

Основной способ защиты от ЭМП в окружающей среде – защита расстоянием.

Для защиты населения от воздействия ЭМП, создаваемых РТО, устанавливают санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитная зона – это площадь, примыкающая к технической территории РТО. Внешнюю границу этой зоны определяют на высоте 2 м от поверхности земли по предельной интенсивности излучения ЭМП, приводимой в нормах. Радиус санитарно-защитной зоны определяют по формуле (4) при условии  $\text{ППЭ}_{\Sigma} = \text{ППЭ} = 5 \text{ мкВт/см}^2$ .

#### 2.4. Защита экранированием.



Экранирование источников излучения ЭМП используют для снижения интенсивности излучения на рабочем месте или ограждения опасных зон излучения. Экраны изготовляют из металлических листов или сетки в виде замкнутых камер, шкафов или кожухов. Экранирование рабочих мест применяют в случаях, когда невозможно осуществить экранирование аппаратуры. Толщина экрана, изготовленного из сплошного алюминия, см,

$$B = 0,631g\mathcal{E}/\sqrt{f} , \quad (6)$$

где  $\mathcal{E}$  – заданное ослабление интенсивности излучения ЭМП;  $f$  – частота излучения ЭМП, Гц.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

- 3.1. Выбрать вариант (см. таблицу).
- 3.2. Ознакомиться с методикой.
- 3.3. Определить допустимую плотность потока энергии ЭМП от РТО, зная тип антенны.
- 3.4. Определить допустимое время работы на рабочем месте, если оно облучается еще двумя РТО, создающими интенсивность облучения  $ППЭ_2$  и  $ППЭ_3$ . Все три РТО работают в диапазоне 300 МГц...300 ГГц.
- 3.5. Определить минимальное расстояние рабочего места от РТО при работе в течение 8 ч в день с

учетом заданных условий внешнего воздействия на оператора других факторов.

3.6. Определить радиус санитарно-защитной зоны для РТО, работающего в импульсном режиме с параметрами, указанными в таблице.

3.7. Определить минимальную толщину сплошного экрана из алюминия, обеспечивающего уменьшение интенсивности облучения в РТО на рабочем месте в Э раз.

3.8. Подписать отчет и сдать преподавателю

### **Варианты заданий**

к практическим занятиям по теме *«Расчет средств защиты от электромагнитных полей в диапазоне частот 300 МГц... 300 ГГц»*.

Вариант определяют по первой букве фамилии и последней цифре учебного шифра.

Для студентов, чьи фамилии начинаются с букв А...З, – варианты 1...10; И...П – 11...20; Р...Я – 21...30.

## Варианты заданий

Вариант	Характеристики радиотехнического объекта								Условия на рабочем месте				Ослабление интенсивности ЭМП
	Тип антенны			Р <sub>имп</sub> , кВт	τ, мс	T <sub>с</sub> , мс	σ	f, МГц	Интенсивность облучения, мкВт/см <sup>2</sup>		Температура, °С	Наличие рентгеновского излучения	
									неподвижная	вращающаяся			
01	+			100	10	10 <sup>2</sup>	100	300	10	3	20	+	100
02		+		1000	10	10 <sup>2</sup>	50	400	12	30	30		100
03			+	800	10	10 <sup>2</sup>	80	450	6	100	32		500
04	+			500	10	10 <sup>2</sup>	90	500	5	50	25	+	600
05		+		300	10	10 <sup>2</sup>	100	550	3	100	20	+	100
06			+	200	10 <sup>-2</sup>	10	120	600	5	50	30		120
07	+			1000	10	10 <sup>2</sup>	150	800	8	100	20		100
08		+		1800	10 <sup>-1</sup>	10	50	900	6	60	25	+	600
09			+	60	10 <sup>-1</sup>	10	40	700	3	12	30		500
10	+			90	10 <sup>-1</sup>	10	30	800	10	3	32		700
11		+		600	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>2</sup>	20	500	6	40	25	+	100
12			+	10	10	10 <sup>2</sup>	90	600	7	30	20	+	120
13	+			1000	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	25	900	5	50	24		800
14		+		70	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>2</sup>	20	300	8	80	20		1000
15			+	20	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>2</sup>	90	900	5	30	30		100
16	+			80	10 <sup>2</sup>	10	50	10 <sup>4</sup>	10	3	30		600
17		+		100	10	10 <sup>2</sup>	80	10 <sup>3</sup>	5	50	20		100
18			+	120	10	10 <sup>2</sup>	50	10 <sup>4</sup>	3	100	22	+	120
19	+			500	10	10 <sup>2</sup>	40	800	2	12	30		800
20		+		200	10	10 <sup>2</sup>	30	500	3	50	25		1000
21			+	1000	10	10 <sup>3</sup>	60	900	4	40	30		100
22	+			800	10	10 <sup>3</sup>	40	800	5	5	25	+	100
23		+		80	10 <sup>-1</sup>	10	10	900	3	30	32		120
24			+	100	10 <sup>-1</sup>	10	8	500	9	30	26		700
25	+			1000	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>2</sup>	20	800	2	8	24	+	800
26		+		1600	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>2</sup>	10	650	4	30	30		100
27			+	1100	10 <sup>-1</sup>	10	12	950	2	80	24		120
28	+			600	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>2</sup>	100	2000	3	3	30		800
29		+		50	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	400	3000	5	50	24	+	200
30			+	100	10 <sup>-3</sup>	10	100	4000	2	40	30		1000

### Литература

1. Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоиздат, 1986
2. Черкасов В.Н., Шаровар Ф.И. Пожарная профилактика электроустановок. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987.
3. Черкасов В.Н. Пожарно-техническая экспертиза электрической части проекта.- М.: Стройиздат, 1987

4. Пожарная профилактика электроустановок. Методическое пособие по выбору электрооборудования для взрывоопасных и пожароопасных производств./ Чайчиц Н.И. , Иванович А.А./, 1999г.
5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей, 4-е изд. , перераб. и доп. - М.; Энергоиздат, 1986г.
6. Безопасность электроустановок. Методическое пособие по выбору электропроводки./ Чайчиц Н.И., Иванович А.А./, Мн. 2002г.
7. Безопасность электроустановок. Методические указания и индивидуальные задания к выполнению контрольной работы по разделу «Обеспечение пожарной безопасности электроустановок» ./ Чайчиц Н.И., Иванович А.А./, Мн. 2002г.
8. Учебное пособие по курсу «Безопасность жизнедеятельности» к самостоятельной работе студентов / Владим. гос. ун-т., Сост. Е.А. Баландина, А.М. Пономарёв, Н.И. Туманова, Н.А. Морохова Владимир, 2011. – 203 с.