

Тема 10. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

НА РАБОЧИХ МЕСТАХ

10.1. Действие электрического тока на организм человека

Фактор поражения электрическим током является одним из самых опасных факторов и наиболее часто встречающимся не только на производстве, но и в быту. Наличие электрического напряжения невозможно определить ни одним из органов чувств человека и уберечься от последствий поражения электрическим током можно только при соблюдении мер электробезопасности.

Электробезопасность - система организационных мероприятий и технических средств, предназначенных для защиты людей и животных от вредного и опасного воздействия электрического тока или электрической дуги.

Поражение электрическим током - физиологический эффект от воздействия электрического тока при его прохождении через тело человека.

При прохождении через организм человека электрический ток оказывает воздействия:

- термическое;
- электролитическое;
- биологическое.

Термическое воздействие проявляется в виде:

- электрические знаков, которые сопровождаются образованием на коже в виде пятен серого или бледно-желтого цвета (диаметром 1-5 мм);
- электрических ожогов, которые сопровождаются покраснением и обугливанием кожи и/или внутренних органов;
- металлизации кожи, которая сопровождается проникновением в верхние слои кожи мельчайших частиц металла, расплавленного электрической дугой;
- прямые механические повреждения, которые сопровождаются разрывами кожи, кровеносных тканей и сосудов;

- электроофтальмии, которая сопровождается воспалением наружных оболочек глаз в результате воздействия потока ультрафиолетовых лучей электрической дуги.

Электролитическое воздействие электрического тока проявляется в разложении крови, что вызывает нарушения протекания физико-химических процессов в организме человека.

Биологическое воздействие проявляется в:

- прекращении деятельности органов дыхания и кровообращения;
- косвенные механические повреждения, которые могут быть вызваны падением с высоты при поражении электрическим током.

При прохождении электрического тока через тело человека может произойти электрический удар.

Электрический удар – непроизвольное судорожное сокращение мышц тела, в том числе и мышц внутренних органов, при прохождении через него электрического тока.

Степень электрического удара на организм человека определяет величина проходящего через тело человека тока.

Существуют четыре степени электрического удара:

- 1 степень – судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- 2 степень – судорожное сокращение мышц с потерей сознания;
- 3 степень – потеря сознания и нарушение деятельности сердца или органов дыхания;
- 4 степень – клиническая смерть, т.е. отсутствие кровообращения и дыхания.

При электрическом ударе внешних местных повреждений человек может и не иметь.

Электрические токи подразделяют на:

- **ощутимый ток** – электрический ток, вызывающий ощутимые раздражения (покалывания) при прохождении через организм человека;
- **неотпускающий ток** – электрический ток, вызывающий при

прохождении через организм человека, неконтролируемые судорожное сокращение мышц руки, которая зажала оголенный провод, находящийся под напряжением.

- **фибрилляционный** ток – вызывает при прохождении через организм фибрилляцию сердца.

Напряжение прикосновения – разность потенциалов между точкой прикосновения человека к токоведущим частям и землей.

10.2. Факторы, определяющие действие тока на организм человека

К факторам, определяющим действие тока на организм человека, относятся:

- 1) индивидуальные особенности и состояние организма человека;
- 2) род и частота тока;
- 3) величина тока;
- 4) время действия тока;
- 5) путь прохождения тока;
- 6) типы электрических сетей.

1. Сопротивление тела человека. Действие электрического тока на организм человека определяется электрическим сопротивлением тела человека. Электрическое сопротивление тела человека принимается условно состоящим из трех последовательно включенных сопротивлений (рисунок 10.1) – двух одинаковых сопротивлений наружного слоя кожи и одного внутреннего сопротивления R_B .

Сопротивление наружного слоя кожи состоит из активного сопротивления R_H и емкостного C_H .

Полное сопротивление тела человека можно записать в следующем виде:

$$R_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{4 \cdot R_H \cdot (R_H + R_B)}{1 + R_H^2 \cdot C_H^2}} + R_B.$$

Сопротивление наружного (R_H) рогового слоя кожи человека составляет 1...100 кОм. Сопротивление внутренних тканей (R_B) организма человека

составляет 0,3 – 0,5 кОм. Сопротивление сухой и грубой кожи выше, чем влажной, что характерно для пожилых людей. Сопротивление кожи снижается с повышением влажности.

В расчетах принимается сопротивление тела человека $R_{\text{ч}} = 1000 \text{ Ом}$.

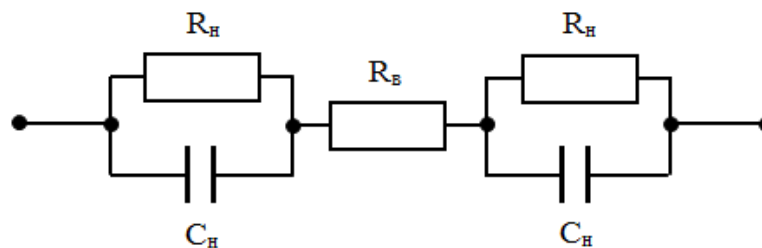


Рисунок 10.1 – Эквивалентная схема сопротивления тела человека:

$R_{\text{н}}$ – активное сопротивление наружного слоя кожи человека,

$C_{\text{н}}$ – емкостное сопротивление наружного слоя кожи человека,

$R_{\text{в}}$ – внутреннее сопротивление тела

Сопротивление человека неодинаково у различных людей и меняется у одного и того же человека в различных условиях. Сопротивление кожи резко уменьшается при её повреждении (даже до 500-700 Ом), увлажнении (на 15-50%), загрязнении (особенно токопроводящими веществами). Снижается сопротивление человека при ухудшении его состояния - утомление, голод, болезнь, опьянение.

Сопротивление тела человека сильно зависит от приложенного напряжения, длительности протекания тока, рода и частоты тока.

В таблице 10.1 приведены данные о том, как организм реагирует на ток разной величины (в мА).

Таблица 10.1

**Характер реакции организма на величину электрического тока
(при напряжении прикосновения до 200 – 250 В)**

Величина тока, мА		Характер реакции организма человека
Переменный	Постоянный	
0,1 – 1,5	5 – 7	Легкое дрожание пальцев, покалывание (<i>ощутимый</i>)
8 – 10	50 – 70	Судороги рук (<i>неотпускающий</i>)
90 – 100	200 – 300	Сокращение мышц сердца (<i>фибрилляционный</i>)

Переменный и постоянный ток по-разному действуют на организм человека.

При напряжении до 250 В более опасен переменный ток.

При напряжении от 250 до 500 В постоянный и переменный токи одинаково опасны.

При напряжении более 500 В – более опасен постоянный ток.

С увеличением времени действия электрического тока сопротивление организма человека уменьшается. Формулы для определения допустимого тока (мА) от времени действия:

в Российской Федерации:

$$I_{\text{д}} = \frac{50}{t};$$

в Международном электротехническом комитете (МЭК):

$$I_{\text{д}} = \frac{50}{t},$$

где t – время действия, с.

Для промышленных и бытовых электроустановок с напряжением до 1000 В и частотой тока 50 Гц по длительности воздействия допустимый электрический ток имеет следующие значения (таблица 10.2):

Таблица 10.2

Допустимые токи через тело человека в зависимости от времени воздействия

Время действия	Допустимый ток, мА
Длительное действие	1
В течение 1 с	50
В течение 0,1 с	400

При длительном протекании тока сопротивление тела снижается за счет усиления кровообращения под электродами, потовыделения. При небольших напряжениях порядка 20...30 вольт за 1-2 минуты сопротивление снижается на 25% и более. При более высоких напряжениях снижение более значительное.

В результате увеличения частоты тока $R_{\text{ч}}$ уменьшается из-за снижения емкостного сопротивления и в пределе (при $f=\infty$) стремится к $R_{\text{в}}=300$ Ом.

Следовало бы считать, что увеличение частоты приведет к повышению опасности поражения током. В действительности оказалось, что это предположение справедливо лишь в диапазоне 0...50 Гц, дальнейшее повышение частоты (несмотря на рост тока из-за снижения сопротивления тела) сопровождается снижением опасности поражения, и полностью исчезает при частоте 450-500 Гц. Это одна из причин использования частоты 400 Гц на авиационных и морских судах. Ток такой частоты не может вызвать смертельного поражения из-за прекращения работы сердца, легких, но сохраняется опасность ожогов.

На рисунке 10.1 показана зависимость сопротивления человека $R_{\text{ч}}$ от приложенного напряжения.



Рисунок 10.1 - Зависимость сопротивления человека $R_{\text{ч}}$ от приложенного напряжения

Путь прохождения тока в теле человека играет существенную роль в исходе поражения, так как ток может пройти через жизненно важные органы: сердце, легкие, головной мозг и др. Возможных путей прохождения тока в теле человека достаточно много. В таблице 10.3 приведены наиболее часто встречающиеся пути тока по телу человека.

Прохождение тока в теле человека

Путь прохождения тока	Частота возникновения пути, (%)	Доля потерявших сознание во время воздействия тока, (%)	Значение тока проходящего через сердце, (% общего тока)
Рука – рука	40,0	83,0	3,3
Правая рука-ноги	20,0	87,0	6,7
Левая рука- ноги	17,0	80,0	3,7
Нога – нога	6,0	15,0	0,4
Голова – ноги	5,0	88,0	6,8
Голова – руки	4,0	92,0	7,0
Прочие	8,0	65,0	-

10.3. Типы электрической сети и особенности поражения электрическим током

Электрические сети с точки зрения электробезопасности подразделяют:

- электрические сети напряжением до 1000 В;
- электрические сети напряжением свыше 1000 В.

Сети переменного тока свыше 1000 В – это сети с изолированной нейтралью. Сети напряжением до 1000 В – это сети с глухозаземленной нейтралью.

Электрические сети с напряжением до 1000 В подразделяются на:

- трехфазную сеть с заземленной нейтралью;
- трехфазную сеть с изолированной нейтралью.

Однофазные сети, как правило, являются частью трехфазной сети.

Проведем анализ различных сетей по опасности поражения током.

1. Двухфазное (двухполюсное) прикосновение к токоведущим частям.

При прикосновении к двум точкам с U образуется замкнутая электрическая цепь и через тело человека проходит ток. Его величина зависит от параметров сети и $R_{\text{ч}}$ (рисунок 10.2).

При прикосновении к двум точкам с напряжением U между ними образуется замкнутая электрическая цепь и через тело человека проходит ток.

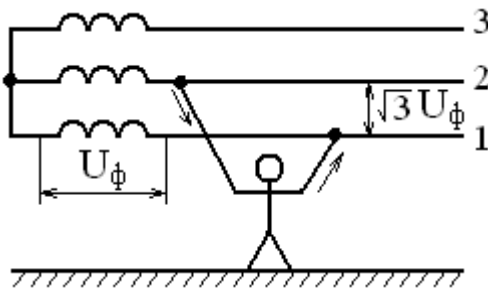


Рисунок 10.2 - Двухфазное прикосновение к токоведущим частям

Ток через тело человека будет равен

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{А}}}{R_{\text{ч}}} = \frac{\sqrt{3} U_{\Phi}}{R_{\text{ч}}},$$

где $U_{\text{А}}$ – межфазное напряжения;

U_{Φ} – фазное напряжения.

Для $U_{\Phi} = 220 \text{ В}$ и $R_{\text{ч}} = 1000 \text{ Ом}$ ток $I_{\text{ч}} = 380 \text{ мА}$ и является смертельно опасным.

2. Однофазное прикосновение к токоведущим частям.

а) сеть с заземленной нейтралью:

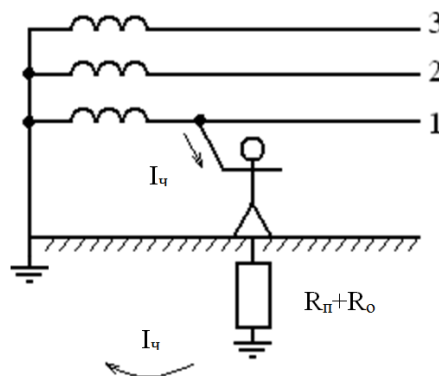


Рисунок 10.3 - Однофазное прикосновение к токоведущим частям в сети с заземленной нейтралью

Ток проходящий через человека равен

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{н}} + R_{\text{о}}},$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление пола;

$R_{\text{о}}$ – сопротивление обуви.

Сопротивление заземления $< 4 \text{ Ом}$.

Если же сопротивления пола $R_{\text{н}}$ и обуви $R_{\text{о}}$ окажутся соизмеримыми с

сопротивлением тела человека, то ток через человека будет значительно меньше, если бы $R_{\text{п}}$ и R_0 были близки к нулю (например, человек без обуви стоящий в луже).

$$I_{\text{ч}} = \frac{220}{1000 + 5000 + 5000} = 20 \text{ мА}.$$

Такой ток не является смертельным, но может быть неотпускающим и привести к судорожному сокращению мышц вплоть до невозможности освободиться от воздействия электрического тока.

б) сеть с изолированной нейтралью:

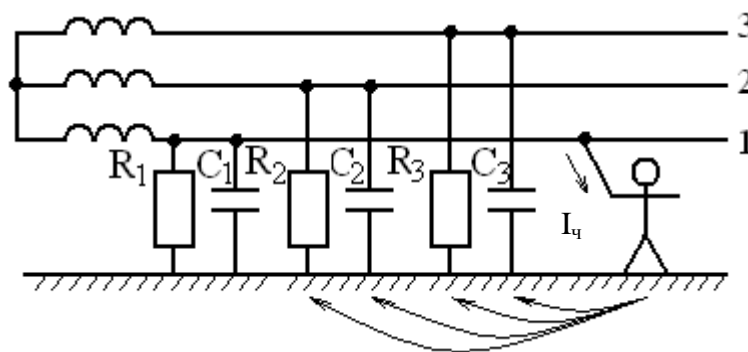


Рисунок 10.4 - Однофазное прикосновение к токоведущим частям в сети с изолированной нейтралью

Цепь тока замыкается через тело человека, землю и далее через сопротивления изоляции $R_{\text{из}}$ и емкости фаз $C_{\text{из}}$.

$R_{\text{из}}$ и $C_{\text{из}}$ распределенные в сети параметры, обусловленные активной проводимостью изоляции и емкостью фаз относительно земли.

При нормальном режиме работы сети (сеть исправна), сила тока, проходящая через тело человека, равна:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3 \cdot U_{\text{ф}}}{3 \cdot R_{\text{ч}} + R_{\text{из}}},$$

где $R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции.

Пример: при $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$; $R_{\text{ч}} = 1000 \text{ Ом}$; $R_{\text{из}} = 500\,000 \text{ Ом}$ получаем:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 500000} \approx 0,0013 \text{ А} = 1,3 \text{ мА}.$$

Последствия – такая сеть безопасна, но возможно легкое дрожание пальцев рук (ощутимый ток).

Изменение тока через тело человека в зависимости, от $R_{из}$ и $C_{из}$ показаны на рисунке 10.5.

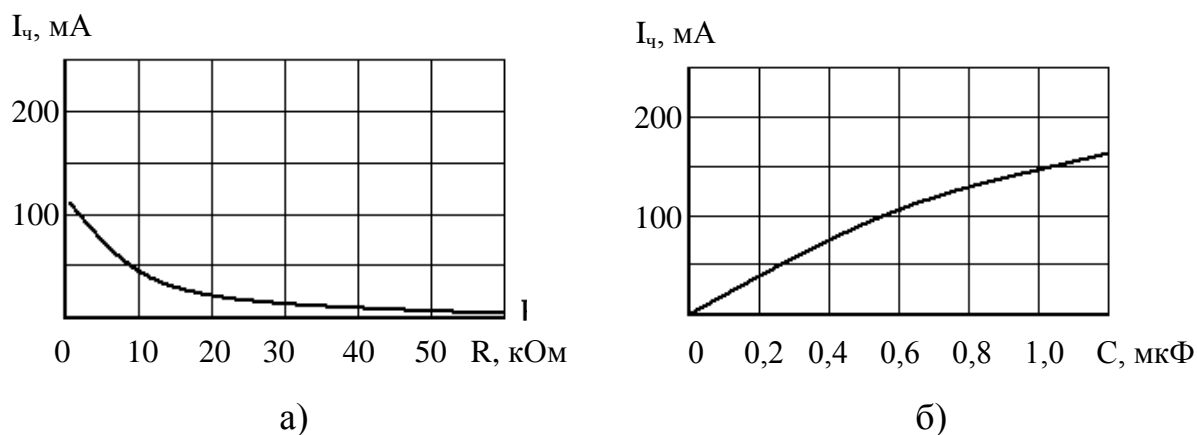


Рисунок 10.5 - Зависимость тока от $R_{из}$ (а) и от $C_{из}$ (б)

Для определения критического сопротивления изоляции (из расчета длительно – допустимого тока – для 3 сек $I_{ч.доп.}=6$ мА) используют выражение

$$R_{из.кр.} = \frac{3U_{ф} - 3R_{ч}I_{ч.доп.}}{I_{ч.доп.}}.$$

Анализ приведенных выше расчетов показывает, что **сеть с заземленной нейтралью опасна, даже если сама сеть исправна, а неисправно только оборудование.**

А если и сеть сама будет неисправна, то опасность для человека будет еще больше (смертельный исход).

Вывод — обязательно нужны меры защиты.

Анализ приведенных выше расчетов показывает, что **сеть с изолированной нейтралью не опасна**, даже если такая сеть исправна, а неисправно только оборудование. Расчеты и практика показывают, что если сама сеть окажется неисправной (если резко упадет сопротивление $R_{из}$), то опасность для человека резко возрастает, т.к. ток через его тело будет больше 320 мА (это смертельный исход).

Вывод — и в этой сети обязательно нужны меры защиты.

В значительной степени необходимые меры безопасности будут зависеть от категории опасности самого помещения по опасности поражения электрическим током.

Условия внешней среды (рабочие помещения) влияют на сопротивление тела человека.

Сухие помещения повышают сопротивление тела человека. Сырые, жаркие, пыльные, с химически активной средой помещения понижают сопротивление тела человека.

По опасности поражения электрическим током помещения, согласно Правила устройства электроустановок (ПУЭ) [2] подразделяются на *три категории*.

1 категория. Помещения без повышенной опасности характеризуются отсутствием признаков повышенной опасности.

2 категория. Это помещения с повышенной опасностью. Они характеризуются наличием одного из следующих признаков:

- сырые, с относительной влажностью более 75 %;
- температура воздуха более 35 °С;
- наличие токопроводящей пыли;
- токопроводящие полы;
- имеется одновременная возможность прикосновения к двум металлоконструкциям и машинам, соединенным с корпусом электрооборудования.

3 категория. Помещения особо опасные характеризуются наличием двух и более признаков, свойственных помещениям с повышенной опасностью, или наличием одного из следующих признаков:

- сырые, с относительной влажностью, близкой к 100%;
- химически активная среда, которая способствует разрушению изоляции.

Меры защиты зависят от величины напряжения в сети и в оборудовании, а также от категории помещения по опасности.

10.4. Средства защиты от поражения электрическим током

Защитные меры в зависимости от сочетания различных факторов делятся на три группы.

I. Организационные способы (предназначены в основном для действующего квалифицированного персонала), связанные с регламентом обеспечения нормативной эксплуатации электроустановок.

II. Организационно-технические, связанные с обеспечением безопасных режимов работы электросетей, использованием необходимых защитных средств, сигнализаций, предупреждающих плакатов, ограждений и др.

III. Технические способы, которые подразделяются на следующие группы:

- общетехнические;
- специальные;
- средства индивидуальной защиты (СИЗ).

К **общетехническим** средствам защиты относятся:

- 1) применение малых напряжений – не более 42 В (питание электроинструмента, переносных светильников; местного освещения на станках и т.д.);
- 2) изоляция токоведущих частей может быть: рабочей, дополнительной, усиленной.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), минимально допустимое сопротивление изоляции проводов относительно земли в сетях с изолированной нейтралью должно быть не менее указанных в таблице:

Типы электроустановок	Минимально допустимое сопротивление изоляции, МОм
Осветительные установки	0,5
Системы защиты	1
Шины щитов управления	10

- 3) Электрическое разделение сетей с изолированной нейтралью на отдельные участки в линиях большой протяженности с целью снижения

накопления электрических зарядов.

4) Оградительные устройства позволяют исключить соприкосновение человека с токоведущими частями.

5) Сигнализация предупреждает о наличии напряжения в электроустановках. Сигнализация может быть звуковой и световой.

Кроме этого используются следующие методы и средства защиты:

1. Обеспечение недоступности токоведущих частей оборудования за счет применения изоляции, расположения на недоступной глубине или высоте, применение защитных кожухов, шкафов;

2. Защитное разделение сети на отдельные, несвязанные между собой электрически, участки путем использования разделяющих трансформаторов.

3. Применение двойной изоляции в оборудовании.

4. Применение защитных блокировок.

5. Применение автоматических защит.

6. Уравнивание и выравнивание потенциалов.

7. Мониторинг состояния изоляции, защита от замыканий на землю.

8. Мониторинг динамики напряжений и защита от опасных колебаний.

9. Грозозащита.

К **специальным** (*основным!!!*) техническим средствам защиты от поражения электрическим током относятся:

- защитное заземление (в сетях с изолированной нейтралью),
- защитное зануление (в сетях с заземленной нейтралью),
- защитное отключение (может применяться в обоих типах сетей).

Дадим определение специальным техническим средствам защиты от поражения электрическим током.

Защитное заземление – это преднамеренное соединение с землей или ее эквивалентом (фундамент здания, металлические конструкции и т.д.) металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Защитное зануление – это преднамеренное электрическое соединение с

нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Защитное отключение – это быстродействующее автоматическое отключение электроустановки, которая может оказаться под напряжением. Это автоматические приборы, в основном реагирующие на изменение напряжения электрооборудования по отношению к земле и обеспечивающие защиту за счет очень короткого времени срабатывания (менее 0,2 с).

Защитное заземление и зануление электроустановок выполняется при следующих условиях:

1) на всех электроустановках с напряжением 380 В и выше переменного тока и 440 В и выше постоянного тока;

2) на всех электроустановках в помещениях с повышенной опасностью, особоопасных помещениях и на наружных установках с напряжением 42 В и выше переменного тока и 110 В и выше постоянного тока.

Защитное заземление и зануление *не требуется* на электроустановках с напряжением до 42 В переменного тока и до 110 В постоянного тока.

Принцип действия заземления состоит в уменьшении разности потенциалов между заземляемыми частями электрооборудования и землей до безопасной величины за счет малого сопротивления системы заземления по отношению к сопротивлению тела человека.

Сопротивление тела человека 1000 Ом, а сопротивление системы заземления при напряжениях до 1000 Вольт *не более 4 Ом*.

В соответствии с ПТЭЭП [4], **периодичность проверки состояния заземляющих устройств (контура заземления)** осуществляется:

1. Визуальный осмотр видимых частей заземляющих устройств должен проводиться не реже 1 раза в 6 месяцев ответственным за электрохозяйство Потребителя или работником им уполномоченным.

При осмотре оценивается состояние контактных соединений между защитным проводником и оборудованием, наличие антикоррозионного покрытия, отсутствие обрывов.

Результаты осмотров должны заноситься в паспорт заземляющего устройства.

2. Осмотр с выборочным вскрытием грунта должен проводиться не реже одного раза в 12 лет.

3. Периодичность измерения сопротивления заземляющего устройства электроустановок проводят не реже 1 раза в 12 лет.

Конструктивно заземление может быть контурным, когда заземлители располагаются снаружи здания по его периметру, или выносным.

При устройстве системы заземления предпочтительнее использовать естественные заземлители: фундаменты зданий или металлические каркасы зданий; водопроводы и другие системы, по которым не перемещаются горючие и взрывоопасные газы и жидкости; рельсы железнодорожных путей, если дорога не электрофицирована.

Принцип действия **защитного зануления** состоит в том, что при замыкании фазы на корпус электрооборудования происходит однофазное короткое замыкание, при этом срабатывает максимальная токовая защита и отключает поврежденную фазу. Для отключения используют плавкие предохранители (время срабатывания 5...7 сек) или автоматические выключатели (1...2 сек).

Индивидуальные средства защиты:

а) Основные. При напряжении до 1000 В – это диэлектрические перчатки, инструмент с изолирующими рукоятками и т.д. Обеспечивают защиту от напряжения прикосновения.

б) Дополнительные индивидуальные средства (до 1000 В): диэлектрические резиновые коврики, изолирующие подставки, и т.д.; они обеспечивают защиту от шагового напряжения и усиливают действие основных средств.

Трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью очень широко применяются при напряжениях до 1000 В. *Нулевым защитным проводом* в таких сетях называется проводник, соединяющий зануляемые части

электрооборудования с глухозаземленной нейтральной точкой трансформатора или генератора.

На рисунках 10.6-10.8 показаны схемы заземления и зануления в трехфазных сетях.

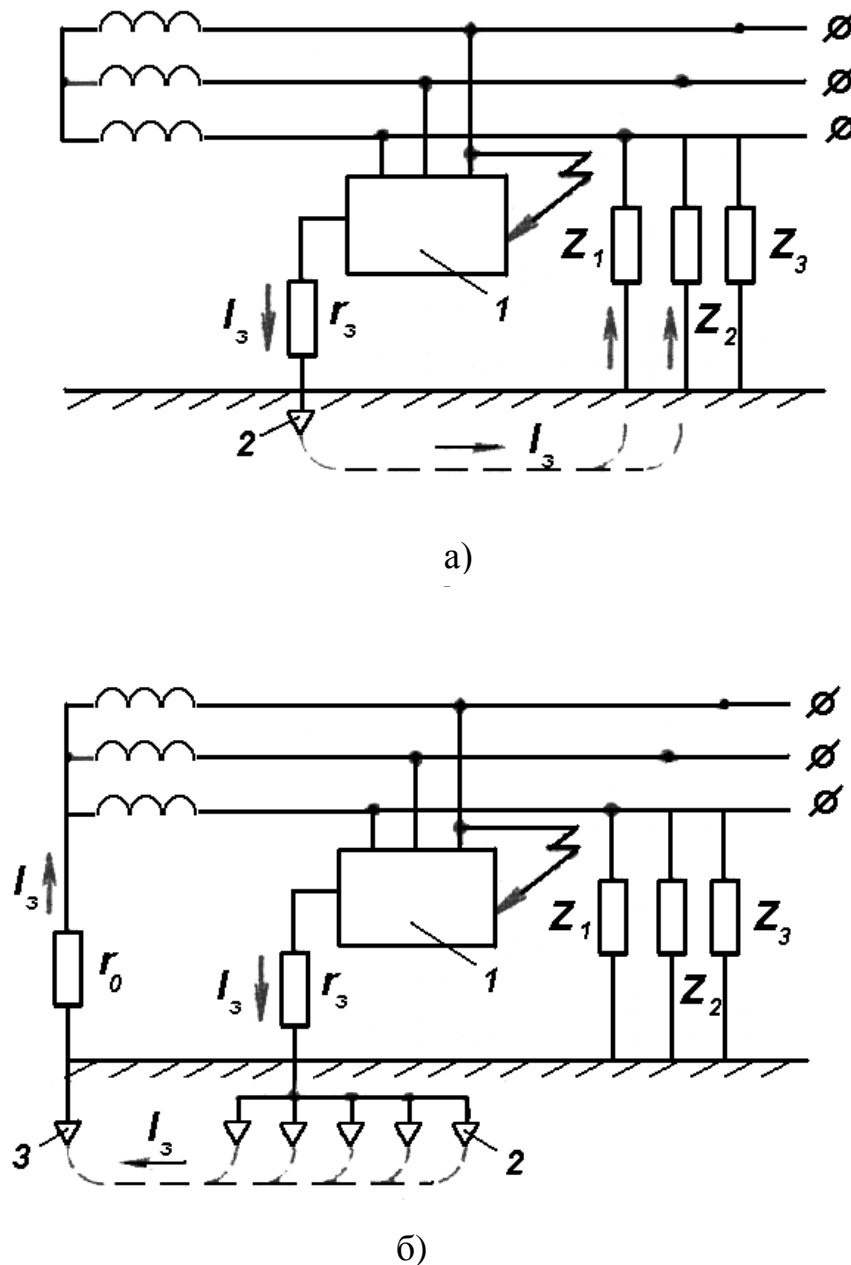
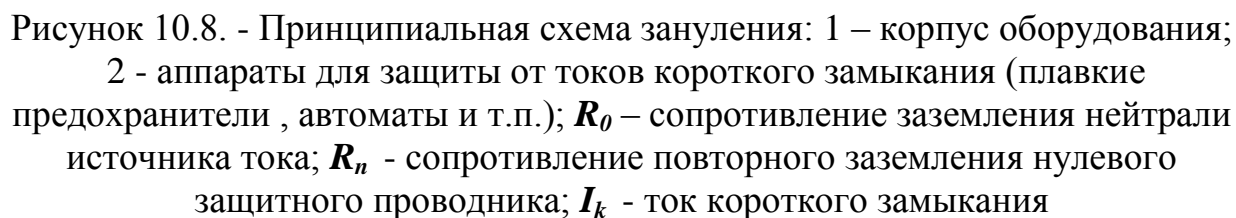
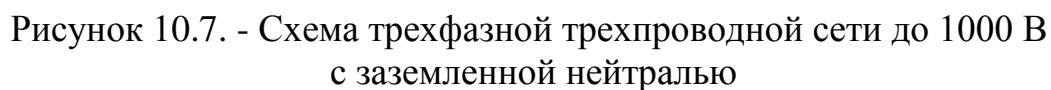
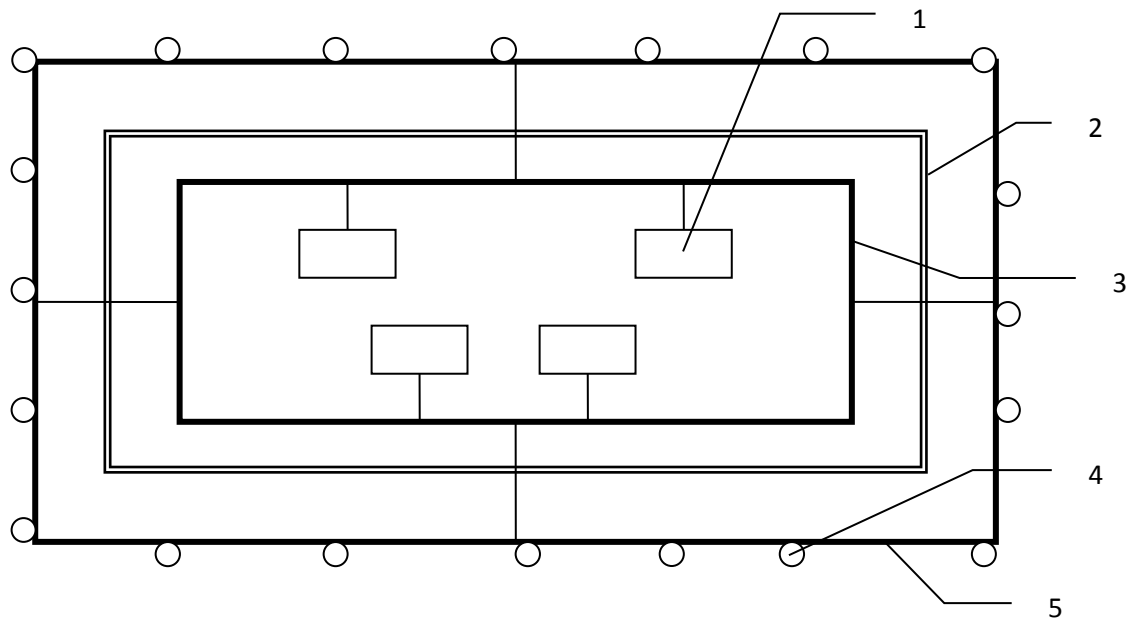


Рисунок 10.6. - Принципиальные схемы защитного заземления: а) – в сети с изолированной нейтралью до 1000 В и выше; б) – в сети с заземленной нейтралью выше 1000 В; 1 – заземленное оборудование; 2 – заземлитель защитного заземления; 3 – заземлитель рабочего заземления; r_3 , r_0 – сопротивления соответственно защитного и рабочего заземлений; I_3 – ток замыкания на землю

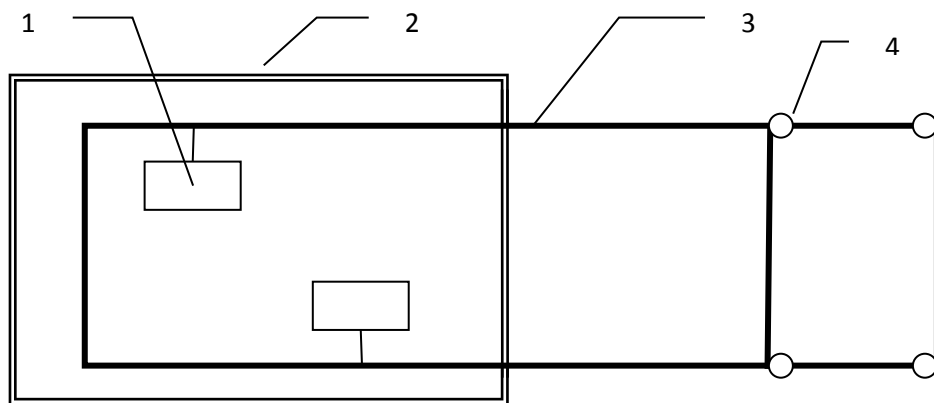


Искусственные заземляющие устройства подразделяются на

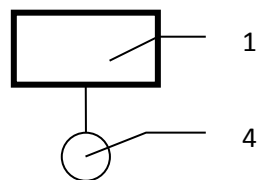
контурное, выносное, одиночное (рисунок 10.9).



а)



б)



в)

Рисунок 10.9 – Схемы искусственного защитного заземления:
 А – контурная система заземления; б – выносная система заземления;
 в – одиночный заземлитель; 1 – электрические установки; 2 – стена
 производственного помещения; 3 – соединительная полоса; 4 – заземлитель;
 5 – наружная соединительная полоса

В качестве естественного заземляющего устройства используются: бетонные фундаменты и металлические конструкции зданий, имеющие соприкосновение с землей; кабели, проложенные в земле и предназначенные для других целей; трубопроводы, проложенные в земле и предназначенные для других целей.

В качестве искусственного заземляющего устройства используются вертикально установленные трубы, прутки или уголки, соединенные металлической полосой.

Контурное заземление применяется для производственных помещений больших габаритов.

Выносное заземление применяется для производственных помещений небольших габаритов.

Одиночных заземлитель применяется для отдельных электрических установок.

Согласно ПУЭ *допустимое сопротивление заземляющих устройств* составляет:

- на электроустановках с напряжением до 1000 В – не более 4 Ом;
- на электроустановках с напряжением свыше 1000 В – не более 0,5 Ом.

10.4 Защитное автоматическое отключение

Как отмечалось ранее, опасным фактором для здоровья становится прохождение через человека тока в течение более 1-ой секунды, что оказывает необходимость введения контроля времени опасного воздействия.

Поэтому в дальнейшая разработка способов защиты человека от поражения электрическим током была связана с поиском возможностей ограничения длительности воздействия электрического тока на основе использования устройств автоматического отключения источника питания.

Электроустановка при *занулении* защищается одним или несколькими устройствами автоматического отключения (предохранителями и автоматическими выключателями). В случае появления сверхтоков

(перегрузки, короткие замыкания) или недопустимой тепловой нагрузки происходит отключение от питания поврежденного участка цепи. В настоящее время используются в основном *автоматические выключатели (АВ)*.

Автоматический выключатель - механический или электронный коммутационный аппарат контактного действия, предназначенный для включения и соединения цепи при нормальных условиях и автоматического отключения в течение регламентированного времени при нормированных нерабочих условиях в цепи, таких как токи короткого замыкания (сверхтоки).

Автоматические устройства защиты (1-, 2-х, 3-х и 4-х полюсные) должны выбираться с учетом параметров электроустановки, ожидаемых токов короткого замыкания, характеристик нагрузки, условий прокладки и тепловых характеристик проводников (рисунок 10.10).

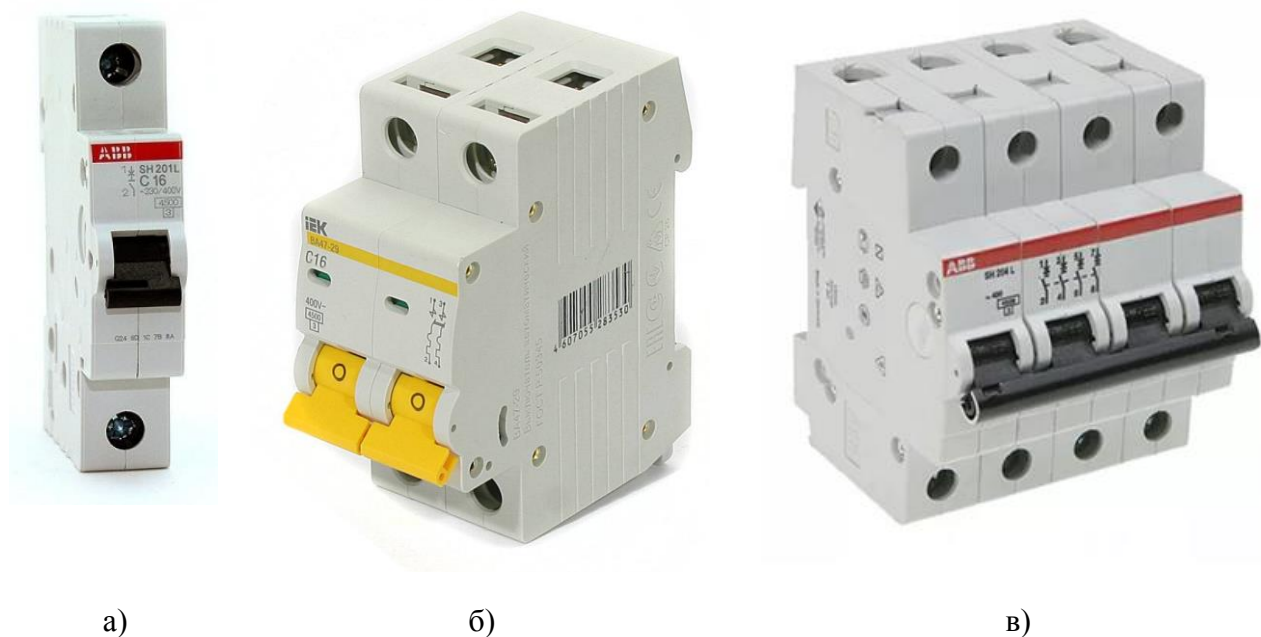


Рисунок 10.10 – Одно- (а), двух- (б) и четырех- (в) полюсные автоматические выключатели с номинальным током $I_n=16\text{A}$.

Автоматические выключатели разделяются по току мгновенного расцепления: *типы В, С и D* (с различной кратностью сверхтоков от $3...5 I_n$ (тип *В*), $5...10 I_n$ (тип *С*), $10...20 I_n$ тип *D*). Такой диапазон кратности

параметров контроля токов короткого замыкания позволяет учитывать структуру электросетей.

На 1-м уровне потребления для контроля отдельных электрических цепей используются АВ типа *B*. При усложнении электроустановки (уже на группу отдельных цепей), следует использовать АВ типа *C*, а при дальнейшем усложнении электросети наступает необходимость установки автоматов типа *D*. Времятоковые рабочие характеристики автоматических выключателей всех типов приведены на рисунке 10.11.

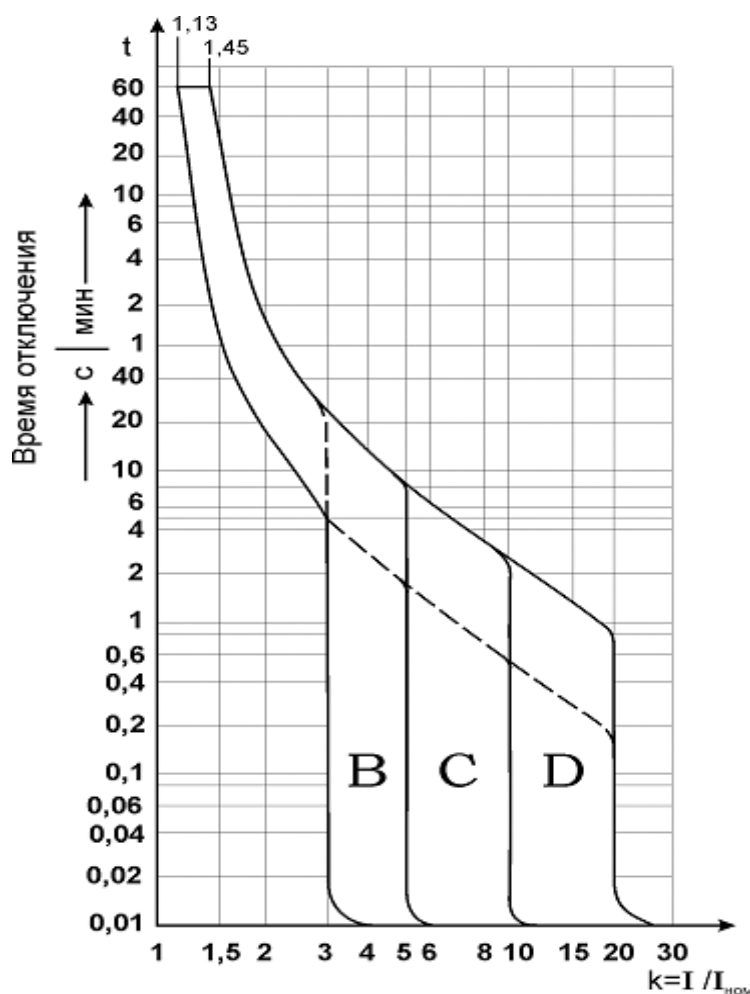


Рисунок 10.11 - Времятоковые рабочие характеристики автоматических выключателей типов *B*, *C* и *D*

Технические характеристики выбора автоматических выключателей – номинальное напряжение ($U_n = 220V$ и $380V$) и номинальный ток нагрузки по предварительной оценке потребляемой энергии в электроустановке и привязке

к соответствующему значению принятой шкалы номинальных токов (I_n – 6, 10, 16, 25, 40, 63, 80, 100, 125А и др.).

Качество АВ определяется его возможностями по отключению возникающих в цепи КЗ. Это в первую очередь **отключающая способность** (I_{oc}). Нормативно в России приняты 4 уровня (ПУЭ, 7 выпуск) — до 10000А, до 6000А, до 4500А и до 3000А. В странах ЕС преобладает использование автоматов только первых двух уровней, что объясняется оправданно повышенными требованиями обеспечения электробезопасности.

Кроме этого, важной характеристикой качества является показатель **токоограничения АВ**, определяющий количество энергии, которую устройство способно пропустить через себя без вреда до момента отключения тока короткого замыкания. Данный показатель характеризует стойкость устройства к динамической (ударной) и тепловой нагрузке при отключении КЗ. Это достигается с помощью специальных конструктивных решений – в частности, конструкции дугогасительной камеры и системы магнитного дутья для гашения дуги, в качественных выключателях.

Класс токоограничения определяется временем с момента начала размыкания контактов АВ до полного гашения электрической дуги, возникающей при отключении автомата в случае короткого замыкания.

Существует три класса токоограничения: 1, 2, 3. Самый высокий класс - 3. Время гашения дуги автомата этого класса токоограничения происходит за 2,5...6 мс, 2-го класса — 6...10 мс, 1 класса — за время более 10 мс. Класс токоограничения указывается под значением предельной коммутационной способности в черном квадрате. Автоматы с 1-м классом токоограничения не маркируются.

Устройства защитного отключения (УЗО)

Дальнейшим развитием систем электробезопасности стали *устройства защитного отключения (УЗО)*, успешно контролирующего утечки токов малых значений порядка $0,001 \div 0,01$ А.

В основу действия УЗО составляет ограничение времени протекания тока

через тело человека или его утечек за счет быстрого отключения, например, при нарушении изоляции и др. Это гарантирует сохранение жизни человек, как при прямом, так и при косвенном прикосновениях к токоведущим и нетокведущим (металлическим) частям электроустановок. Наряду с этим, УЗО надежно обеспечивает защиту от возгораний и пожаров, возникающих при различных повреждениях в электросетях, что выгодно их отличает от других устройств электрозащиты.

УЗО применяются для комплектации вводно-распределительных устройств (ВРУ), распределительных щитов (РЩ), групповых щитков (квартирных и этажных), устанавливаемых в жилых и общественных зданиях, производственных помещениях и т.п.

Применение УЗО целесообразно и оправдано по социальным и экономическим причинам в электроустановках всех возможных видов и самого различного назначения.

Затраты на установку УЗО несоизмеримо меньше возможного ущерба — гибели и травм людей от поражения электрическим током, возгораний, пожаров и их последствий, произошедших из-за неисправностей электропроводки и электрооборудования. А размеры предотвращаемых материальных ущербов на 4-5 порядков превышают стоимость использования данных устройств в системе защиты.

Принцип действия УЗО.

Функционально УЗО определяется как быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на дифференциальный (разностный) ток в проводниках (фазном/фазных и нулевом), подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке.

Принцип действия УЗО дифференциального типа основан на применении электромагнитного векторного сумматора токов — дифференциального трансформатора тока.

Сравнение текущих значений двух и более (в четырехполюсных УЗО — 4-х) токов по амплитуде и фазе наиболее эффективно, т.е. с минимальной

погрешностью, осуществляется электромагнитным путем – с помощью дифференциального трансформатора тока (рисунок 10.12).

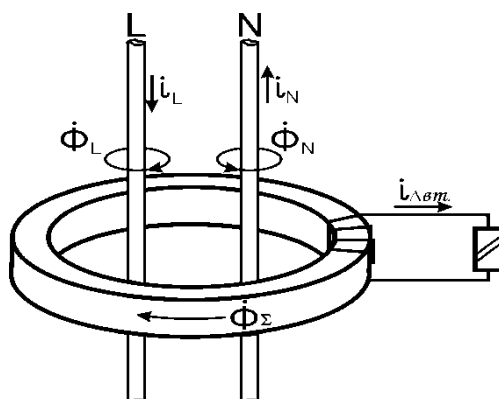


Рисунок 10.12 - Принципиальная схема дифференциального трансформатора тока

Суммарный магнитный поток в сердечнике – Φ_{Σ} , пропорциональный разности токов в проводниках, являющихся первичными обмотками трансформатора, i_N и i_L , наводит во вторичной обмотке трансформатора тока соответствующую эдс, под действием которой в цепи вторичной обмотки протекает ток $i_{\Delta\text{вт}}$, также пропорциональный разности первичных токов.

Следует отметить, что к магнитному сердечнику трансформатора тока электромеханического УЗО предъявляются чрезвычайно высокие требования по точности и качеству измерений – высокая чувствительность, линейность характеристики намагничивания, температурная и временная стабильность и т. д.

По этой причине для изготовления сердечников трансформаторов тока, применяемых при производстве электромеханических УЗО, используется специальное высококачественное аморфное (некристаллическое) железо.

Основные функциональные блоки УЗО представлены на рисунке 10.13.

Важнейшим функциональным блоком УЗО является дифференциальный трансформатор тока **1**. Пусковой орган (пороговый элемент) **2** выполняется, как правило, на чувствительных магнитоэлектрических реле прямого действия или электронных компонентах. Исполнительный механизм **3** включает в себя

силовую контактную группу с механизмом привода.

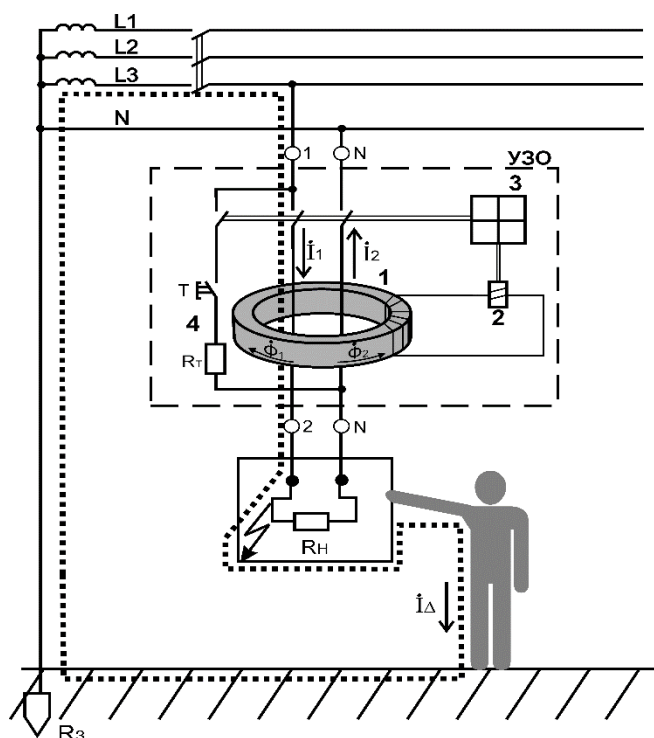


Рисунок 10.13 - Принцип действия УЗО

В нормальном режиме, при отсутствии дифференциального тока – тока утечки, в силовой цепи по проводникам, проходящим сквозь окно магнитопровода трансформатора тока 1 протекает рабочий ток нагрузки. Проводники, проходящие сквозь окно магнитопровода, образуют встречно включенные первичные обмотки (контроля баланса токов в фазном и нулевом проводниках) дифференциального трансформатора тока.

Если обозначить ток, протекающий по направлению к нагрузке, как I_1 , а от нагрузки как I_2 , то можно записать равенство:

$$I_1 = I_2.$$

Равные токи во встречно включенных обмотках наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные, но векторно противоположно направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 .

Результирующий магнитный поток равен нулю, ток во вторичной

обмотке дифференциального трансформатора также равен нулю.

Пусковой орган **2** находится в этом случае в состоянии покоя.

При прикосновении человека к открытым токопроводящим частям или к корпусу электроприемника, на который произошел пробой изоляции, по фазному проводнику через УЗО кроме тока нагрузки I_1 протекает дополнительный ток – ток утечки (I_Δ), являющийся для трансформатора тока дифференциальным (разностным).

Неравенство токов в первичных обмотках ($I_1 + I_\Delta$ в фазном проводнике и I_2 , равный I_1 , в нулевом рабочем проводнике) вызывает небаланс магнитных потоков и, как следствие, возникновение во вторичной обмотке трансформированного дифференциального тока.

Если этот ток превышает значение уставки порогового элемента пускового органа **2**, последний срабатывает и воздействует на исполнительный механизм **3**.

Исполнительный механизм, обычно состоящий из пружинного привода, спускового механизма и группы силовых контактов, размыкает электрическую цепь. В результате защищаемая УЗО электроустановка обесточивается.

УЗО изготавливаются в 2-х полюсном (для контроля однофазных цепей) и в 4-х полюсном вариантах (для контроля трехфазных цепей).

Для осуществления периодического контроля исправности (работоспособности) УЗО предусмотрена цепь тестирования **4**. При нажатии кнопки «Тест» искусственно создается отключающий дифференциальный ток. Срабатывание УЗО означает, что оно в целом исправно.

Типы УЗО.

1. По условиям функционирования УЗО подразделяются на следующие типы: АС, А, В, S.

УЗО типа АС — устройства защитного отключения, реагирующие на *переменный синусоидальный дифференциальный ток*, возникающий внезапно, либо медленно возрастающий. В настоящее время во многих странах их использование ограничено – либо запрещено, либо не рекомендуется, т.к.

основная масса используемых устройств и электрооборудования с тиристорным управлением и с бестрансформаторным питанием (с питанием импульсным и пульсирующим током).

УЗО типа А – устройства защитного отключения, реагирующие на *переменный синусоидальный дифференциальный ток и пульсирующий постоянный дифференциальный ток*, возникающие внезапно, либо медленно возрастающие. Самый распространенный тип используемых устройств.

УЗО типа В – устройства защитного отключения, реагирующие практически на все виды потребляемого тока (*переменный, постоянный гладкий и прерывистый, выпрямленный дифференциальный*). Наиболее универсальный тип устройств.

УЗО типа S, G – устройства защитного отключения, селективные (с выдержкой времени отключения). В схемах электроснабжения, в которых необходимо каскадное включение защитных устройств при возникновении опасных утечек в разветвленных электросетях, необходимо применять подобные УЗО. Объясняется это тем, отключение должно произойти только в той части сети (в конкретной цепи), где происходит утечка, а не всей сети. Это можно осуществить лишь с наличием в УЗО общего контроля сети функции задержки срабатывания минимум на 4-6 периодов тока (0,08...0,12 сек), поскольку селективность (избирательность) работы устройств по дифференциальному току по другим техническим параметрам обеспечить невозможно.

2. Принципиальное значение при рассмотрении конструкции УЗО имеет разделение устройств по способу технической реализации на следующие два типа:

2.1. *УЗО, функционально не зависящие от напряжения питания* (электромеханические).

Источником энергии, необходимой для функционирования – выполнения защитных функций, включая операцию отключения, является для устройства сам сигнал – дифференциальный ток, на который оно реагирует. Данные

a) *б)*

2.2. УЗО, функционально зависящие от напряжения питания («электронные»). Их механизм для выполнения операции отключения нуждается в энергии, получаемой либо от контролируемой сети, либо от внешнего источника. Их дифференциальный трансформатор выполнен из феррита с низким коэффициентом трансформирования магнитного потока в эдс и ток его вторичной цепи. Проблема выправляется включением в эту цепь электронного усилителя тока с коэффициентом усиления тока до 10^6 раз (рис.8). Цена такого устройства в 100 раз дешевле, чем электромеханические. Однако функциональные возможности «электронных» УЗО при этом существенно снижены. Трансформаторный электронный усилитель по сути является антенной, что способствует возникновению частых ложных срабатываний устройства на импульсы в цепи.

Основной же причиной их функциональной слабости и меньшего распространения таких устройств является их неработоспособность при частоте

встречающейся и наиболее опасной по вероятности электропоражения неисправности электроустановки, а именно – при обрыве нулевого проводника в цепи до УЗО по направлению к источнику питания. В этом случае «электронное» УЗО, не имея питания, не функционирует, а на электроустановку по фазному проводнику выносится опасный для жизни человека потенциал. Поэтому в ряде стран (США, Южная Корея, Япония и в некоторых странах ЕС) в устройствах данного типа дополнительно реализована функция отключения от сети защищаемой электроустановки в случае исчезновения или критического уменьшения напряжения питания и соответственного выхода из рабочего состояния электронного усилителя (рисунок 10.15). При выходе напряжения за рамки его «рабочих» значений соленоид обесточивается и пружинами привода контакты размыкаются.

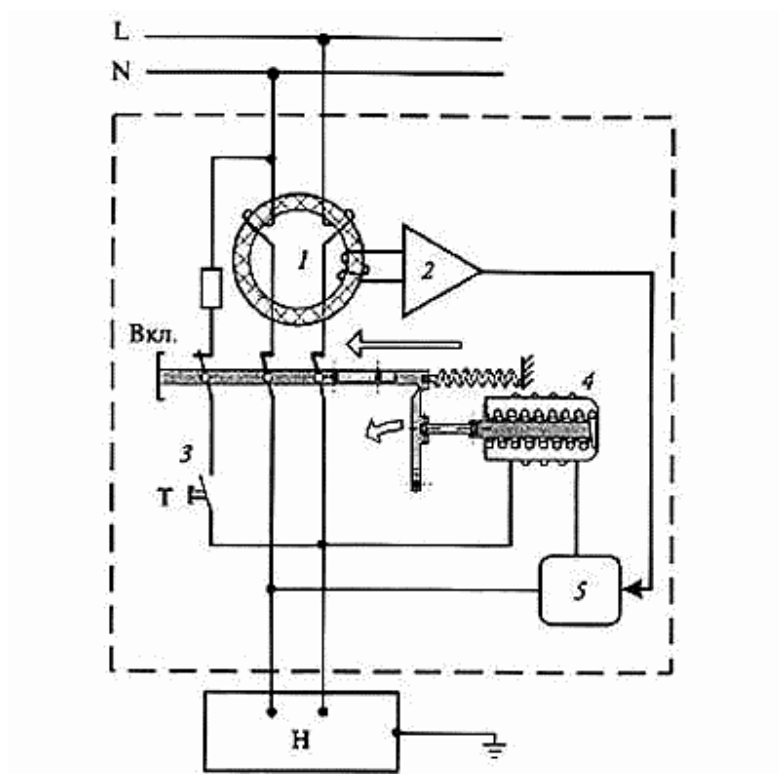


Рисунок 10.15 - Схема УЗО, зависящего от напряжения в сети («электронного»), с функцией отключения при его пропадании: 1–дифференциальный трансформатор тока; 2–электронный усилитель; 3–тестовая цепь; 4–удерживающий соленоид; 5–электронный ключ; Н–блок нагрузки; Т–кнопка «Тест»

Допускаемый диапазон напряжения для «электронных» УЗО, как правило, указывается непосредственно на устройстве, например, $U_r=220 \text{ В} \pm 10\%$. Однако в отечественной практике такое пояснение отсутствует, что существенно затрудняет выбор, как необходимых отдельных защитных устройств, так и формирование оптимальных вариантов защиты электроустановок в целом.

Наряду с этим у электронных компонентов во много раз короче временной ресурс эксплуатации (не более 3-4 лет), чем у электромеханических (до 30 лет).

Поэтому применение данных устройств, функционально зависящих от напряжения питания, более ограничено в силу их значительно меньшего времени эксплуатации и надежности, подверженности воздействию внешних факторов и допускается в основном для защиты отдельных объектов. Общий же контроль безопасности электроустановки при этом должен синхронно дублироваться и обеспечиваться электромеханическими УЗО.

2.3. Существует также класс приборов – **УЗО со встроенной защитой от сверхтоков**, так называемые «комбинированные» УЗО (рисунки 10.15 и 10.16).

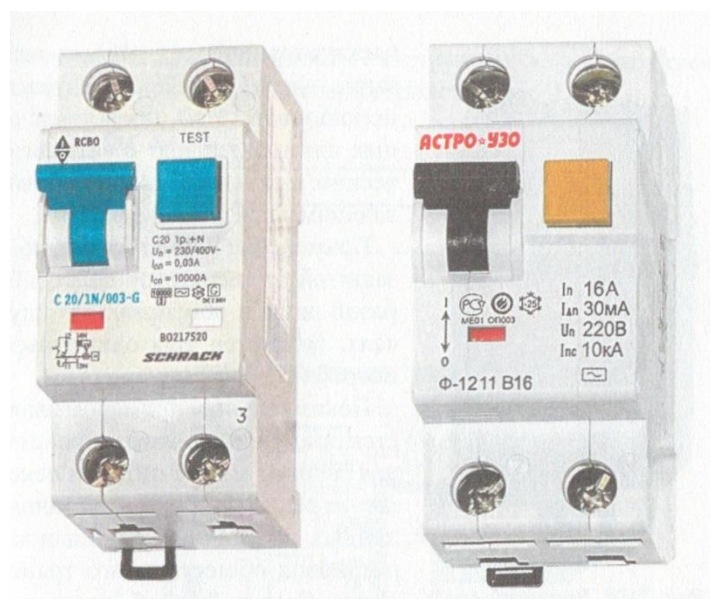


Рисунок 10.16 - УЗО со встроенной защитой от сверхтоков. $U_n=220 \text{ В}$; $I_n=16 \text{ А}$; $I_{oc}=10 \text{ кА.};$ тип **B**

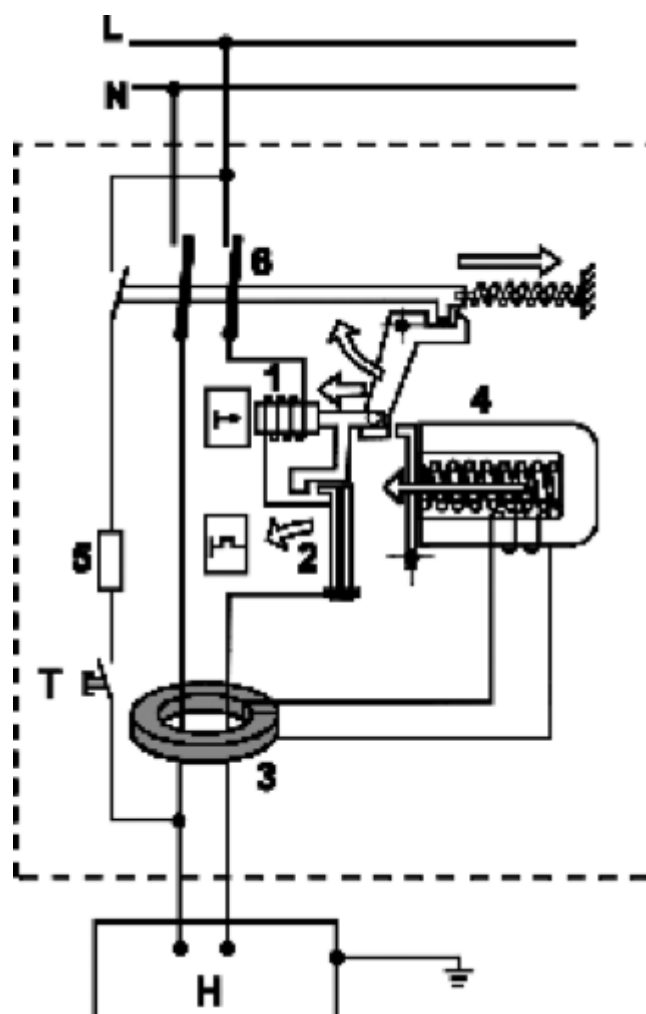


Рисунок 10-17 - Схема УЗО со встроенной защитой от сверхтока:
 1– катушка токовой отсечки; 2–биметаллическая пластина тепловой защиты; 3–
 дифференциальный трансформатор тока; 4–магнитоэлектрическое реле,
 реагирующее на дифференциальный ток; 5–тестовый резистор; 6–силовые
 контакты; Н–нагрузка; Т– кнопка «Тест»

Конструктивной особенностью УЗО со встроенной защитой от сверхтоков («комбинированных» УЗО) является то, что механизм размыкания силовых контактов запускается при воздействии на него любого из трех элементов — катушки с сердечником токовой отсечки, реагирующей на ток короткого замыкания, биметаллической пластины, реагирующей на токи перегрузки и магнитоэлектрического расцепителя, реагирующего на дифференциальный ток. Таким образом в данном устройстве совмещено выполнение функций контроля как УЗО, так и автоматического выключателя. Однако их возможности по сравнению отдельно действующим устройствам существенно

меньше. Связано это с тем, что в них конструктивно заложен ряд ограничений надежности.

В первую очередь следует отметить то, расцепитель комбинированного устройства подвержен удельным нагрузкам отключения от единиц эрга (токовая отсечка дифференциального тока) до тысяч ньютон (токовая отсечка при КЗ), т.е. с соотношением усилий минимум 1 к 1000000. Подобный диапазон усилий обладает значительным разрушительным потенциалом воздействия на механизм расцепителя.

Во-вторых, в практике отдельного использования УЗО и автоматов защиты номинальный ток для УЗО на ступень (50%) всегда выше, чтобы не подвергаться некротным перегрузкам в сети (до 50% I_n), допускаемым длительной реакцией тепловой защиты автоматических выключателей (до 1 часа). А в комбинированном варианте это невозможно обеспечить, вследствие одного значения номинального тока.

В-третьих, производство (сборка) комбинированных УЗО более сложное по сравнению с их производством в отдельности. Последнее отражается на их более чем 2-х кратной цене по сравнению с суммой стоимости данных устройств по отдельности, а в случае обеспечения 3-го класса токоограничения превышение уже более чем в 3раза.

По этой причине применение УЗО со встроенной защитой от сверхтоков целесообразно лишь в обоснованных случаях, например, для одиночных потребителей электроэнергии (с номинальным током до 40 А).

Показательным примером в этом отношении является применение таких устройств для защиты цепи питания освещения рекламных щитов, установленных на уличных павильонах остановок общественного транспорта. Там световой короб, подсвечиваемый тремя люминесцентными лампами, подключен к питающему кабелю, проложенному под землей, через комбинированное УЗО с номинальным током 6А и номинальным отключающим дифференциальным током 20 мА.

Поэтому их доля в общем объеме выпускаемых устройств защитного

отключения не превышает одного-двух процентов. Это объясняется довольно ограниченной областью их применения — небольшие электроустановки, малая, неизменяемая нагрузка ($I_n \leq 40$ А), автономные электроприемники и т.п.

УЗО со встроенной защитой от сверхтоков подразделяются стандартами на группы по аналогии с автоматическими выключателями по характеристике мгновенного расцепления: типов *B*, *C* и *D*. (На практике производятся комбинированные УЗО только типов *B* и *C*. Поэтому на лицевой панели устройства должны быть отмечены параметры, как по типу токовой отсечки автомата (например В 25: тип В, $I_n = 25$ А), так и УЗО ($I_{oc} = 6000$ А).

Нормируемые параметры УЗО.

Номинальное напряжение U_n (U_n)— действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО.

$$U_n = 220, 380 \text{ В.}$$

Номинальный ток I_n (I_n) — значение тока, которое УЗО может пропускать в продолжительном режиме работы.

$$I_n = 6; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 125 \text{ А.}$$

Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta n}$ — значение дифференциального тока, которое вызывает отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации (уставка).

$$I_{\Delta n} = 0,006; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 0,5 \text{ А.}$$

Номинальный неотключающий дифференциальный ток $I_{\Delta no}$ — значение дифференциального тока, которое не вызывает отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации. $I_{\Delta n} \leq 0,5 I_{\Delta no}$.

Поэтому, при уставке УЗО $I_{\Delta n} = 30$ мА диапазон контроля утечек в интервале 15...30 мА.

Предельное значение неотключающего сверхтока I_{nm} — минимальное значение неотключающего сверхтока при симметричной нагрузке двух и четырехполюсных УЗО или несимметричной нагрузке четырехполюсных УЗО.

$$I_{nm} = 6 I_n.$$

Номинальная включающая и отключающая способность

(коммутационная способность) I_m – действующее значение ожидаемого тока, который УЗО способно включить, пропускать в течение своего времени размыкания и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности. Минимальное значение $I_m = 10 I_n$ или 500 А (выбирается большее значение). Значения тока утечки в 500А или 1500А возможно при случае, например, короткого замыкания на землю.

Номинальный условный ток короткого замыкания I_{nc} – действующее значение ожидаемого тока, которое способно выдержать УЗО, защищаемое устройством защиты от коротких замыканий, при заданных условиях эксплуатации, без необратимых изменений, нарушающих его работоспособность.

$$I_{nc} = 3000; 4500; 6000; 10\,000 \text{ А.}$$

Номинальный условный дифференциальный ток короткого замыкания $I_{\Delta c}$ – действующее значение ожидаемого дифференциального тока, которое способно выдержать УЗО, защищаемое устройством защиты от коротких замыканий при заданных условиях эксплуатации без необратимых изменений, нарушающих его работоспособность.

$$I_{\Delta c} = 3000; 4500; 6000; 10\,000 \text{ А.}$$

Номинальное время отключения T_n — промежуток времени между моментом внезапного возникновения отключающего дифференциального тока и моментом гашения дуги на всех полюсах.

Стандартные значения максимально допустимого времени отключения УЗО типа АС при любом номинальном токе нагрузки и заданных нормами значениях дифференциального тока не должны превышать приведенных в таблице 10.2.

Максимальное время отключения, установленное в таблице, распространяется также на УЗО типа А.

Стандартные значения допустимого времени отключения и неотключения для УЗО типа S при любом номинальном токе нагрузки свыше 25А и значениях номинального дифференциального тока (уставки) свыше 0,03 А

не должны превышать приведенных в таблице 10.3.

Таблица 10.2

Нормы значения дифференциального тока

Время отключения T_n , сек			
$I\Delta_n$	$2 I\Delta_n$	$5 I\Delta_n$	500 А
0,3	0,15	0,04	0,04

Таблица 10.3

Стандартные значения допустимого времени отключения

Дифференциальный ток	$I\Delta_n$	$2 I\Delta_n$	$5 I\Delta_n$	500 А
Максимальное время отключения	0,5	0,2	0,15	0,15
Минимальное время неотключения	0,13	0,06	0,05	0,04

Выбор УЗО.

Номинальный отключающий дифференциальный ток УЗО (уставка) $I\Delta n$ должен не менее чем в три раза превышать суммарный ток утечки защищаемой цепи электроустановки – $I\Delta$:

$$I\Delta_n \geq 3 I\Delta$$

Суммарный ток утечки электроустановки замеряется специальными приборами, либо определяется расчетным путем.

При отсутствии фактических (замеренных) значений тока утечки в электроустановке ПУЭ (п. 7.1.83) предписывают принимать ток утечки электроприемников из расчета – 0,4 мА на 1 А тока нагрузки, а ток утечки цепи из расчета – 10 мкА на 1 м длины фазного проводника.

Рекомендуемые значения номинального отключающего дифференциального тока – $I\Delta n$ (уставки) УЗО для диапазона номинальных токов 16 – 80 А приведены в таблице 10.4.

Таблица 10.4

Номинальный ток в зоне защиты, А	16	25	40	63	80
$I\Delta n$ при работе в зоне защиты одиночного потребителя, мА	10	30	30	30	100
$I\Delta n$ при работе в зоне защиты группы потребителей, мА	30	30	30(100)	100	300
$I\Delta n$ УЗО противопожарного назначения на ВРУ (ВРЩ), мА	300	300	300	300	500

В некоторых случаях, для определенных потребителей значение уставки задается нормативными документами. Например, для зданий из металла или с металлическим каркасом задается значение уставки УЗО не выше 30 мА.

10.5 Первая помощь при электротравме

Признаки поражения электрическим током

1. Рядом находятся оголенные электропровода.
2. Есть раны на теле. Электродуга оставляет более глубокие отметины на коже.
3. Пульс и дыхание прерывистые.
4. Кожные покровы имеют синеватый оттенок.
5. Мышцы напряжены. Вследствие удара током происходит нагрев тканей и сокращение всех групп мышц.
6. Последствия электроудара: потеря сознания, головокружение, галлюцинации, спазм голосовых связок, судороги, остановка сердца.

Алгоритм действия

1. Пострадавшего необходимо быстро освободить от воздействия электрического тока, отключив ток, или отделив человека от контакта с источником тока (проводом) с помощью изолирующего предмета (сухая одежда, палка и т.д.). При напряжении более 1000 В пользоваться только изолирующими средствами.
2. Оценить состояние больного. Оказать первую доврачебную помощь. Необходимо поместить на твердую поверхность, обеспечить покой, кожу вокруг ожогов смазать йодом 5% или марганцовкой, наложить чистую сухую повязку поверх ожогов. Нужно дать болеутоляющий препарат Анальгин или Аспирин, несколько (25-30) капель валерьянки, разведенной в воде. Если человек в обмороке, но пульс прощупывается в районе сонной артерии, то первая помощь при электротравме выполняется до приезда врачей. Нужно освободить от сдавливающей одежды, привести в сознание нашатырным спиртом, согреть.

3. Вызвать врача.

Литература дополнительная

1. ГОСТ Р 12.1.009—2009 «ССТБ. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ. Термины и определения».
2. ПУЭ (правила устройства электроустановок, 7 издание, редакция от 2010 г).
3. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) (утв. приказом Минэнерго РФ от 13 января 2003 г. N 6).
5. ГОСТ ИЕС 60050-441—2015. Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители
6. Монаков В.К. УЗО. Теория и практика. – М.: Энергосервис, 2007г. – 368 с.