

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. В. Гурин**

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Республики Беларусь  
по образованию в области сельского хозяйства в качестве  
учебно-методического пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по специальностям 1-74 06 05-01  
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства  
(электроэнергетика), 1-53 01 01-09 Автоматизация  
технологических процессов и производств (сельское хозяйство)*

**В двух частях**

**Часть 1**

**ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Минск  
БГАТУ  
2010

УДК 621.316.9(07)  
ББК 31.27-05я7  
А22

Рецензенты:

кандидат технических наук,  
профессор кафедры электроснабжения БГАТУ *Г. И. Янукович*;  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Автоматизация производственных процессов  
и электротехники» БГТУ *Л. М. Давидович*;  
заведующий лабораторией  
РУП «Белорусский теплоэнергетический институт»,  
доктор технических наук, профессор *Е. П. Забелло*

**Гурин В. В.**

А22 Автоматическая защита электрооборудования. В 2 ч.  
Ч. 1. Защита электрических цепей : учебно-методическое  
пособие / В. В. Гурин. – Минск : БГАТУ, 2010. – 360 с.  
ISBN 978-985-519-287-0.

В учебно-методическом пособии рассмотрены сверхтоки во внутренних электрических сетях зданий и сооружений и защита электрических цепей от сверхтоков с помощью плавких предохранителей и автоматических воздушных выключателей, защита электрооборудования зданий и сооружений от перенапряжений и опасных токов утечки.

Предназначено для студентов вузов и ССУЗов специальностей 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика) и 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство). Будет полезно инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области исследования, проектирования и эксплуатации устройств защиты электрооборудования.

УДК 621.316.9(07)  
ББК 31.27-05я7

ISBN 978-985-519-287-0 (ч. 1)  
ISBN 978-985-519-288-7

© БГАТУ, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	6
Введение .....	7

### Глава 1. СВЕРХТОКИ И ЗАЩИТА ПРОВОДНИКОВ ОТ СВЕРХТОКОВ

1.1. Сверхтоки. Понятия и определения .....	9
1.2. Схемы электрических сетей 0,4 кВ и токи короткого замыкания .....	13
1.3. Общие вопросы расчета токов короткого замыкания во внутренних сетях зданий и сооружений .....	18
1.4. Расчет начального действующего значения периодической составляющей трехфазного и однофазного токов короткого замыкания .....	20
1.5. Расчет сопротивлений в цепи токов короткого замыкания .....	21
1.6. Расчетные схемы цепи токов короткого замыкания .....	34
1.7. Схемы замещения цепи токов короткого замыкания .....	38
1.8. Защита проводников от токов перегрузки .....	41
1.9. Защита проводников от токов короткого замыкания .....	46
1.10. Координация характеристик устройств защиты и проводников .....	49
1.11. Контрольные вопросы и задания .....	52

### Глава 2. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И ЗАЩИТА С ИХ ПОМОЩЬЮ ОТ СВЕРХТОКОВ

2.1. Общие сведения и требования к предохранителям .....	55
2.2. Нагрев и работа плавких предохранителей при рабочем токе и сверхтоке .....	58
2.3. Характеристики плавких предохранителей .....	66
2.4. Конструкции плавких предохранителей, их плавких элементов и характеристика наполнителей .....	77
2.5. Классификация предохранителей .....	86
2.6. Развитие и совершенствование плавких предохранителей .....	89
2.7. Общие вопросы выбора плавких предохранителей .....	97
2.8. Выбор номинального тока плавкой вставки предохранителя .....	100
2.9. Проверка выбранного предохранителя .....	106
2.10. Выбор быстродействующих плавких предохранителей защиты полупроводниковых приборов .....	111
2.11. Согласование характеристик термической стойкости электрооборудования и защитных характеристик плавких предохранителей .....	116
2.12. Эксплуатация плавких предохранителей .....	121
2.13. Контрольные вопросы и задания .....	128

### Глава 3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ЗАЩИТА С ИХ ПОМОЩЬЮ ОТ СВЕРХТОКОВ

3.1. Общие сведения и требования к автоматическим выключателям .....	131
3.2. Принцип действия автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем максимального тока .....	133
3.3. Условия существования и гашения дуги в автоматических выключателях .....	135
3.4. Эрозия и дуговой износ контактов автоматических выключателей .....	148
3.5. Основные элементы автоматических выключателей общего назначения .....	153
3.6. Расцепители автоматических выключателей .....	156
3.7. Развитие и совершенствование автоматических выключателей .....	169
3.8. Параметры и характеристики автоматических выключателей .....	185
3.9. Выбор автоматических выключателей .....	190
3.10. Проверка автоматических выключателей при выборе .....	198
3.11. Эксплуатация автоматических выключателей .....	207
3.12. Контрольные вопросы и задания .....	210

### Глава 4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

4.1. Общие сведения о перенапряжениях .....	213
4.2. Средства защиты электрической воздушной сети 0,4 кВ от импульсных перенапряжений .....	218
4.3. Средства защиты электроустановок зданий и сооружений от импульсных перенапряжений .....	228
4.4. Стойкость изоляции электрооборудования к импульсным перенапряжениям и классы УЗИП .....	235
4.5. Основные параметры и характеристики УЗИП .....	239
4.6. Принципиальные электрические схемы включения УЗИП .....	243
4.7. Применение и выбор УЗИП .....	253
4.8. Применение плавких предохранителей для защиты УЗИП .....	260
4.9. Требования к установке и монтажу УЗИП .....	262
4.10. Проверка и диагностика УЗИП при эксплуатации .....	264
4.11. Защита электрооборудования от временных перенапряжений .....	267
4.12. Контрольные вопросы и задания .....	274

### Глава 5. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ ОПАСНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ

5.1. Общие сведения об электро- и пожаробезопасности .....	277
5.2. Типы устройств защитного отключения по контролируемым параметрам .....	281

5.3. Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током .....	284
5.4. Параметры устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током .....	297
5.5. Маркировка устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током .....	303
5.6. Выбор устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током .....	304
5.7. Описание устройств защитного отключения .....	311
5.8. Применение устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током в различных системах заземления .....	332
5.9. Монтаж и эксплуатация устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током .....	342
5.10. Контрольные вопросы и задания .....	352
Список использованной литературы .....	355

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие электрооборудования и автоматического управления машинами и установками потребовало систематизировать и выделить вопросы автоматической защиты электрооборудования в отдельную дисциплину – «Автоматическую защиту электрооборудования».

Учебно-методическое пособие «Автоматическая защита электрооборудования» состоит из двух частей: «Защита электрических цепей» (часть 1) и «Защита трехфазных асинхронных электродвигателей» (часть 2). Учебно-методическое пособие написано в соответствии с учебной программой указанной выше дисциплины.

В первой части изложены сверхтоки, особенности токов короткого замыкания (КЗ) и их расчет во внутренних электрических сетях зданий и сооружений, защита проводников и электрооборудования от сверхтоков с помощью предохранителей и автоматических выключателей. Также рассмотрены перенапряжения и средства защиты от них в электроустановках зданий и сооружений, токи утечки и способы защиты от опасных токов утечки в электроустановках зданий и сооружений.

Во второй части приведена характеристика объекта защиты – асинхронного трехфазного электродвигателя, защита асинхронных трехфазных электродвигателей в неполнофазном режиме работы, при технологических перегрузках, температурная защита, защита от увлажнения обмоток, комплексные защиты электродвигателей, а также технико-экономическое обоснование выбора защиты асинхронных трехфазных электродвигателей.

Теоретический материал каждой главы заканчивается контрольными вопросами и заданиями. Перечень литературы является общим для всех глав.

Автор выражает благодарность рецензентам – профессору Г. И. Януковичу, доценту Л. М. Давидовичу, профессору Е. П. Забелло – за ценные замечания, способствовавшие улучшению учебно-методического пособия, а также аспиранту П. А. Равинскому за подготовку рисунков.

## ВВЕДЕНИЕ

К электрифицированным и автоматизированным рабочим машинам предъявляются повышенные требования по надежности. Эти требования обусловлены экономическими ущербами, наносимыми производству низкой надежностью электрооборудования. Проблема обеспечения высокого уровня надежности технических систем относится к числу важнейших инженерных проблем. Повысить надежность работы электрооборудования можно при грамотном выборе аппаратов защиты электрооборудования в аварийных состояниях.

Назначение автоматической защиты электрооборудования состоит в предотвращении выхода из строя электрооборудования в случае возникновения аварийного состояния или режима работы.

Автоматическая защита повышает эксплуатационную надежность работы установки и обеспечивает ресурсосбережение, предотвращая выход электрооборудования из строя.

Объектом автоматической защиты является электрооборудование зданий и сооружений.

Известно, что в сетях 0,4 кВ к потребителям электрическая энергия поступает от трансформаторной подстанции (ТП) по воздушным линиям или кабельным линиям сначала до вводно-распределительного устройства (ВРУ) здания, потом по кабельным линиям – к распределительным пунктам (РП), а от РП – к низковольтным комплектным устройствам (НКУ). От НКУ по кабельным линиям электрическая энергия поступает к потребителю.

Сеть 10 кВ и участок сети от ТП до ВРУ относятся к внешним электрическим сетям (по отношению к зданию), а от ВРУ до потребителя – к внутренним электрическим сетям зданий и сооружений. Во внешних сетях действует релейная защита ТП и линий, а во внутренних – автоматическая защита электрооборудования в аварийных состояниях. Так условно делится сфера влияния защит.

Действие автоматической защиты электрооборудования распространяется на внутренние электрические сети зданий и сооружений.

В электрооборудовании любой правильно сконструированной установки должно быть 5 частей: 1) силовая; 2) управления; 3) защиты; 4) измерения; 5) сигнализации.

Полный состав электрической части установки определяет ее принципиальная электрическая схема. В этой схеме, аналогично названным выше частям, должны быть соответствующие

электрические цепи и аппараты. Цепи защиты должны включать устройства защиты. НКУ могут не иметь измерительных приборов или сигнальной аппаратуры, но защитные аппараты обязательно должны быть и обеспечивать безопасное обслуживание установки. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) запрещают использовать электрооборудование установок без защитных устройств.

Для каждого вида электрооборудования характерны свои отказы и свои аварийные режимы. В то же время в любом электрооборудовании возможны сверхтоки, токи утечки, перенапряжения. Защита от указанных параметров является общей для всего электрооборудования. Некоторые виды электрооборудования, например, асинхронные трехфазные электродвигатели, требуют других видов защиты.

Надежность работы электрооборудования увеличивается при использовании аппаратов защиты. Простой рост их количества важен, но он не обеспечивает качественного изменения сложившейся ситуации. Необходимо непрерывное совершенствование защитных устройств на основе глубокого изучения физики аварийных состояний, параметров электрооборудования, умения применять современную электронную базу и программные средства для построения эффективных устройств защиты с функциями управления и передачи данных.

# Глава 1. СВЕРХТОКИ И ЗАЩИТА ПРОВОДНИКОВ ОТ СВЕРХТОКОВ

## 1.1. Сверхтоки. Понятия и определения

Под *сверхтоком* понимается ток, значение которого превосходит наибольшее рабочее значение тока электроустановки [1]. Сверхтоками являются токи перегрузки и токи КЗ.

*Ток перегрузки* – сверхток в электрической цепи электроустановки при отсутствии повреждений, по величине превышающий номинальный ток электроустановки.

*Ток повреждения* – ток, который появляется в результате повреждения или перекрытия изоляции. Повреждение изоляции приводит к утечке тока, а перекрытие изоляции – к короткому замыканию.

*Замыкание* – всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановок между собой или с землей [2].

*Короткое замыкание* – замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

*Ток КЗ* – сверхток, обусловленный повреждением с пренебрежимо малым полным сопротивлением между точками, находящимися под разными потенциалами в нормальных рабочих условиях [1]. Ток КЗ в десятки-сотни раз больше рабочего тока цепи.

Токи КЗ опасны своими электродинамическими и термическими воздействиями.

*Электродинамическое действие тока КЗ* – механическое действие электродинамических сил, обусловленных током короткого замыкания на элементы электроустановки [2].

При токах в десятки-сотни ампер электродинамическая сила взаимодействия между двумя проводниками невелика. Но при токах в тысячи и десятки тысяч ампер эта сила достигает большой величины и может разрушить изоляционные и другие конструкции, на которых крепятся проводящие части, разомкнуть контакты, отчего они выгорают. Электродинамические силы действуют мгновенно, и максимум их имеет место при ударных токах КЗ.

*Термическое действие тока КЗ* – тепловое действие тока КЗ, вызывающее изменение температуры элементов электроустановки [2].

Термическое действие тока КЗ проявляется в нагреве проводников и аппаратов за время короткого замыкания, отчего выгорает изоляция и может возникнуть пожар в электроустановке.

Напряжение в сети при КЗ резко снижается, а в момент прекращения тока КЗ может наблюдаться всплеск перенапряжения из-за индуктивностей в цепи КЗ.

Причины возникновения КЗ в трехфазных сетях с глухозаземленной нейтралью: 1) пробой или перекрытие изоляции между фазами; 2) обрыв фазного провода на землю или заземленное оборудование; 3) сближение проводов воздушной линии; 4) механическое повреждение проводов или жил кабеля с замыканием их между собой; 5) ошибочная сборка электрической схемы и т. д.

Основными видами КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью являются:

1) трехфазное (5 % всех КЗ). Трехфазное КЗ – короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе;

2) двухфазное (10 %). Двухфазное КЗ – короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе;

3) двухфазное на землю (10 %). Двухфазное КЗ на землю – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с эффективно или глухозаземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы;

4) однофазное на землю (75 %). Однофазное КЗ – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с эффективно или глухозаземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.

Наибольшие токи возникают при трехфазных КЗ, наименьшие – при однофазных КЗ.

Возникновение КЗ в цепи сопровождается переходным процессом, который заканчивается установившимся режимом (рисунок 1.1). Переходный процесс в электроустановке – процесс перехода от одного установившегося режима электроустановки к другому.

В токе КЗ различают периодическую  $i_{nt}$  составляющую тока и аperiodическую  $i_{at}$  составляющую тока, затухающую по закону экспоненты. В сумме они дают общий ток КЗ, изменяющийся во времени.

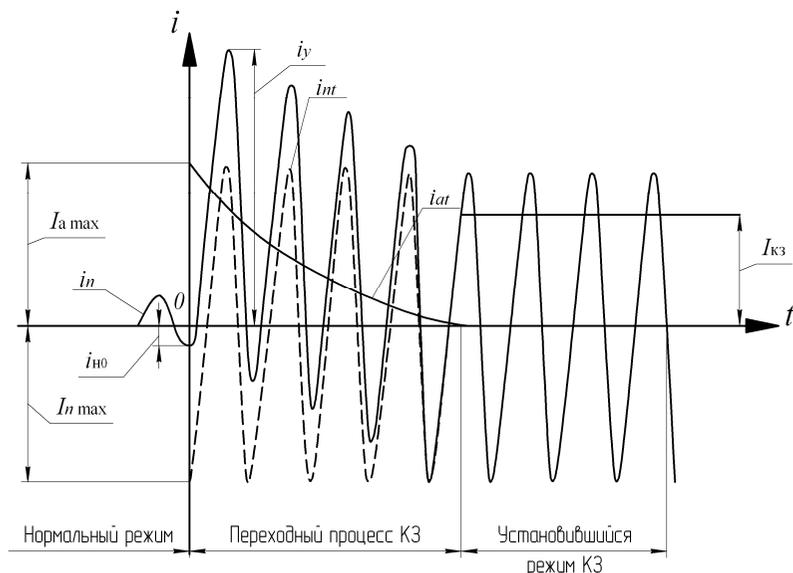


Рисунок 1.1 – Изменение тока при КЗ:

$i_{n0}$  – мгновенное значение тока нагрузки в момент КЗ;  $i_y$  – мгновенное значение ударного тока КЗ через полпериода (0,01 с) после возникновения КЗ;  $I_{a \max}$  и  $i_{at}$  – максимальное и текущее значения апериодической слагающей тока КЗ соответственно;  $I_{n \max}$  и  $i_{nt}$  – максимальное и текущее значения периодической слагающей тока КЗ соответственно;  $I_{K3}$  – действующее значение установившегося тока КЗ

*Апериодическая составляющая тока КЗ* – свободная составляющая тока КЗ, изменяющаяся во времени без перемены знака [2].

*Периодическая составляющая тока КЗ рабочей частоты* – составляющая тока КЗ, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

Наибольшее возможное мгновенное значение тока КЗ называется *ударным током*  $i_y$ . Он действует в первый полупериод сетевого напряжения. По величине ударный ток КЗ составляет до 1,9 установившегося тока на шинах электростанций и подстанций и примерно 1,1–1,3 установившегося тока на вводно-распределительном устройстве здания.

В низковольтных внутренних сетях 0,4 кВ, имеющих значительное электрическое сопротивление, переходной процесс быстро затухает, и им можно пренебречь. Следовательно, ударный ток во внутренних сетях зданий и сооружений не проявляется.

Большинство КЗ в сетях 0,4 кВ происходит через электрическую дугу в месте повреждения. При больших токах КЗ электродинамические силы достигают такой величины, что прикоснувшиеся между собой проводники тут же отталкиваются друг от друга и образуется электрическая дуга, которая выплавляет место соединения и ограничивает ток КЗ. Например, в [3] приведены данные опытного определения токов КЗ трансформатора мощностью 2500 кВА. Максимальный ток трехфазного КЗ ( $I_{K3}^{(3)} = 58$  кА) получен при установке между шинами фаз толстой неплавящейся медной перемычки. При установке плавящихся перемычек сечением 6–25 мм<sup>2</sup> ток составил  $(0,60–0,87) I_{K3}^{(3)}$ , вставки перегорали, возникла дуга. При свободно установленном на шины медном бруске ток КЗ составил  $0,56 I_{K3}^{(3)}$ , брусок сбрасывался с шин. При перекрытии по изоляции ток КЗ уменьшался до  $(0,362–0,560) I_{K3}^{(3)}$  (минимальное значение – 18,6 кА).

Таким образом, в [3] экспериментально доказано, что переходное сопротивление  $R_d$  дуги в месте КЗ существенно уменьшает токи КЗ. По результатам опытов определено, что это сопротивление  $R_d = 0,015$  Ом или  $R_d = 15$  мОм. В [2] и [4] показано, что для других условий  $R_d$  находится расчетным путем.

*Установившийся ток КЗ* – значение тока КЗ после окончания переходного процесса, характеризуемого затуханием всех свободных составляющих этого тока и прекращением изменения тока от воздействия устройств автоматического регулирования возбуждения источников энергии [2].

*Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания* – условная величина, равная двойной амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени, уменьшенной в  $2\sqrt{2}$  раз [2]. По сути, начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ равно действующему значению установившегося тока КЗ, указанному на рисунке 1.1, если не учитывать изменение тока во времени из-за действия сопротивления дуги и изменяющегося сопротивления кабелей и других элементов схемы под действием нагрева токами КЗ. По этой причине справедливо считается, что ток КЗ изменяется во времени и необходимо вычислять его начальное действующее значение и конечное в момент отключения тока

КЗ [4]. Конечное действующее значение тока КЗ меньше начального действующего значения.

Различают удаленное и близкое КЗ. *Удаленное КЗ* – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и произвольный моменты времени практически одинаковы [2].

*Близкое КЗ* – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и произвольный моменты времени существенно отличаются. В отечественной и зарубежной практике КЗ принято считать близкими, если их отношение равно двум или больше двух.

Электрооборудование выбирается по параметрам продолжительного режима и проверяется по параметрам кратковременных режимов, определяющим из которых является режим КЗ.

По режиму КЗ электрооборудование проверяется на электродинамическую и термическую стойкость, а коммутационные аппараты – так же на коммутационную способность.

При проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость и на коммутационную способность расчетным видом КЗ является, как правило, трехфазное КЗ.

При проверке аппаратов защиты на чувствительность и селективность расчетным видом КЗ является однофазное КЗ.

## 1.2. Схемы электрических сетей 0,4 кВ и токи короткого замыкания

Можно выделить несколько особенностей построения схем электрических сетей 0,4 кВ в сельскохозяйственном производстве:

- 1) территориальная разбросанность объектов электрификации;
- 2) большое количество маломощных и неответственных потребителей;
- 3) сочетание линий электроснабжения удаленных объектов с питанием установок наружного освещения;
- 4) небольшая, по сравнению с промышленными объектами, мощность питающих трансформаторов.

В последнее время в связи со строительством объектов переработки сельскохозяйственной продукции и объектов промышленно-

го типа мощность питающих трансформаторов в сельскохозяйственном производстве увеличивается. Но главное, трансформаторные подстанции (ТП) в этом случае строятся закрытые, максимально приближенные к потребителям. Все отходящие линии в этом случае кабельные и имеют небольшую длину. Это существенно сказывается на величине токов КЗ (они значительны) и надежности защиты (надежность отключения токов КЗ увеличивается).

Различают магистральные, радиальные и смешанные схемы электрических сетей (рисунок 1.2).

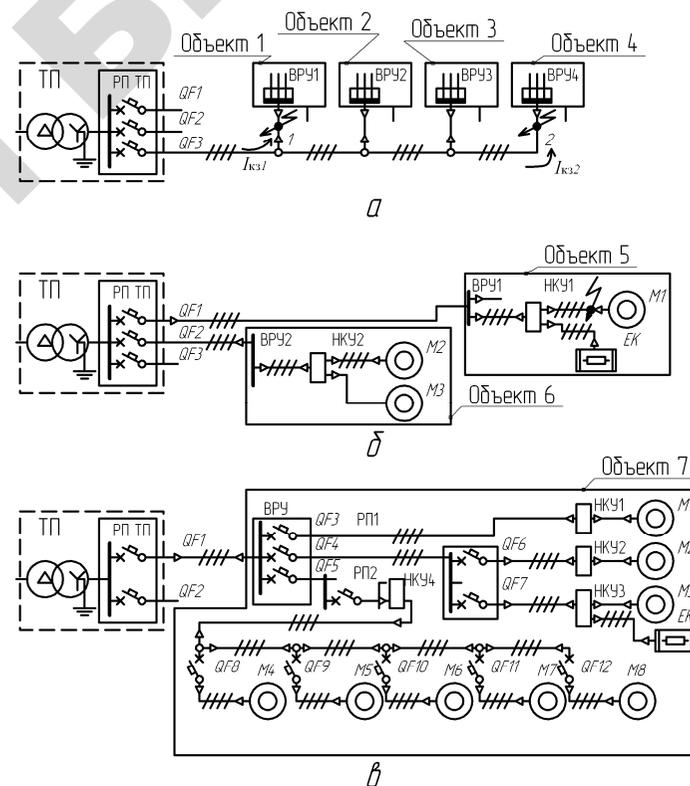


Рисунок 1.2 – Магистральная (а), радиальная (б) и смешанная (в) схемы электрической сети:

ВРУ – вводно-распределительное устройство, РП – распределительный пункт; НКУ – низковольтное комплектное устройство; М – асинхронный двигатель; ЕК – электронагреватель; ТП – трансформаторная подстанция; QF – автоматический воздушный выключатель

Питающая сеть *магистрального типа* отличается тем, что от нее, по ходу прокладки, получают питание объекты №1–№4 (рисунок 1.2, а). Обычно эта сеть в воздушных линиях 0,4 кВ выполняется неизолированными (или изолированными) проводами на опорах с одновременным подключением светильников наружного освещения к отдельному проводнику, а внутри зданий и сооружений – кабелем до первого потребителя, от него кабелем до второго потребителя и так далее (рисунок 1.2, в, подключение М4–М8).

В магистральных схемах электрические приемники оказываются в разных условиях электроснабжения. Подключенные в начале линии (магистрала) потребители имеют большее напряжение на зажимах, чем удаленные потребители, и меньшее сопротивление проводников до трансформатора. В связи с этим расположенные близко к ТП потребители имеют ток КЗ больший, чем удаленные потребители (на конце магистрали, например,  $I_{КЗ1} > I_{КЗ2}$ , рисунок 1.2).

Магистральные линии электроснабжения пригодны для объектов малой мощности и неответственных потребителей, или при питании однопотребителей от одного управляющего устройства.

*Радиальные схемы* питающей сети соединяют ТП с отдельным объектом на конце линии (рисунок 1.2, б).

В зданиях и сооружениях по радиальным схемам выполняется распределительная сеть (от ВРУ до РП или щитков) или групповые сети к отдельным потребителям на конце линии. Эти линии обычно выполняются кабелями.

Радиальные схемы применяются для объектов большой или средней мощности. В радиальных питающих сетях обеспечивается значительный ток КЗ и надежное отключение тока КЗ. В радиальных сетях внутри объекта токи КЗ меньше, чем в питающих сетях. В радиальных схемах требуется обеспечить селективность (избирательность) отключения тока КЗ в групповой и распределительной сети.

Внутри зданий и сооружений обычно строятся *смешанные электрические схемы*, включающие как радиальные, так и магистральные (рисунок 1.2, в). От ВРУ радиальные линии распределительной сети подсоединяют вторичные распределительные пункты РП1 и РП2, а от них по групповым сетям подключаются низковольтные комплектные устройства (НКУ) и отдельные потребители или агрегаты. Здесь встречаются магистральные схемы электроснабжения для однопотребителей и маломощных потребителей. Например, от

НКУ4 типа «Климат 4» по магистральной линии получают питание все маломощные вентиляторы объекта (М4–М8).

В смешанных электрических схемах зданий и сооружений токи КЗ максимальны на ВРУ, на РП и по мере удаления от ВРУ быстро уменьшаются.

Таким образом, схема электрической сети оказывает существенное влияние на величину тока КЗ: 1) во внешних питающих радиальных сетях они максимальные; 2) во внешних питающих магистральных сетях они максимальны у ближайшего к ТП объекта; 3) во внутренних сетях зданий они максимальны на ВРУ, на РП1 и РП2, меньше – у НКУ и потребителей (М1–М3) и самые минимальные – у самого удаленного от ВРУ потребителя, т.е. у М8 (рисунок 1.2, в).

Величина тока КЗ зависит от: 1) мощности питающего трансформатора; 2) электрического сопротивления проводников (кабелей) до места КЗ; 3) отношения индуктивных сопротивлений питающей энергосистемы ( $X_c$ ) и трансформатора ( $X_T$ ), т.е. от  $X_c/X_T$ ; 4) учета переходного сопротивления  $R_d$  дуги; 5) учета сопротивления всех элементов расчетной схемы.

На рисунке 1.3, а показана зависимость величины трехфазного тока КЗ на шинах ТП от мощности питающего трансформатора [5].

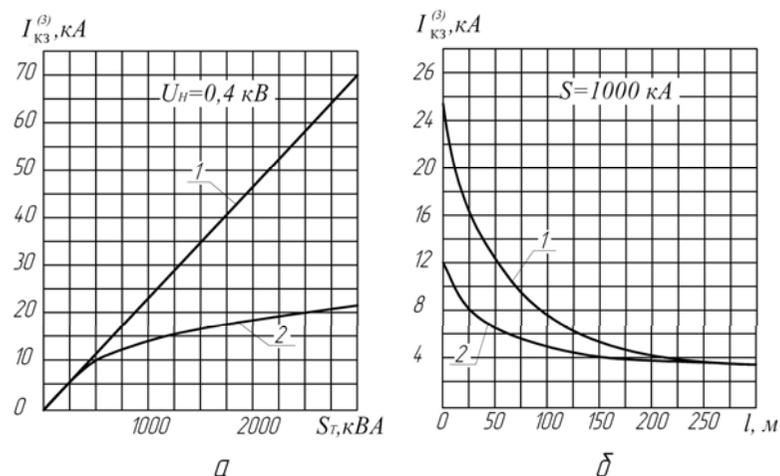


Рисунок 1.3 – Изменение токов КЗ на шинах 0,4 кВ от мощности трансформатора (а) и от длины линии, выполненной кабелем  $3 \times 150 \text{ мм}^2$  (б):  
1 – ток металлического КЗ  $I_{КЗ}^{(3)}$ ; 2 – ток  $I_{КЗ R}^{(3)}$  с учетом переходного сопротивления дуги

Из рисунка 1.3, а следует, что ток трехфазного металлического КЗ  $I_{КЗ}^{(3)}$  не превышает 60 кА при мощности трансформатора 2500 кВА. Но такие трансформаторы на сельскохозяйственных объектах встречаются редко. Обычно работают трансформаторы мощностью до 630 кВА. При этом ток  $I_{КЗ}^{(3)}$  металлического КЗ не превышает 15 кА, а с учетом переходного сопротивления дуги – 10 кА.

Из рисунка 1.3, а следует, что заметное влияние на ток КЗ на шинах ТП имеет переходное сопротивление дуги  $R_d$  при мощности трансформатора более 250 кВА. Чем больше мощность трансформатора, тем заметнее влияние  $R_d$ .

По мере удаления точки КЗ от шин 0,4 кВ ТП ток КЗ заметно снижается, а влияние переходного сопротивления  $R_d$  дуги уменьшается (рисунок 1.3, б). Если на шинах 0,4 кВ ТП мощностью 1000 кВА ток  $I_{КЗ}^{(3)}$  составляет 25 кА, то с учетом  $R_d$  он уменьшается до  $I_{КЗ R}^{(3)} = 12$  кА [5]. Через 100 м кабельной линии  $3 \times 150$  мм<sup>2</sup> ток уменьшается до  $I_{КЗ}^{(3)} = 7,2$  кА, а с учетом  $R_d$  – до  $I_{КЗ R}^{(3)} = 5,3$  кА, т.е. уменьшается больше чем в 2 раза. Через 200 м разница между токами  $I_{КЗ}^{(3)}$  и  $I_{КЗ R}^{(3)}$  составляет менее 20 %. Через 300 м максимальный ток КЗ снижается до 3 кА.

Учет электрической дуги в месте КЗ рекомендуется производить введением в расчетную схему активного сопротивления дуги  $R_d$ , которое определяется на базе вероятностных характеристик влияния устойчивой дуги на ток КЗ [4].

В [4] показано, что сначала определяется среднестатистическое значение поправочного коэффициента, учитывающего снижение тока в начальный момент дугового КЗ по сравнению с током металлического КЗ, а потом с его учетом и с учетом суммарных индуктивных и активных сопротивлений определяется сопротивление дуги  $R_d$ .

В [4] также приведены формулы для расчета  $R_d$  в начальный момент КЗ и в произвольный момент времени горения дуги с учетом увеличения сопротивления кабелей и воздушной линии от нагрева токами КЗ.

Для внутренних сетей зданий и сооружений, имеющих кабели малых сечений и большой длины, учет  $R_d$  имеет малое влияние на ток КЗ.

Особенности схем электрических сетей сельскохозяйственных объектов и токов КЗ рассмотрены выше. Из них вытекают следующие особенности расчета токов КЗ во внутренних сетях зданий и сооружений:

1) ударный ток КЗ в этих сетях не рассчитывается, поскольку аperiodическая составляющая тока КЗ не значительна из-за больших электрических сопротивлений цепи внутренних сетей и быстро затухает;

2) для внутренних сетей зданий и сооружений характерно значительное влияние сопротивлений элементов схемы на значение токов КЗ. Наблюдается быстрое снижение токов КЗ по мере удаления места повреждения от ВРУ;

3) при мощности питающего трансформатора менее 250 кВА переходное сопротивление дуги при расчете тока КЗ можно не учитывать;

4) во внутренних сетях зданий и сооружений не учитывается подпитка тока КЗ от параллельно работающих электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1 % начального значения периодической составляющей тока КЗ, рассчитанного без учета этих электродвигателей или комплексной нагрузки.

Таким образом, величина тока КЗ в электрических сетях пропорциональна мощности питающего трансформатора, обратно пропорциональна электрическому сопротивлению линии до места КЗ и сопротивлению питающей системы, существенно уменьшается от учета переходного сопротивления дуги для трансформаторов мощностью более 250 кВА и для коротких линий. В длинных линиях питания потребителей влияние переходного сопротивления дуги и подпитки тока КЗ от работающих параллельно электродвигателей не существенно.

### 1.3. Общие вопросы расчета токов короткого замыкания во внутренних сетях зданий и сооружений

*Внутренние электрические сети* – это электрические сети от вводно-распределительного устройства объекта до любой электроустановки объекта.

Под *электроустановкой* понимается любое сочетание взаимосвязанного электрооборудования в пределах данного пространства или помещения [1].

Расчет токов КЗ в электроустановках до 1 кВ производится по правилам, утвержденным ГОСТ 28249-93 и руководящими указаниями по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД153-34.0-20.527-98.

При расчетах токов КЗ в электроустановках до 1 кВ необходимо учитывать: 1) индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи; 2) активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи; 3) активные сопротивления различных контактов и контактных соединений [4].

При расчетах токов КЗ допускается: 1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %; 2) максимально упрощать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники энергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ; 3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов.

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуются рассчитывать в именованных единицах. При составлении эквивалентных схем замещения параметры всех сопротивлений исходной расчетной схемы следует выражать в миллиомах [2].

Учитывая дискретный характер изменения параметров электрооборудования, расчет токов КЗ для проверки допускается производить приближенно, с принятием ряда допущений, при этом погрешность расчетов тока КЗ не должна превышать 10 % [4].

Расчет тока КЗ выполняется с целью выбора защитных и коммутационных аппаратов, кабелей, проверки чувствительности защит.

В зависимости от цели расчета вычисляются разные значения токов КЗ. При выборе аппаратов определяют трехфазный максимальный ток КЗ. По максимальному току КЗ проверяется стойкость аппаратов и кабелей к току КЗ, а для аппаратов защиты – надежность отключения максимального тока КЗ.

Для выбора токов уставки защитных аппаратов и проверки их чувствительности и селективности вычисляют минимальный ток однофазного КЗ.

Таким образом, для внутренних сетей предприятий актуальными являются расчеты начального действующего трехфазного (максимального) тока КЗ  $I_{КЗ}^{(3)}$  и начального действующего однофазного

(минимального) тока КЗ  $I_{КЗ}^{(1)}$ . Методы расчета этих токов КЗ рассмотрены ниже.

Что касается расчетов ударного тока КЗ, аperiodической составляющей тока КЗ, двухфазного тока КЗ, тока КЗ в произвольный момент времени, учета влияния асинхронных двигателей и комплексной нагрузки на ток КЗ, то для выбора аппаратов, проводников и проверки чувствительности аппаратов защиты их расчет для внутренних сетей зданий и сооружений не актуален. Методики расчетов токов КЗ для этих случаев приведены в [2] и [4].

#### 1.4. Расчет начального действующего значения периодической составляющей трехфазного и однофазного токов короткого замыкания

Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения: 1) питание от энергосистемы; 2) питание от автономного генератора.

Далее рассмотрена первая методика – питание от энергосистемы, поскольку этот способ питания характерен для большинства сельскохозяйственных потребителей. В случае питания от автономного генератора пользуются методикой, изложенной в [2].

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ ( $I_{КЗ0}^{(3)}$ ) (кА) от энергосистемы без учета подпитки от электродвигателей по [4] следует рассчитывать по формуле

$$I_{КЗ0}^{(3)} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (1.1)$$

где  $U_n$  – номинальное линейное напряжение сети, в которой произошло КЗ, В; рекомендуется принимать  $U_n = 400$  В;

$R_{1\Sigma}, X_{1\Sigma}$  – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ соответственно, МОм.

Если электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от энергосистемы через понижающий трансформатор, то начальное значение периодической состав-

ляющей тока однофазного КЗ от энергосистемы (кА) следует рассчитывать по формуле

$$I_{\text{КЗ}0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{н}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \quad (1.2)$$

где  $R_{1\Sigma}$  и  $X_{1\Sigma}$  – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивление прямой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ соответственно, мОм;

$R_{0\Sigma}$  и  $X_{0\Sigma}$  – суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивление нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ соответственно, мОм.

При необходимости учета активного сопротивления электрической дуги в формулы (1.1) и (1.2) добавляется сопротивление дуги, вследствие чего начальное значение периодической составляющей тока КЗ уменьшается.

### 1.5. Расчет сопротивлений в цепи токов короткого замыкания

В цепи токов короткого замыкания могут быть следующие элементы: 1) питающая энергосистема; 2) питающий трансформатор; 3) шинопровод; 4) трансформаторы тока; 5) воздушные или кабельные линии внешних (по отношению к зданию) сетей; 6) вводно-распределительное устройство с предохранителями или автоматическими выключателями; 7) кабели распределительной и питающей сети зданий и сооружений; 8) низковольтное комплектное устройство с автоматическим выключателем, контактором, тепловым реле; 9) кабель питающий сети; 10) дроссели сетевые; 11) контакты и контактные соединения.

При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих питание от сети энергосистемы, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление системы.

Значение этого сопротивления ( $X_c$ ) (мОм), приведенное к ступени низшего напряжения сети, рассчитывается по формуле

$$X_c = \frac{U_{\text{н}}^2}{S_{\text{к}}} \cdot 10^{-3} = \frac{U_{\text{н}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{КЗ в.н}} U_{\text{в.н}}}, \quad (1.3)$$

где  $U_{\text{н}}$  – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В; в сетях 0,4 кВ  $U_{\text{н}} = 400$  В;

$S_{\text{к}}$  – условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВА;

$U_{\text{в.н}}$  – номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора, В;

$I_{\text{КЗ в.н}}$  – действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА.

При отсутствии указанных данных эквивалентное индуктивное сопротивление системы (мОм) допускается рассчитывать по формуле

$$X_c = \frac{U_{\text{н}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{откл.ном}} U_{\text{в.н}}}, \quad (1.4)$$

где  $I_{\text{откл.ном}}$  – номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора, кА.

Например, при  $U_{\text{в.н}} = 10,5$  кВ,  $I_{\text{откл.ном}} = 11$  кА эквивалентное индуктивное сопротивление на стороне высшего напряжения трансформатора 1600 кВА (таблица 1.1) составит:

$$X_c = \frac{400^2}{\sqrt{3} \cdot 11 \cdot 10500} = 0,8 \text{ мОм.}$$

Питающая энергосистема бесконечной мощности имеет очень малое индуктивное сопротивление, которое обычно принимается нулевым. При более точных расчетах  $X_c$  определяют по формуле (1.3) или (1.4). Приблизительно можно считать, что  $X_c \approx 0,1X_{1Т}$  [5], где  $X_{1Т}$  – индуктивное сопротивление прямой последовательности питающего трансформатора, мОм.

Таблица 1.1 – Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов 10(6)/0,4 кВ [5]

Мощность трансформатора $S_{н.т}$ , кВА	Напряжение КЗ $u_k$ , %	Индуктивное сопротивление прямой и обратной последовательностей $X_{1Г} = X_{2Г}$ , мОм	Активное сопротивление прямой и обратной последовательностей $R_{1Г} = R_{2Г}$ , мОм	Полное сопротивление токам однофазного КЗ $Z_T^{(1)}/3$ , мОм	Индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0Г}$ , мОм	Активное сопротивление нулевой последовательности $R_{0Г}$ , мОм	Схема соединения обмоток трансформатора	
100	4,5	64,7	31,5	260	581,8	253,9	Звезда / звезда с нулем	
160	4,5	41,7	16,6	162	367	150,8		
250	4,5	27,2	9,4	104	234,9	96,5		
400	4,5	17,1	5,5	65	148,7	55,6		
630	5,5	13,6	3,1	43	96,2	30,3		
1000	5,5	8,5	2,0	27	60,6	19,1		
1000	8,0	12,6	2,0	33,6	72,8	19,1		
1600	5,5	4,9	1,3	16,6	37,8	11,9		
100	4,5	66	36,3	75,3	66	36,3		Треугольник / звезда с нулем
160	4,5	43	19,3	47	43	19,3		
250	4,5	27	10,7	30	27	10,7		
400	4,5	17	5,9	18,7	17	5,9		
630	5,5	13,50	3,4	14	13,50	3,4		
1000	5,5	8,60	2,0	9	8,60	2,0		
1000	8,0	12,65	1,9	12,8	12,65	1,9		
1600	5,5	5,40	1,1	5,7	5,40	1,1		

При расчете тока КЗ во внутренних сетях более точное значение  $X_c$  не имеет смысла в связи с малым влиянием этой величины на ток КЗ во внутренних сетях.

*Понижающий трансформатор* характеризуется значениями активных и индуктивных сопротивлений для трехфазных токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, а так же полным сопротивлением  $Z_T^{(1)}/3$  для токов однофазного КЗ. Значения этих сопротивлений приведены в таблице 1.1.

Обратите внимание, что при схеме обмоток «треугольник / звезда с нулем»  $X_{1Г} = X_{2Г} = X_{0Г}$ , а  $R_{1Г} = R_{2Г} = R_{0Г}$ . При схеме соединения обмоток «треугольник / звезда с нулем» полное сопротивление  $Z_T^{(1)}/3$  меньше, чем при схеме «звезда / звезда с нулем» почти в 3 раза. Это означает, что токи однофазного КЗ при схеме «треугольник / звезда с нулем» будут больше, чем при схеме «звезда / звезда с нулем».

Для любого трансформатора его сопротивление (мОм) можно найти по следующим формулам:

$$Z_{1Г} = \frac{10^4 u_k U_{н.т}^2}{S_{н.т}}, \quad (1.5)$$

$$R_{1Г} = \frac{10^6 \Delta P_k U_{н.т}^2}{S_{н.т}^2}, \quad (1.6)$$

$$X_{1Г} = \sqrt{Z_{1Г}^2 - R_{1Г}^2}, \quad (1.7)$$

$$Z_T^{(1)} = \sqrt{(X_{1Г} + X_{2Г} + X_{0Г})^2 + (R_{1Г} + R_{2Г} + R_{0Г})^2}, \quad (1.8)$$

где  $S_{н.т}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$U_{н.т}$  – номинальное линейное напряжение обмоток низкого напряжения, кВ;

$\Delta P_k$  – мощность потерь КЗ в трансформаторе, кВт;

$u_k$  – напряжение КЗ трансформатора, %;

$X_{1Г}, R_{1Г}$  – реактивное и активное сопротивления трансформатора токам прямой последовательности, мОм;

$X_{2Г}, R_{2Г}$  – то же обратной последовательности, мОм;

$X_{0Г}, R_{0Г}$  – то же нулевой последовательности, мОм;

$Z_T^{(1)}$  – полное сопротивление трансформатора токам однофазного КЗ, мОм.

Шинопроводы имеют удельные сопротивления, приведенные в таблице 1.2 [4].

Таблица 1.2 – Параметры комплектных шинопроводов

Тип шинопровода	$U_n$ , кВ	$I_n$ , А	$r_{1уд.ш} = r_{2уд.ш}$ , мОм/м	$x_{1уд.ш} = x_{2уд.ш}$ , мОм/м	$r_{0уд.ш}$ , мОм/м	$x_{0уд.ш}$ , мОм/м
ШРА73	0,38	250	0,210	0,210	0,120	0,210
		400	0,150	0,170	0,162	0,164
		630	0,100	0,130	0,162	0,164
ШМА4–1250	0,38/0,66	1250	0,034	0,016	0,054	0,053
ШМА4–2500		1600	0,030	0,014	0,037	0,042
ШМА4–3200		3200	0,010	0,005	0,064	0,035

Примечания:  
 1. Сопротивления шинопроводов на больший ток приведены в [2].  
 2. Расчетный метод определения сопротивлений приведен в [2].

Сопротивления шинопроводов:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_{уд.ш} L; & x_1 &= x_{уд.ш} L; \\ r_0 &= r_{0уд.ш} L; & x_0 &= x_{0уд.ш} L. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Активные и индуктивные сопротивления прямой ( $R_{1к}$ ,  $X_{1к}$ ), обратной ( $R_{2к}$ ,  $X_{2к}$ ) и нулевой ( $R_{0к}$ ,  $X_{0к}$ ) последовательностей кабелей внешних и внутренних сетей определяют по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X_{1к} &= X_{2к} = X_{уд.к} L_k, \\ R_{1к} &= R_{2к} = R_{уд.к} L_k, \\ X_{0к} &= X_{0уд.к} L_k, \\ R_{0к} &= R_{0уд.к} L_k, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где  $X_{уд.к}$ ,  $R_{уд.к}$ ,  $X_{0уд.к}$ ,  $R_{0уд.к}$  – удельные индуктивное, активное сопротивление кабеля токам прямой и нулевой последовательностей соответственно, мОм (таблицы 1.3, 1.4);

$L_k$  – длина кабеля, м.

Таблица 1.3 – Удельные сопротивления кабеля с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке, мОм/м [4]

Количество жил и их сечение, мм <sup>2</sup>	$R_{1уд.к} = R_{2уд.к}$	$X_{1уд.к} = X_{2уд.к}$	$R_{0уд.к}$	$X_{0уд.к}$
4x2,5	15,384	0,102	19,000	2,450
3x4 + 1x2,5	9,610	0,098	11,710	2,110
3x6 + 1x6	6,410	0,094	8,710	1,968
3x10 + 1x6	3,840	0,088	5,900	1,811
3x16 + 1x10	2,400	0,084	4,390	1,558
3x25 + 1x16	1,540	0,072	3,420	1,258
3x35 + 1x16	1,100	0,068	2,970	1,241
3x50 + 1x25	0,769	0,066	2,449	0,949
3x70 + 1x35	0,549	0,065	2,039	0,741
3x95 + 1x50	0,405	0,064	1,665	0,559
3x120 + 1x50	0,320	0,064	1,540	0,545
3x150 + 1x170	0,256	0,063	1,276	0,430

Примечание – Для кабеля с медными жилами приведенные в таблице значения активных сопротивлений следует уменьшить в 1,7 раза, а для пятижильного кабеля  $X_{0уд.к}$  – увеличить на 10 %.

Таблица 1.4 – Удельные сопротивления кабеля с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке, мОм/м

Количество жил и их сечение, мм <sup>2</sup>	$R_{1уд.к} = R_{2уд.к}$	$X_{1уд.к} = X_{2уд.к}$	$R_{0уд.к}$	$X_{0уд.к}$
3x4 + 1x2,5	9,610	0,098	10,870	0,570
3x6 + 1x4	6,410	0,094	7,600	0,463
3x10 + 1x6	3,840	0,088	4,940	0,400
3x16 + 1x10	2,400	0,084	3,390	0,336
3x25 + 1x16	1,540	0,072	2,410	0,256
3x35 + 1x16	1,100	0,068	1,930	0,232
3x50 + 1x25	0,769	0,066	1,440	0,179
3x70 + 1x35	0,549	0,065	1,110	0,145
3x95 + 1x50	0,405	0,064	0,887	0,124
3x120 + 1x50	0,320	0,064	–	–
3x150 + 1x70	0,256	0,063	–	–
3x185 + 1x70	0,208	0,063	–	–

Примечание – Для других оболочек кабелей данные приведены в [2].

Удельные сопротивления алюминиевых проводов воздушной линии 0,4 кВ приведены в таблицах 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5 – Удельные сопротивления алюминиевых проводов воздушной линии 0,4 кВ токам прямой (обратной) последовательности, мОм/м [4]

Марка провода	$r_{1\text{уд.ВЛ}} = r_{2\text{уд.ВЛ}}$	$x_{1\text{уд.ВЛ}} = x_{2\text{уд.ВЛ}}^*$	Марка провода	$r_{1\text{уд.ВЛ}} = r_{2\text{уд.ВЛ}}^{**}$	$x_{1\text{уд.ВЛ}} = x_{2\text{уд.ВЛ}}$
A-16	1,96	0,333	A-120	0,27	0,292**
A-25	1,27	0,319	A-150	0,21	0,287**
A-35	0,91	0,308	–	–	–
A-50	0,63	0,297	–	–	–
A-70	0,45	0,283	–	–	–
A-95	0,33	0,274	–	–	–

\* При среднеарифметическом расстоянии между проводами 0,4 м.

\*\* При среднеарифметическом расстоянии между проводами 0,6 м.

Таблица 1.6 – Удельные сопротивления алюминиевых проводов воздушной линии 0,4 кВ токам нулевой последовательности без учета заземляющих устройств, мОм/м [4]

Сечение фазного провода, мм <sup>2</sup>	Активное (в числителе) и индуктивное (в знаменателе) сопротивления воздушной линии ( $r_{0\text{уд.ВЛ}}/x_{0\text{уд.ВЛ}}$ ) при сечении нулевого провода, мм <sup>2</sup>				
	16	25	35	50	70
A-16	3,68/0,68	2,28/0,66	–	–	–
A-25	2,98/0,67	1,99/0,65	–	–	–
A-35	–	1,73/0,64	1,70/0,64	–	–
A-50	–	–	1,44/0,63	1,18/0,62	–
A-70	–	–	1,27/0,62	1,01/0,61	0,84/0,60

Для воздушных линий 0,4 кВ определяют отдельно сопротивления для токов прямой и обратной последовательностей и отдельно сопротивления для токов нулевой последовательности с учетом числа заземлений нулевого проводника и коэффициента сезонности.

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности воздушных линий, имеющих нулевой провод с заземлением, зависят от числа заземлений и коэффициента сезонности. Данные, приведенные в таблице 1.6, следует умножать на коэффициенты  $K_R$  и  $K_X$  в зависимости от числа промежуточных заземлений

(рисунок 1.4) и на коэффициент сезонности  $K_{сз}$  (таблица 1.7). Таким образом, по [4]:

$$R_{0\text{ВЛ}} = r_{0\text{уд.ВЛ}} K_R K_X K_{сз} L_{\text{ВЛ}}, \quad (1.11)$$

$$X_{0\text{ВЛ}} = x_{0\text{уд.ВЛ}} K_R K_X K_{сз} L_{\text{ВЛ}},$$

где  $L_{\text{ВЛ}}$  – длина воздушной линии, м.

Таблица 1.7 – Признаки климатических зон и значение сезонного коэффициента  $K_{сз}^*$  [4]

Параметры	Климатические зоны			
	1	2	3	4
1. Климатические признаки зон				
Средняя многолетняя температура (январь), °С	–45...–20	–10...–14	0...–10	0...+15
Средняя многолетняя высшая температура (июль), °С	+16...+18	+18...+22	+22...+24	+24...+26
Продолжительность заморозания вод, сут.	170...190	150	100	0
2. Значения коэффициента $K_{сз}^*$				
Вертикальные электроды длиной 3 м при глубине заложения их вершины 0,7–0,8 м	0,61	0,67	0,77	0,91
То же, при длине электродов 5 м	0,74	0,8	0,87	0,91
То же, при горизонтальных электродах длиной 10 м, при той же глубине заложения	0,18	0,28	0,40	0,67

В соответствие с [4], сезонный коэффициент определяет снижение сопротивления по сравнению с максимальным сопротивлением в сезон промерзания или высыхания.

Вводно-распределительные устройства и распределительные пункты содержат короткие шинопроводы (обычно не учитываются), предохранители, автоматические выключатели.

Активное сопротивление предохранителя (мОм) определяется по формуле

$$R_{\text{пр}} = \frac{1000\Delta P}{I_{\text{н.пл.вст}}^2}, \quad (1.12)$$

где  $\Delta P$  – потери мощности на 1 полюс, Вт;

$I_{\text{н.пл.вст}}$  – номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А.

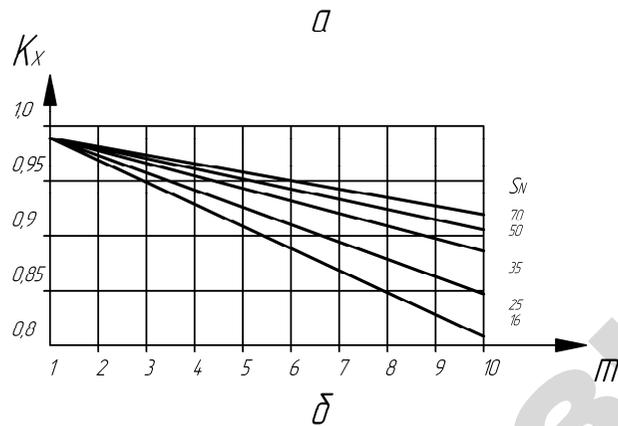
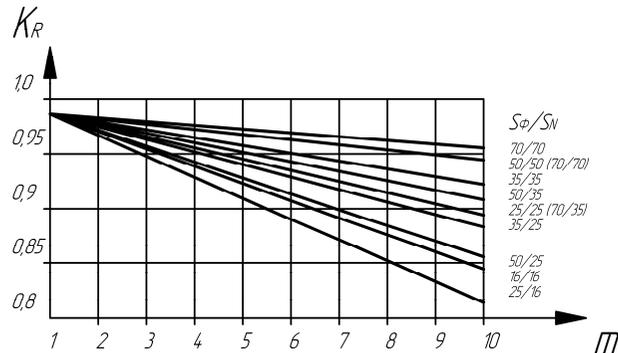


Рисунок 1.4 – Зависимость коэффициента  $K_R$  от числа промежуточных заземлений  $m$  (а) для различных сечений проводов петли (в числителе сечение фазного провода, в знаменателе – нулевого провода) и зависимость коэффициента  $K_X$  от числа промежуточных заземлений  $m$  (б) для различных сечений нулевого провода

Трансформаторы тока имеют сопротивления, приведенные в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Сопротивления первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока [4]

Коэффициент трансформации трансформатора тока	Сопротивление первичной обмотки многовиткового трансформатора, мОм, при классе точности			
	1.0		3.0	
	$X_{1\text{ТР}} = X_{2\text{ТР}} = X_{0\text{ТР}}$	$R_{1\text{ТР}} = R_{2\text{ТР}} = R_{0\text{ТР}}$	$X_{1\text{ТР}} = X_{2\text{ТР}} = X_{0\text{ТР}}$	$R_{1\text{ТР}} = R_{2\text{ТР}} = R_{0\text{ТР}}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

При отсутствии данных изготовителей об индуктивных ( $X_{\text{кв}}$ ) и активных ( $R_{\text{кв}}$ ) сопротивлениях катушек расцепителей и переходных сопротивлениях подвижных контактов автоматических выключателей используются значения сопротивлений, приведенные в таблице 1.9. Эти значения не зависят от типа выключателей [4].

Таблица 1.9 – Сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей серии А3700, «Электрон», ВА [4]

Номинальный ток выключателей, А	Сопротивление катушек и контактов, мОм	
	$R_{1\text{кв}} = R_{2\text{кв}} = R_{0\text{кв}}$	$X_{1\text{кв}} = X_{2\text{кв}} = X_{0\text{кв}}$
50	7	4,5
70	3,5	2,0
100	2,15	1,2
140	1,3	0,7
200	1,1	0,5
400	0,65	0,17
600	0,41	0,13

Примечания:

1. Значения для больших токов приведены в [4].
2. Значения для меньших токов определяют по формуле (1.17) или по данным, приведенным в [2], см. материал далее по тексту.

Активные сопротивления контактов и контактных соединений определяют на основании данных экспериментов или расчетным путем. По данным, приведенным в [4], переходные сопротивления контактных соединений кабелей не превышают 0,085 мОм при сечении жил кабеля 16 мм<sup>2</sup>, контактных соединений шин проводов не более 0,009 мОм при номинальном токе 250 А, разъемных контактов рубильников не более 0,5 мОм при токе 100 А.

При приближенном учете активных сопротивлений контактов по [4] принимают:

$R_k = 0,1$  мОм – для контактных соединений кабелей;

$R_k = 0,01$  мОм – для шин проводов;

$R_k = 1,0$  мОм – для коммутационных аппаратов.

В [3] и [5] совокупно все контактные сопротивления электрической сети оцениваются в 15 мОм.

Кабель распределительной и групповой внутренней электрической сети оказывает наибольшее влияние на ток КЗ (влияние определяется длиной этих кабелей). Сопротивления кабелей определяют по формулам (1.10) с использованием таблиц 1.3 и 1.4.

Низковольтные комплектные устройства имеют автоматические выключатели, контакторы, тепловые реле, трансформаторы тока и другие аппараты в цепи КЗ. В НКУ могут использоваться аппараты на малые токи, имеющие значительное сопротивление току КЗ.

При большой протяженности внутренних сетей с множеством последовательных узлов с контактными соединениями наблюдается заметное влияние их сопротивлений на токи КЗ.

Измерения сопротивлений некоторых низковольтных коммутационных аппаратов с различным номинальным током в производственных условиях показали, что наименьшее сопротивление в силовой цепи имеют рубильники, пакетные выключатели, предохранители. Более высокое сопротивление имеют контакторы и автоматические выключатели. Наибольшее сопротивление имеют электромагнитные пускатели с тепловыми реле [6]. С уменьшением номинального тока аппарата его сопротивление увеличивается и составляет заметную величину. Поскольку контакторы, магнитные пускатели и автоматические выключатели выпускаются на номинальные токи  $\geq 10$  А, то в области малых токов в силовой цепи действуют только предохранители, тепловые реле и расцепители автоматических выключателей. Их сопротивления обязательно учитываются в цепях с токами менее 50 А.

Сопротивление аппаратов силовой цепи незначительно (в пределах 5 %), изменяется от величины тока и времени его протекания [6]. Такими изменениями в инженерных расчетах можно пренебречь.

Расчетные формулы для определения сопротивления силовой цепи аппаратов (мОм) по [6] имеют следующий вид:

магнитные пускатели:

$$\text{при } I_n > 70 \text{ А} \quad R = 825 / I_n; \quad (1.13)$$

$$\text{при } I_n \geq 70 \text{ А} \quad R = 760 / I_n;$$

автоматические выключатели и контакторы:

$$\text{при } I_n < 60 \text{ А} \quad R = 349 / I_n; \quad (1.14)$$

$$\text{при } I_n \geq 60 \text{ А} \quad R = 307 / I_n;$$

предохранители:

$$\text{при } I_n < 200 \text{ А} \quad R = 210 / I_n; \quad (1.15)$$

$$\text{при } I_n \geq 200 \text{ А} \quad R = 125 / I_n;$$

рубильники и пакетные выключатели:

$$R = 68 / I_n. \quad (1.16)$$

Формулами (1.13)–(1.16) следует пользоваться только в крайнем случае, при отсутствии данных о потере мощности в аппарате, указанных в его технических характеристиках. В последнее время в каталогах на электрооборудование приводятся данные о потере мощности на 1 полюс в силовой цепи.

Например, в [7] приведены данные о потере мощности в цепи 1 полюса выключателя – разъединителя ВР32: 3 Вт при  $I_n = 100$  А ( $R = 0,3$  мОм); 15 Вт при  $I_n = 250$  А ( $R = 0,24$  мОм); 35 Вт при  $I_n = 400$  А ( $R = 0,22$  мОм) и 60 Вт при  $I_n = 630$  А ( $R = 0,15$  мОм).

Потери в цепи предохранителей серии ППН (заменяют ПН2 и имеют по сравнению с ним на 30–50 % меньшие потери) приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Потери мощности и сопротивление 1 полюса предохранителя ППН и ПП32 на ток до 250 А

Номинальный ток плавкой вставки, А	Параметры		Номинальный ток плавкой вставки, А	Параметры		Номинальный ток плавкой вставки, А	Параметры		Номинальный ток плавкой вставки, А	Параметры	
	$\Delta P$ , Вт	$R$ , мОм		$\Delta P$ , Вт	$R$ , мОм		$\Delta P$ , Вт	$R$ , мОм		$\Delta P$ , Вт	$R$ , мОм
ППН*			25	2,0	3,20	200	18,6	0,46	63	9	2,27
			32	2,1	2,05	250	22,5	0,36			
			40	3,1	1,93	ПП32**			80	10	1,56
2	0,8	200	50	4,3	1,72	20	2,5	6,25	100	12	1,20
4	1	62,5	63	5,8	1,46	25	3	4,80	125	15	0,96
6	1,2	33,3	80	9,0	1,40	32	4	3,90	160	18	0,70
8	1,4	21,8	100	10,2	1,02	40	5	3,12	200	20	0,50
10	1,6	16,0	125	12,2	0,78	50	7	2,80	250	24	0,39
12	1,7	11,8	160	14,4	0,56						
16	1,8	7,03									

\* Для других марок предохранителей  $R$  (мОм) следует увеличить на 30 % при токе до 40 А и на 20 % при токе >40 А.  
\*\* Имеют повышенные (по сравнению с предохранителями ППН) потери.

Максимальные потери мощности в цепи 1 полюса ящиков Я8601 (заменяют ЯРП) ввода и распределения электроэнергии с выключателем-разъединителем и предохранителями составляют: 13,2 Вт при  $I_n = 100$  А ( $R = 1,92$  мОм); 37,5 Вт при  $I_n = 250$  А ( $R = 0,6$  мОм); 60 Вт при  $I_n = 400$  А ( $R = 0,38$  мОм) и 105 Вт при  $I_n = 630$  А ( $R = 0,26$  мОм).

В [8] приведены потери мощности на 1 полюс современных модульных (1 модуль соответствует 1 фазе и имеет толщину 18 мм) автоматических выключателей ВМ 40. Потери мощности в одном полюсе составляют от 3 до 7,5 Вт при токах расцепителей от 2 до 40 А. Соответственно, сопротивление в цепи тока короткого замыкания этих аппаратов составляет от 750 мОм (при токе 2 А) до 4,68 мОм (при токе 40 А).

В [9] и [10] приведены потери мощности в автоматических выключателях ВА47-29, ВА47-100 и другие данные.

При известной мощности потерь сопротивление  $R$  (мОм) силовой цепи аппарата определяется по формуле

$$R = \frac{1000\Delta P}{I_n^2}, \quad (1.17)$$

где  $\Delta P$  – мощность потерь, Вт;  
 $I_n$  – номинальный ток аппарата, А.

Таблица 1.11 – Сопротивление нагревателей тепловых реле серии РТТ

Номинальный ток нагревательного элемента, А	Сопротивление нагревателей, мОм	Номинальный ток нагревательного элемента, А	Сопротивление нагревателей, мОм
0,20	33 750	6,3	44
0,32	13 651	8,0	28,0
0,4	9062	10	18,5
0,5	5800	12,5	11,8
0,63	3779	16,0	7,4
0,8	2343	20	5,0
1	1500	25	3,36
1,25	992	32	2,16
1,6	605	40	1,59
2,0	400	50	1,18
2,5	256	63	0,91
3,2	156	80	1,04
4,0	100	100	0,67
5,0	66	125	0,42

Из данных таблицы 1.11 следует, что тепловые реле на малые токи имеют значительные электрические сопротивления, превышающие сопротивления других аппаратов НКУ.

Таким образом, активные сопротивления элементов НКУ на малые токи имеют значительные сопротивления и должны обязательно учитываться при расчете токов КЗ во внутренних электрических сетях предприятий.

Активное сопротивление дуги в месте КЗ рекомендуется не учитывать при мощности питающего трансформатора менее 250 кВА. При большей мощности трансформатора уменьшение тока КЗ от действия дуги учитывается через поправочный коэффициент [4].

### 1.6. Расчетные схемы цепи токов короткого замыкания

Расчетная схема составляется из элементов электрической цепи, через которые проходит расчетный ток КЗ. Элементы цепи изображаются в виде условных графических и буквенных обозначений (рисунок 1.5).

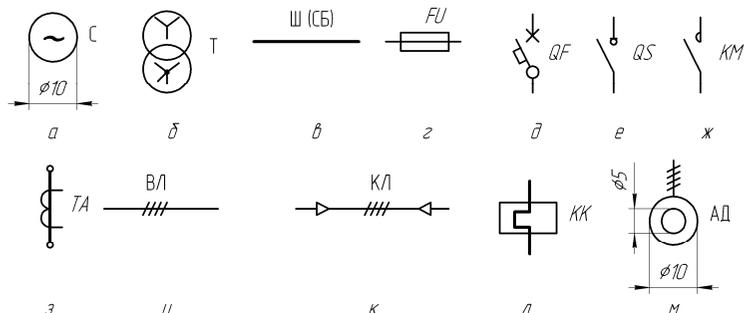


Рисунок 1.5 – Элементы расчетной схемы:

а – система электроснабжения; б – питающий трансформатор;  
 в – силовая шинная сборка; г – предохранитель; д – автоматический выключатель;  
 е – рубильник; ж – контактор; з – трансформатор тока; и – воздушная линия;  
 к – кабельная линия; л – тепловое реле защиты электродвигателя;  
 м – асинхронный электродвигатель (АД или М)

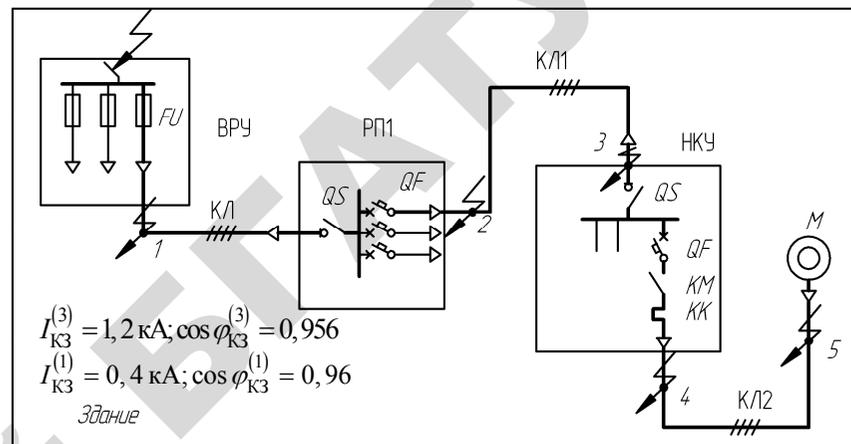


Рисунок 1.7 – Расчетная схема без изображения элементов внешних электрических сетей

Расчетная схема, как правило, включает в себя все элементы электроустановки, влияющие на ток КЗ. Можно не учитывать отдельные элементы электроустановки, если их влияние на ток КЗ вызывает погрешность менее 5–10 % [2].

В качестве примера на рисунке 1.6 изображена расчетная схема электрической сети, предназначенной для включения асинхронного электродвигателя.

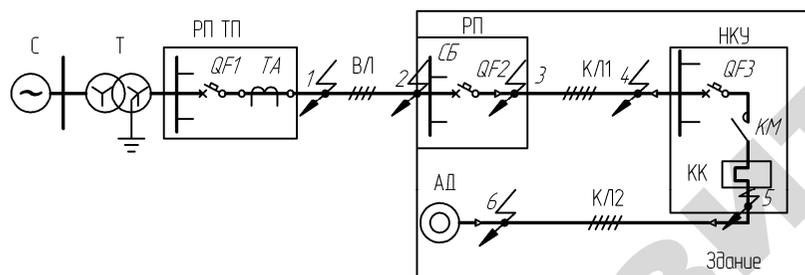


Рисунок 1.6 – Пример расчетной схемы:

РП ТП – распределительное устройство трансформаторной подстанции;  
 РП – распределительный пункт здания;  
 НКУ – низковольтное комплектное устройство

Расчетную схему, подобно рисунку 1.6, с учетом трансформатора, элементов РП ТП и воздушной линии можно не составлять. Эти элементы образуют внешние сети по отношению к объекту. Но тогда на вводе в здание должны быть указаны токи трехфазного и однофазного КЗ и дополнительно коэффициенты мощности токов КЗ (рисунок 1.7).

В этом случае сопротивления внешней сети (мОм) определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 Z_{K3\text{ вн}}^{(3)} &= \frac{1000U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{K3}^{(3)}}; Z_{K3\text{ вн}}^{(1)} = \frac{1000U_{\phi}}{I_{K3}^{(1)}}, \\
 R_{K3\text{ вн}}^{(3)} &= Z_{K3\text{ вн}}^{(3)} \cos \varphi_{\text{к}}^{(3)}; R_{K3\text{ вн}}^{(1)} = Z_{K3\text{ вн}}^{(1)} \cos \varphi_{\text{к}}^{(1)}, \\
 X_{K3\text{ вн}}^{(3)} &= \sqrt{(Z_{K3\text{ вн}}^{(3)})^2 - (R_{K3\text{ вн}}^{(3)})^2}, \\
 X_{K3\text{ вн}}^{(1)} &= \sqrt{(Z_{K3\text{ вн}}^{(1)})^2 - (R_{K3\text{ вн}}^{(1)})^2},
 \end{aligned} \tag{1.18}$$

где  $U_{\text{н}} = 400 \text{ В}$ ;  $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$ ;

$Z_{K3\text{ вн}}^{(3)}$ ,  $Z_{K3\text{ вн}}^{(1)}$  – полные внешние сопротивления токам КЗ для трехфазного и однофазного токов, мОм;

$R_{K3\text{ вн}}^{(3)}$ ,  $R_{K3\text{ вн}}^{(1)}$  – активное внешнее сопротивление для трехфазного и однофазного токов, мОм;

$X_{K3\text{ вн}}^{(3)}$ ,  $X_{K3\text{ вн}}^{(1)}$  – индуктивное внешнее сопротивление для трехфазного и однофазного токов, мОм;

$\cos \varphi_k^{(3)}, \cos \varphi_k^{(1)}$  – коэффициенты мощности внешней сети для трехфазного и однофазного токов.

Конечное значение сопротивлений  $X_{\Sigma}$  и  $R_{\Sigma}$  для прямой и нулевой последовательностей в этом случае определяют путем суммирования сопротивления внешней сети и сопротивления элементов внутренних сетей здания и сооружения. Используя эти значения, рассчитывают трехфазный и однофазный токи КЗ.

Представление однолинейной схемы для расчета токов КЗ без внешней сети упрощает эти схемы. Если при расчете внешних низковольтных сетей на генпланах у ввода в каждый объект будут указаны значения, изображенные подобно рисунку 1.7, то в дальнейшем энергетику легко определить ток КЗ в любой точке внутри здания или сооружения без сведений о трансформаторе, распределительном пункте ТП и воздушной (кабельной) линии ввода.

Кроме этого, приступая к проектированию внутренней сети здания и сооружения, можно брать предельно отключаемые токи аппаратов защиты от токов КЗ внутри объекта больше токов, указанных на плане (на вводе), без расчета тока КЗ.

Например, на рисунке 1.7 указано, что на вводе  $I_{КЗ}^{(3)}=1,2$  кА. Следовательно, все предохранители или автоматические выключатели ВРУ должны иметь предельно отключаемые токи больше 1,2 кА. Для РП и для НКУ эти токи будут еще меньше.

Для внутренних электрических сетей предприятий с точки зрения обеспечения электрической и пожарной безопасности наиболее актуально определение минимального тока КЗ при однофазном замыкании. Защитные аппараты должны надежно и быстро отключать такие КЗ.

В расчетную схему могут вводиться, кроме энергосистемы, другие источники энергии (ЭДС), например, соседние электродвигатели или комплексная нагрузка [2]. По этой причине на расчетной схеме их следует показывать в том случае, если КЗ является близким.

В соответствии с ГОСТ 26522-85, все короткие замыкания подразделяются на удаленные и близкие. КЗ считается *удаленным*, если амплитуды периодической составляющей тока в начальный и произвольный моменты КЗ практически одинаковы, и *близким*, если эти амплитуды существенно отличаются.

Электрическую удаленность точки КЗ от произвольного источника энергии в полной мере характеризует отношение действующего значения периодической составляющей тока КЗ от этого источника в начальный момент времени  $I_{КЗ0}^{(3)}$  к его установившемуся току КЗ  $I_{КЗ}^{(3)}$ .

В отечественной и международной практике КЗ принято считать близким, если это отношение равно или больше двух. При меньших значениях ( $I_{КЗ0}^{(3)} / I_{КЗ}^{(3)} < 2$ ) КЗ считается удаленным и в расчетную схему не включается [2].

Для асинхронного электродвигателя КЗ допустимо считать удаленным, если расчетная точка КЗ находится на другой ступени напряжения сети (т. е. за трансформатором) или реактором, кабелем и т. д., суммарное сопротивление которых в 2 раза и более превышает сверхпереходное сопротивление электродвигателя [2].

При расчете токов КЗ важно правильно выбрать расчетную точку КЗ (на рисунке 1.7 она обозначена жирным кружком).

Для проверки одиночных кабелей одной строительной длины на термическую стойкость расчетной точкой является точка КЗ в начале линии. Эта точка используется для проверки аппаратов защиты на предельный трехфазный отключаемый ток КЗ (точки 1, 2, 4 на рисунке 1.7).

Для проверки аппаратов защиты на чувствительность расчетной точкой является наиболее удаленная точка линии. В этой точке определяется однофазный ток КЗ (точки 3, 5 на рисунке 1.7).

### 1.7. Схемы замещения цепи токов короткого замыкания

Схема замещения цепи короткого замыкания составляется по исходной расчетной схеме цепи короткого замыкания. Каждый элемент расчетной схемы на схеме замещения представляется активным и индуктивным сопротивлениями, а источники энергии – источниками ЭДС.

Возле каждого сопротивления проставляется дробь, в числителе которой указывается вид сопротивления (активное или индуктивное) и к какому элементу схемы оно относится, а в знаменателе – величина этого сопротивления в мОм. Для источника ЭДС в числителе проставляется ее обозначение, а в знаменателе – величина ЭДС в вольтах.

Схемы замещения составляются отдельно для прямой, обратной и нулевой последовательностей (если в этом есть необходимость).

Для расчета начального значения периодической составляющей трехфазного тока КЗ составляется схема замещения прямой последовательности, а для расчета начального значения периодической составляющей однофазного тока КЗ – схема замещения нулевой последовательности.

В качестве примера на рисунке 1.8 приведена схема замещения цепи короткого замыкания для токов прямой и нулевой последовательности, изображенной на рисунке 1.6 расчетной схемы цепи короткого замыкания.

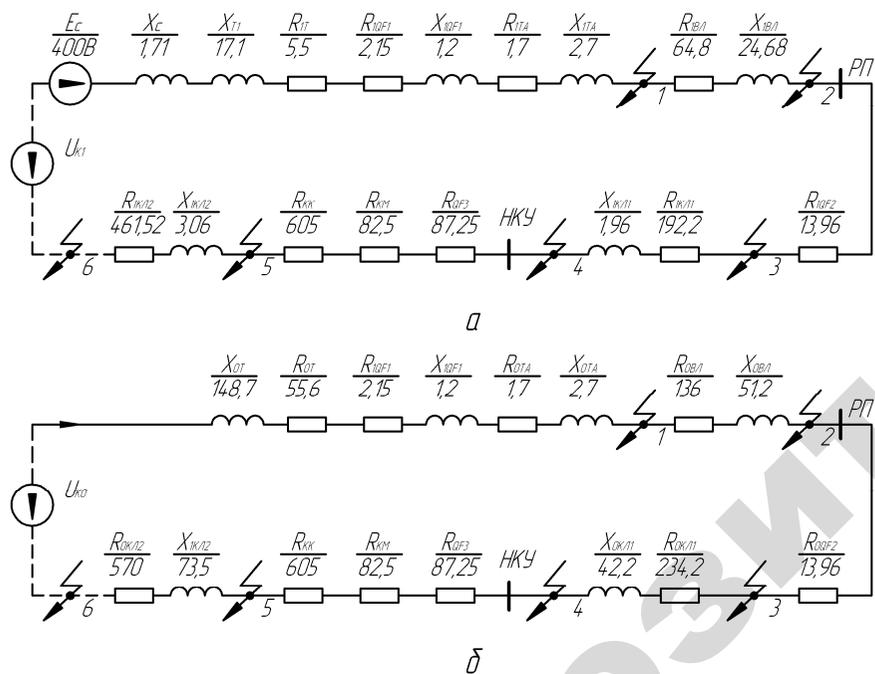


Рисунок 1.8 – Схема замещения для расчета токов трехфазного КЗ (прямой последовательности) (а) и токов однофазного КЗ (нулевой последовательности) (б)

Элементы схемы замещения следующие:

– энергосистема  $X_c \approx 0,1 X_{T1} = 0,1 \cdot 17,1 = 1,71$  мОм;

– силовой трансформатор мощностью 400 кВА,  $u_k = 4,5\%$ , схема соединения обмоток  $Y/Y_0$ ,  $X_{1T} = X_{2T} = 17,1$  мОм;  $R_{1T} = R_{2T} = 5,5$  мОм;  $X_{0T} = 148,7$  мОм;  $R_{0T} = 55,6$  мОм;  $Z_T^{(1)}/3 = 65$  мОм;

– шинопровод длиной до 5 м (в схему замещения не включается);

– автоматический выключатель  $QF1$  типа ВА51 на ток 100 А, имеющий  $R_{OF1} = 2,15$  мОм и  $X_{OF1} = 1,2$  мОм;

– трансформатор тока  $TA$  на ток 100/5, имеющий  $R_{TA} = 1,7$  мОм и  $X_{TA} = 2,7$  мОм;

– воздушная линия выполнена проводами 4А35; длина линии 80 м. Следовательно,  $R_{ВЛ} = 0,91 \cdot 80 = 64,8$  мОм;  $X_{ВЛ} = 0,308 \cdot 80 = 24,68$  мОм;  $R_{0ВЛ} = 1,7 \cdot 80 = 136$  мОм;  $X_{0ВЛ} = 0,64 \cdot 80 = 51,2$  мОм.

В ПП находится силовая сборка, длина которой менее 5 м, поэтому она в расчет не включается;

– автоматический выключатель ВА51 на ток 25 А:  $R_{OF2} = 349/25 = 13,96$  мОм;

– кабель КЛ1 длиной 20 м типа АВВГ  $3 \times 4 + 1 \times 2,5$ . Его сопротивление  $R_{КЛ1} = 9,61 \cdot 20 = 192,2$  мОм;  $X_{КЛ1} = 0,098 \cdot 20 = 1,96$  мОм.  $R_{0КЛ1} = 11,71 \cdot 20 = 234,2$  мОм;  $X_{0КЛ1} = 2,11 \cdot 20 = 42,2$  мОм.

В НКУ находятся  $QF3$  на номинальный ток расцепителя 4 А,  $KM$  на ток 10 А и  $KK$  типа РТТ на номинальный ток 1,6 А. Их сопротивления следующие:  $R_{OF3} = 349/4 = 87,25$  мОм;  $R_{KM} = 825/10 = 82,5$  мОм;  $R_{KK} = 605$  мОм.

Кабель КЛ2 типа АВВГ  $4 \times 2,5$  длиной 30 м. Следовательно, его сопротивления:  $R_{КЛ2} = 15,384 \cdot 30 = 461,52$  мОм;  $X_{КЛ2} = 0,102 \cdot 30 = 3,06$  мОм.

$$R_{0КЛ2} = 19,0 \cdot 30 = 570 \text{ мОм}; \quad X_{0КЛ2} = 2,45 \cdot 30 = 73,5 \text{ мОм}.$$

Асинхронный электродвигатель мощностью 0,55 кВт,  $I_n = 1,6$  А. В связи с его малой мощностью в схему замещения он не включается ( $1,6 < 0,01$  предполагаемого  $I_{K3}^{(3)}$ ).

Для точки КЗ 6 (рисунок 1.8, а) суммарные сопротивления для трехфазного тока КЗ составят:

$$R_{1\Sigma} = 5,5 + 2,15 + 1,7 + 64,8 + 13,96 + 192,2 + 87,25 + 82,5 + 605 + 461,52 = 1516,58 \text{ мОм};$$

$$X_{1\Sigma} = 1,71 + 17,1 + 1,2 + 2,7 + 24,68 + 1,96 + 3,06 = 52,41 \text{ мОм}.$$

По формуле (1.1) в точке КЗ 6 начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ составит:

$$I_{\text{КЗ}0}^{(3)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{1516,58^2 + 52,41^2}} = 0,152 \text{ кА.}$$

На вводе в здание (точка КЗ 2) суммарные сопротивления для трехфазного тока КЗ составят:

$$R_{1\Sigma} = 5,5 + 2,15 + 1,7 + 64,8 = 74,15 \text{ мОм;}$$

$$X_{1\Sigma} = 1,71 + 17,1 + 1,2 + 2,7 + 24,68 = 27,38 \text{ мОм.}$$

По формуле (1.1) в точке КЗ 2 начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ составит:

$$I_{\text{КЗ}0}^{(3)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{74,15^2 + 27,38^2}} = 2,925 \text{ кА.}$$

Из расчетов следует, что во внутренних сетях зданий и сооружений происходит значительное уменьшение тока КЗ. В приведенном расчете ток КЗ в самой удаленной точке по сравнению с током КЗ на вводе уменьшился в 19,2 раза.

### 1.8. Защита проводников от токов перегрузки

Проводники в электроустановках, находящихся под напряжением, должны быть защищены одним или несколькими устройствами автоматического отключения питающего напряжения в случае перегрузки и КЗ. Для этих цепей могут быть использованы автоматические выключатели с комбинированным расцепителем (тепловым и электромагнитным), плавкие предохранители, автоматические выключатели с токовой отсечкой (электромагнитным расцепителем), автоматические выключатели с электромагнитным расцепителем и гидравлическим замедлением срабатывания, автоматические выключатели с электронным расцепителем, устройства защитного отключения (при однофазных КЗ на землю).

Отключающая способность этих аппаратов должна быть не менее значения ожидаемого тока КЗ в начале защищаемой линии. Ожидаемый ток КЗ определяется расчетом или путем измерения. Допускается применение устройств с более низкой отключающей способностью, если другое защитное устройство, имеющее необходимую отключающую способность, установлено со стороны питания [11].

Номинальные токи плавких вставок предохранителей и токи уставок автоматических выключателей во всех случаях следует выбирать по возможности наименьшими по расчетным токам этих участков или по номинальным токам электрических приемников. При этом аппараты защиты не должны отключать электрические приемники при кратковременных перегрузках и пусковых токах.

Защита проводников от токов перегрузки заключается в следующем: устройство защиты должно отключать любой ток перегрузки, протекающий по проводникам, раньше, чем такой ток мог бы вызвать повышение температуры проводников, опасное для изоляции, соединений, зажимов или среды, окружающей проводники.

Для защиты проводников от перегрузки наиболее подходят устройства защиты с обратной зависимой от времени токовой характеристикой. Такую характеристику имеют тепловые расцепители автоматических выключателей, электромагнитные расцепители с гидравлическим замедлением срабатывания, автоматические выключатели с электронным расцепителем, плавкие предохранители.

Рабочая характеристика любого устройства защиты проводников от перегрузки должна отвечать двум следующим условиям [12]:

$$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном.защ}} \leq I_{\text{доп.пров}}, \quad (1.19)$$

$$I_{\text{ср.защ}} \leq 1,45 I_{\text{доп.пров}}, \quad (1.20)$$

где  $I_{\text{раб}}$  – рабочий ток цепи, А;

$I_{\text{доп.пров}}$  – допустимый длительный ток проводника, А;

$I_{\text{ном.защ}}$  – номинальный ток устройства защиты (для устройства защиты с регулируемой характеристикой номинальным током является ток выбранной уставки), А;

$I_{\text{ср.защ}}$  – ток, обеспечивающий надежное срабатывание устройства защиты, А.

Ток  $I_{\text{ср.защ}}$  принимают равным не менее тока трогания для автоматических выключателей с тепловым или комбинированным расцепителем или не менее тока пограничного для плавких предохранителей. Для более точного определения тока и времени срабатывания аппаратов защиты производится координация защитных характеристик аппаратов защиты и электропроводки (см. п. 1.10).

В формуле (1.20) коэффициент 1,45 является допустимым коэффициентом перегрузки проводника. Для защитного устройства коэффициент 1,45 определяет ток  $1,45I_{\text{доп.пров}}$ , для которого может быть определено допустимое время перегрузки.

Следует отметить, что по формуле (1.20) не обеспечивается полная защита от перегрузок проводников при токах меньших, чем  $1,45I_{\text{доп.пров}}$ , и не всегда обеспечивает экономически целесообразное решение. При этом предполагается, что электрическая сеть спроектирована так, что небольшие перегрузки с большой продолжительностью будут иметь место нечасто.

От перегрузки должны быть защищены электрические сети помещений, выполненные открыто проложенными проводами с горючей наружной оболочкой или изоляцией [13].

От перегрузки обязательно защищают электрические сети группы «а» [13]. К ним относятся:

- 1) осветительные сети в жилых и общественных зданиях;
- 2) осветительные сети в торговых помещениях;
- 3) осветительные сети в служебных и бытовых помещениях с переносными электрическими приемниками (утюгами, чайниками, электроплитами и т. п.);
- 4) проводники в пожароопасных и во взрывоопасных зонах классов В-I, В-Ia, В-II, В-IIa.

От перегрузки защищают электрические сети группы «б» (на промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях) только в случаях, если по условиям технологического процесса или по режиму работы сети может возникнуть длительная перегрузка проводников [13].

ПУЭ требует, чтобы проводники ответвлений к электродвигателям с короткозамкнутым ротором во всех случаях (кроме находящихся во взрывоопасных зонах классов В-Iб и В-Iг) были защищены от перегрузок. Сечения проводников должны допускать длительную перегрузку не менее 125 % номинального тока электродвигателя

во взрывоопасных зонах и 100 % номинального тока двигателя в невзрывоопасных зонах.

В сетях, защищаемых от перегрузок, проводники следует выбирать по расчетному току. При этом должно быть обеспечено условие, чтобы по отношению к длительно допустимым токовым нагрузкам проводников  $I_{\text{доп.дл}}$  аппараты защиты имели следующие параметры [13]:

- для плавких предохранителей при защите проводников с поливинилхлоридной, резиновой или аналогичной по тепловым характеристикам изоляции:

$$I_{\text{ном. пл. вст}} \leq 0,8I_{\text{доп.дл.пров}} ; \quad (1.21)$$

- для плавких предохранителей при защите кабелей с бумажной изоляцией:

$$I_{\text{ном. пл. вст}} \leq I_{\text{доп.дл.пров}} ; \quad (1.22)$$

- для автоматических выключателей, имеющих только максимальный мгновенно действующий расцепитель (отсечку), при защите проводников с поливинилхлоридной, резиновой или аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq 0,8I_{\text{доп.дл.пров}} ; \quad (1.23)$$

- для тех же автоматических выключателей и изоляции проводников в невзрывоопасных производственных помещениях промышленных предприятий, а так же при защите кабеля с бумажной изоляцией:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq I_{\text{доп.дл.пров}} ; \quad (1.24)$$

- для автоматических выключателей с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки), при защите проводников всех марок:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq I_{\text{доп.дл.пров}} ; \quad (1.25)$$

- для тока трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой

при защите проводников с поливинилхлоридной, резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией:

$$I_{\text{трог.расц}} \leq I_{\text{доп.дл.пров}} \cdot \quad (1.26)$$

Ток трогания расцепителей соответствует току срабатывания тепловых расцепителей в течение часа (см. гл. 3). Он приводится в каталогах по результатам тепловых испытаний расцепителей:

$$I_{\text{трог.расц}} = K_{\text{тр}} I_{\text{ном.расц}} \cdot \quad (1.27)$$

где  $K_{\text{тр}}$  – коэффициент трогания; обычно он равен 1,13–1,45 или 1,05–1,3 в лучших типах автоматических выключателей;

• для тока трогания расцепителей автоматического выключателя с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой при защите кабелей с бумажной изоляцией или изоляцией из вулканизированного полиэтилена:

$$I_{\text{трог.расц}} \leq 1,25 I_{\text{доп.дл.пров}} \cdot \quad (1.28)$$

*Аппараты защиты проводников допускается не устанавливать [13]:*

1) в местах ответвления шин щита к аппаратам, установленным на том же щите, если проводники выбраны по расчетному току ответвления;

2) в местах снижения сечения питающей линии по ее длине и на ответвлениях от нее, если защита предыдущего участка защищает ответвление;

3) если незащищенные участки или ответвления от нее выполнены проводниками, выбранными с сечением не менее половины сечения проводников защищенного участка линии;

4) в местах ответвления от питающей линии к электрическим приемникам малой мощности, если питающая их линия защищена аппаратом с установкой не более 25 А для силовых электрических приемников и бытовых приборов;

5) в местах ответвления от осветительных линий: при длине ответвления до 3 м при любом способе прокладки; при любой длине и прокладке в стальных трубах;

6) в местах ответвления от питающей линии цепей измерения, управления и сигнализации, если эти проводники не выходят

за пределы соответствующих машин или щита или если проводники выходят за пределы, но электропроводка выполнена в трубах или имеет негорючую оболочку.

*Нельзя устанавливать аппараты защиты* в местах присоединения к питающей линии таких цепей управления, сигнализации и измерения, отключение которых может повлечь за собой опасные последствия (отключение пожарных насосов, вентиляторов, предотвращающих образование взрывоопасных смесей и т. д.).

Во всех случаях такие цепи должны выполняться проводниками в трубах или иметь негорючую оболочку. Сечение этих цепей должно быть не ниже 1,0 мм<sup>2</sup> для меди и 2,5 мм<sup>2</sup> для алюминия, а при присоединении пайкой – 0,5 мм<sup>2</sup> для меди.

### 1.9. Защита проводников от токов короткого замыкания

Защита проводников от токов короткого замыкания заключается в следующем. Устройства защиты должны отключать любой ток КЗ, протекающий по проводникам защищаемой цепи раньше, чем такой ток может вызвать опасные повреждения в цепи вследствие тепловых и механических воздействий на проводник и их соединения.

Время отключения  $t_{\text{откл.КЗ}}$  полного тока КЗ в любой точке цепи не должно превышать времени  $t_{\text{нагр.КЗ}}$ , в течении которого происходит нагрев проводников от наименьшего значения допустимой температуры в нормальном режиме до предельно допустимой температуры, т. е.

$$t_{\text{откл.КЗ}} < t_{\text{нагр.КЗ}} \cdot \quad (1.29)$$

Время  $t_{\text{нагр.КЗ}}$  определяется по формуле

$$t_{\text{нагр.КЗ}} = K^2 \cdot \frac{S^2}{I_{\text{КЗ}}^2}, \quad (1.30)$$

где  $I_{\text{КЗ}}$  – ток КЗ, обеспечивающий срабатывание защитного аппарата за время не более 5 с, А;

$K$  – коэффициент, значение которого зависит от материала проводника, его изоляции, начальной и конечной температур. Значения коэффициента  $K$  для защитных и фазных проводников указаны в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Значения коэффициента  $K$  для фазных и защитных проводников, входящих в многожильный кабель

Материал изоляции	Коэффициент $K$ для проводника		Температура, °C	
	медного	алюминиевого	начальная	конечная
Поливинилхлорид (ПВХ)	115	76	70	160
Сшитый полиэтилен, этилированная резина	143	94	90	250
Бутиловая резина	134	89	85	220

Плавкая вставка предохранителя, защищающего проводник, должна быть согласована с минимальным током КЗ  $I_{КЗ}^{(1)}$  по условиям, изложенным в [13]:

$$I_{КЗ}^{(1)} > 3I_{вст.ном} \quad (1.31)$$

Для взрывоопасных помещений это условие записывается в виде

$$I_{КЗ}^{(1)} > 4I_{вст.ном} \quad (1.32)$$

Для автоматического выключателя с нерегулируемым расцепителем или для уставки тока регулируемого расцепителя, имеющего обратозависимую от тока характеристику, условие защиты следующее:

$$I_{КЗ}^{(1)} > 3I_{вст.расц} \quad (1.33)$$

Для взрывоопасных помещений это условие защиты записывается в виде

$$I_{КЗ}^{(1)} > 6I_{вст.расц} \quad (1.34)$$

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только токовую отсечку (только электромагнитный расцепитель):

$$I_{КЗ}^{(1)} > I_{эм} K_{разб} K_{зап} \quad (1.35)$$

где  $I_{эм}$  – ток срабатывания электромагнитного расцепителя (ток срабатывания отсечки), А; см. формулу (1.40);

$K_{зап}$  – коэффициент запаса; обычно  $K_{зап} = 1,1$ ;

$K_{разб}$  – коэффициент разброса характеристик.

При отсутствии заводских данных на коэффициент  $K_{разб}$  следует вычислять ток КЗ при номинальных токах автоматических выключателей следующим образом:

$$\text{до } 100 \text{ А} \quad I_{КЗ}^{(1)} > 1,4I_{эм} \quad (1.36)$$

$$\text{более } 100 \text{ А} \quad I_{КЗ}^{(1)} > 1,25I_{эм} \quad (1.37)$$

В сетях, защищаемых только от токов КЗ, не требующих защиты от перегрузки, за исключением протяженных сетей (например, сельских и коммунальных), допускается не выполнять расчетной проверки с определением тока  $I_{КЗ}^{(1)}$ , если по отношению к длительному допустимым токовым нагрузкам проводников аппаратуры защиты имеют параметры [13]:

ток плавкой вставки предохранителя составляет:

$$I_{ном.пл.вст} < 3I_{доп.дл.пр} \quad (1.38)$$

ток вставки автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель (отсечку), составляет:

$$I_{эм} \leq 4,5I_{доп.дл.пров} \quad (1.39)$$

где  $I_{эм}$  – ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А.

Ток срабатывания электромагнитного расцепителя составляет:

$$I_{эм} = K_{эм} I_{ном.расц} \quad (1.40)$$

где  $K_{эм}$  – коэффициент кратности тока срабатывания электромагнитного расцепителя. Этот коэффициент может быть от 1,3 до 20.

Если подставить формулу (1.40) в неравенство (1.39), то можно найти:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq 4,5 I_{\text{доп.дл.пров}} / K_{\text{эм}} \quad (1.41)$$

Номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой обратно зависящей от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки) должен составлять:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq I_{\text{доп.дл.пров}} \quad (1.42)$$

Ток трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратно зависящей от тока характеристикой:

$$I_{\text{трог.расц}} \leq 1,25 I_{\text{доп.дл.пров}} \quad (1.43)$$

где  $I_{\text{трог.расц}}$  – ток трогания расцепителя по формуле (1.32).

Подставляя формулу (1.27) в выражение (1.43), получим:

$$I_{\text{ном.расц}} \leq 1,25 I_{\text{доп.дл.пров}} / K_{\text{трог}} \quad (1.44)$$

### 1.10. Координация характеристик устройств защиты и проводников

Электроустановка должна быть защищена одним или несколькими устройствами защиты, чтобы в случае появления сверхтоков (перегрузки и короткого замыкания) или недопустимых токов утечки обеспечить автоматическое отключение электроустановки от питающей сети.

Для применяемых в электроустановке защитных устройств должна быть проведена координация их защитных характеристик по ГОСТ Р 50030.2-94. Она заключается в совместном анализе основных характеристик устройств защиты и защищаемых проводников, их согласовании и обеспечении селективности действия.

Например, если проводится координация устройств защиты и электропроводки, то сравниваются их защитные (времятоковые) характеристики и характеристики интеграла Джоуля (рисунки 1.9 и 1.10).

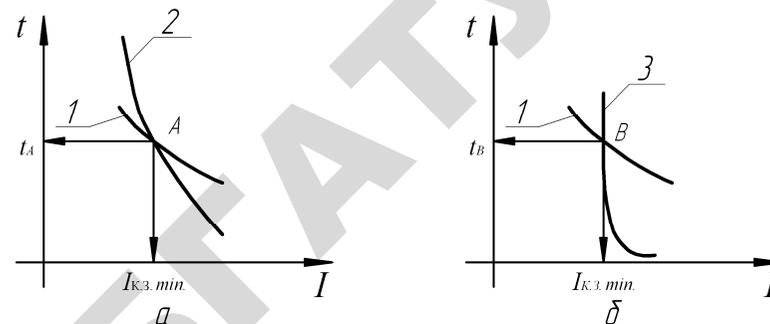


Рисунок 1.9 – Кривые времятоковой характеристики плавкого предохранителя и электропроводки (а), автоматического выключателя и электропроводки (б):

1 – кривая времятоковой характеристики, соответствующая допустимой тепловой нагрузке защищаемой электропроводки; 2 – кривая срабатывания плавкого предохранителя (верхний предел зоны срабатывания); 3 – кривая токовой отсечки автоматического выключателя

На рисунке 1.9, а изображены в логарифмическом масштабе времятоковые характеристики электропроводки и плавкого предохранителя, а на рисунке 1.9, б – автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем и электропроводки. Пересечение этих характеристик в точках А и В позволяет определить минимальное значение тока КЗ  $I_{\text{КЗ min}}$ , при котором обеспечивается защита электропроводки от тока КЗ при любых состояниях (горячих или холодных) устройства защиты.

Для надежного отключения действительный ток КЗ должен быть больше значения  $I_{\text{КЗ min}}$  (рисунок 1.9) на коэффициент запаса ( $K_{\text{зап}} \approx 1,1-1,25$ ) из-за разброса характеристик предохранителя.

Из рисунка 1.9 вытекает следующее правило: для защиты электрооборудования, например, электропроводки установки, требуется, чтобы кривая времятоковой характеристики устройства защиты была ниже времятоковой характеристики защищаемого электрооборудования, например, электропроводки.

При действии тока КЗ проводник нагревается. Допустимое выделение тепла в проводнике можно получить из формулы (1.30), преобразовав ее к виду

$$I_{\text{КЗ}}^2 t_{\text{нагр.КЗ}} = K^2 S^2 \quad (1.45)$$

Из формулы (1.45) следует, что ее левая часть представляет собой интеграл Джоуля для проводника, а правая часть определяется конструкцией проводника  $K^2$ , его сечением  $S^2$  и является величиной постоянной.

Значения интеграла Джоуля для любого электрооборудования должны указываться предприятиями-изготовителями как важный технический параметр изделия.

На рисунке 1.10 изображены в одинаковом логарифмическом масштабе интегралы Джоуля для предохранителя и электрического проводника.

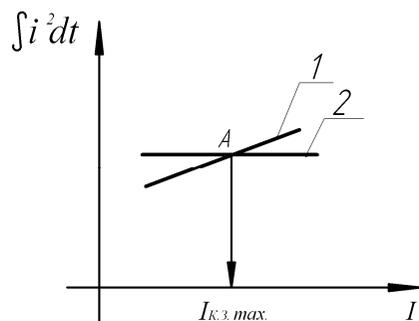


Рисунок 1.10 – Интеграл Джоуля плавкого предохранителя (1) и проводника (2)

Пересечение характеристик интеграла Джоуля плавкого предохранителя и проводника в точке A показывает максимальный ток  $I_{кз max}$ , до которого обеспечивается защита проводника плавким предохранителем.

Аналогично можно определить ток КЗ, при котором автоматический выключатель обеспечит защиту проводника при токе КЗ.

Из рисунка 1.10 вытекает следующее правило: для защиты электрооборудования, например, электропроводки установки, требуется, чтобы линия интеграла Джоуля устройства защиты проходила ниже линии интеграла Джоуля (или теплового показателя) защищаемого электрооборудования.

Пример координации защитных характеристик аппаратов защиты и электрооборудования приведен в [14].

## 1.11. Контрольные вопросы и задания

- 1.1. Какой режим электрической цепи называется коротким замыканием?
- 1.2. Какой ток называется сверхтоком?
- 1.3. Какой ток называется током перегрузки?
- 1.4. Какой ток называется током короткого замыкания?
- 1.5. Чем опасны токи КЗ?
- 1.6. Укажите виды токов КЗ и дайте им определения.
- 1.7. Какие составляющие имеет ток КЗ при переходном процессе?
- 1.8. Какую величину составляет переходное сопротивление дуги в месте КЗ?
- 1.9. Что такое тепловой импульс тока КЗ?
- 1.10. Укажите особенности электрических сетей в сельскохозяйственном производстве.
- 1.11. Нарисуйте схемы магистральной, радиальной и смешанной электрических сетей предприятия.
- 1.12. Назовите особенности токов КЗ в магистральных, радиальных и смешанных электрических сетях.
- 1.13. От каких параметров зависит величина тока КЗ?
- 1.14. В каких случаях переходное сопротивление дуги оказывает заметное влияние на ток КЗ?
- 1.15. Какие электрические сети называются внешними и внутренними?
- 1.16. В чем состоит особенность расчета токов КЗ во внутренних сетях предприятия?
- 1.17. С какой целью проводится расчет токов КЗ?
- 1.18. Запишите формулу для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ.
- 1.19. Запишите формулу для расчета начального действующего значения периодической составляющей тока однофазного КЗ.
- 1.20. Какими сопротивлениями для расчета тока КЗ обладает трансформатор?
- 1.21. Как определяются сопротивления токам прямой последовательности (трехфазного КЗ) кабелей и проводов воздушной линии?
- 1.22. Как определяются сопротивления токам нулевой последовательности (однофазного КЗ) кабелей и проводов воздушной линии?

1.23. Как определяется сопротивление аппаратов в силовой цепи при известной потере мощности на 1 полюс?

1.24. Какие аппараты в силовой цепи имеют наибольшее сопротивление?

1.25. Запишите формулу выбора проводника по допустимому длительному току.

1.26. По каким параметрам проверяют выбранный проводник?

1.27. Какие аппараты защиты применяются для защиты проводников от сверхтока?

1.28. В каких случаях не допускается устанавливать аппараты защиты проводников от сверхтока?

1.29. В каких случаях допускается не устанавливать аппараты защиты проводников от сверхтока?

1.30. Запишите условия защиты проводников от перегрузки.

1.31. Запишите условия проверки выбранного аппарата защиты и допустимого длительного тока проводника при перегрузке.

1.32. Запишите критерий защиты проводников от тока КЗ.

1.33. Запишите условия согласования уставок аппаратов защиты от КЗ и токов КЗ.

1.34. Определите начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в точке 3 схемы рисунка 1.6, используя данные расчетов, приведенные в п. 1.7.

1.35. Определите начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ в точке 3 схемы рисунка 1.6, используя данные расчетов, приведенные в п. 1.7.

1.36. Определите начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ в точке 4 схемы рисунка 1.6, используя данные расчетов, приведенные в п. 1.7.

1.37. Определите начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ в точке 4 схемы рисунка 1.6, используя данные расчетов, приведенные в п. 1.7.

1.38. Выберите сечение проводников кабеля АВВГ для трехфазного рабочего продолжительного тока 25 А, если кабель прокладывается в котельной, имеющей среднюю температуру +35 °С, в коробе с 5 другими кабелями.

1.39. Определите падение напряжения в кабеле АВВГ 4×2,5 мм<sup>2</sup> длиной 30 м, подключаемого к трехфазным нагревателям мощностью 9 кВт при напряжении сети 380 В.

1.40. Определите минимальное сечение кабеля АВВГ по условию стойкости к токам КЗ, если ток КЗ составляет 10 кА, а плавкая вставка предохранителя ППН выбрана на 20 А.

1.41. Проверьте, сможет ли предохранитель ППНИ с плавкой вставкой на 16 А защитить от перегрузки кабель АВВГ 4×2,5 мм<sup>2</sup>.

1.42. Проверьте, сможет ли автоматический выключатель ВА47 с электромагнитным расцепителем, имеющим  $I_{ном.расц} = 2,5$  А и отсечку  $12I_{ном}$ , защитить от перегрузки кабель АВВГ 4×2,5 мм<sup>2</sup>.

1.43. Проверьте, сможет ли автоматический выключатель ВА51 с током уставки 25 А, при кратности тока отсечки (электромагнитного расцепителя) 12 защитить от токов КЗ кабель АВВГ 4×4 мм<sup>2</sup>. Ток  $I_{КЗ}^{(1)} = 1$  кА.

## Глава 2. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И ЗАЩИТА С ИХ ПОМОЩЬЮ ОТ СВЕРХТОКОВ

### 2.1. Общие сведения и требования к предохранителям

*Предохранители* – это электрические аппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от сверхтоков. Они являются простейшими аппаратами токовой защиты с обратно-зависимой времятоковой характеристикой.

По определению МЭК 60050-441-84 *плавкий предохранитель* – аппарат, который вследствие расплавления одного или нескольких специально спроектированных и рассчитанных элементов размыкает цепь, в которую он включен, отключая ток, превышающий заданное значение в течение достаточно продолжительного времени.

Защитное действие плавкого предохранителя заключается в том, что его плавкая вставка перегорает при сверхтоке раньше, чем этот ток вызывает повреждение в электрической цепи.

Предохранители появились одновременно с первыми электрическими сетями. Патент на первый плавкий предохранитель с наполнителем был выдан в 1890 году. Простота устройства, малые размеры, небольшая стоимость, высокое быстродействие при КЗ, высокая отключающая способность – все это обеспечило их широкое применение. Они выпускаются на токи от единиц миллиампер до тысяч ампер. Используются в цепях низкого (до 1000 В) и высокого напряжения.

Широкое применение предохранителей привело к разнообразию их конструкций. Однако, несмотря на это, все они имеют плавкий элемент, закрепленный в корпусе плавкой вставки. В старых конструкциях силовых предохранителей плавкий элемент можно было заменить. В новых конструкциях, как правило, меняют всю плавкую вставку. Для упрощения говорят о перегорании плавкой вставки, а имеется в виду перегорание плавкого элемента плавкой вставки.

В нормальном режиме работы плавкий предохранитель может пропускать ток продолжительное время, не перегреваясь и не разрывая цепь.

*Номинальным током плавкой вставки* называется ток, который плавкая вставка может длительно проводить в установленных условиях без повреждения [15].

При номинальном токе температура плавкого элемента или других частей предохранителя достигает максимально допустимой установившейся температуры. Эта температура определяется классом изоляции материалов или желаемыми характеристиками предохранителя.

Если плавкая вставка выполнена из материалов, допускающих высокую температуру ее частей, номинальный ток определяется температурой нагрева места присоединения подводящих проводов к контактным выводам. Эта температура оговаривается в стандартах на предохранители и приводится в инструкциях по эксплуатации. Она, как правило, не превышает 135 °С и относится к наибольшей плавкой вставке предохранителя в данной серии.

В остальных случаях основным фактором, определяющим значение номинального тока предохранителя, является допустимая температура нагрева плавкого элемента. Она ограничивается такими явлениями, как окисление металла плавкого элемента, сублимация и др.

Предохранители выпускаются определенными сериями. В каждой серии можно выделить несколько габаритов, одинаковых для группы плавких вставок.

*Номинальным током предохранителя* называют ток, соответствующий наибольшей плавкой вставке, которую можно установить в данном корпусе, не перегревая соединение выше допустимой температуры. Например, если номинальный ток предохранителя 100 А, то его плавкие вставки могут иметь номинальные токи 25, 32, 40, 50, 63, 80 и 100 А.

К предохранителям предъявляются семь следующих требований [16]:

- 1) защитная (или времятоковая) характеристика предохранителя должна проходить ниже защитной (времятоковой) характеристики защищаемого электрооборудования и по возможности ближе к ней;
- 2) время срабатывания предохранителя при КЗ должно быть минимальное;
- 3) предохранители при больших токах КЗ должны работать с ограничением тока, не пропуская амплитудного значения тока;

4) если в цепи КЗ окажутся несколько предохранителей, то должна обеспечиваться их селективность (избирательность) срабатывания;

5) предохранители должны обеспечивать высокую отключающую способность, не разрушаясь;

6) характеристики предохранителя должны быть стабильными во времени. Технологический разброс их параметров не должен нарушать надежность защиты;

7) конструкция предохранителя должна быть удобной для монтажа и быстрой замены плавкой вставки. Желательно иметь устройства, сигнализирующие о срабатывании плавкого предохранителя.

Первое требование к предохранителям в графическом виде изображено на рисунке 2.1.

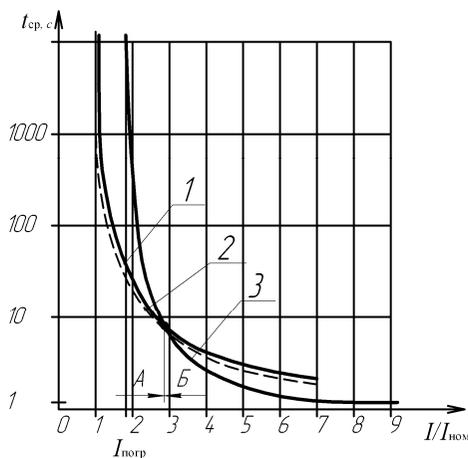


Рисунок 2.1 – Времятоковые характеристики:  
1 – электрооборудования; 2 – идеального предохранителя;  
3 – реального предохранителя

Предположим, времятоковая характеристика защищаемого электрооборудования (электродвигателя, трансформатора или кабеля) соответствует линии 1. В идеальном случае времятоковая характеристика предохранителя (линия 2) должна быть ниже линии 1 и близка к ней, нигде не пересекаясь с ней. В действительности линия 3 реального предохранителя пересекается с линией 1. При малых перегрузках кривая предохранителя 3 выше кривой защищаемого

электрооборудования 1, следовательно, она не защищает его. И только при значительных токовых перегрузках или при КЗ кривая предохранителя 3 ниже кривой 1 электрооборудования и защищает его.

В области токов «А» защита не действует, а в области «Б» — действует. Характеристика предохранителя начинается при пограничном токе  $I_{\text{погр}}$ . Чем ближе  $I_{\text{погр}}$  к номинальному току, тем меньше область «А» и лучше защищает предохранитель.

Таким образом, при малых перегрузках, до пограничного тока, плавкие предохранители не срабатывают вообще и не защищают электрооборудование. При токе больше пограничного на некотором участке плавкие предохранители также не защищают электрооборудование, хотя и срабатывают через определенное время. Только при значительной перегрузке, примерно в 2,5–3 раза превышающей номинальный ток плавкой вставки, плавкие предохранители защищают электрооборудование. При больших токах КЗ они срабатывают мгновенно.

Следует отметить, что предохранитель в принципе не может обеспечить идеальную характеристику 2 (рисунок 2.1) из-за того, что постоянная времени нагревания его во много раз меньше, чем постоянная времени нагревания электрооборудования (электродвигателей, трансформаторов, кабелей и т. п.). В связи с этим плавкий предохранитель можно считать средством защиты только от значительных перегрузок и надежным средством защиты от токов КЗ.

## 2.2. Нагрев и работа плавких предохранителей при рабочем токе и сверхтоке

При протекании тока через плавкий элемент выделяется тепло. Оно расходуется на нагревание плавкого элемента, наполнителя, соприкасающегося с ним, и корпуса плавкой вставки с контактными наконечниками. Часть тепла уходит в окружающую среду. Для определения характера нагрева плавкой вставки и основных зависимостей введем некоторые допущения:

- 1) плавкий элемент находится в однородном наполнителе с малым тепловым сопротивлением;
- 2) между плавким элементом, наполнителем и корпусом должен быть идеальный тепловой контакт;
- 3) теплоемкость плавкой вставки, мощность тепловых потерь и теплоотдача не зависят от температуры плавкого элемента.

При этих условиях и неизменном токе уравнение теплового баланса плавкой вставки будет иметь вид

$$Qdt = A\tau dt + Cd\tau, \quad (2.1)$$

где  $Q$  – количество тепла, выделенное в плавком элементе в единицу времени, Дж/с;

$A$  – теплоотдача плавкой вставки, Дж/с·град;

$\tau$  – превышение температуры над окружающей средой, град;

$C$  – теплоемкость плавкой вставки, Дж/град;

$t$  – текущее время, с.

Мощность потерь в плавком элементе

$$Q = I^2 R, \quad (2.2)$$

где  $I$  – ток, протекающий через плавкий элемент, А;

$R$  – электрическое сопротивление плавкого элемента протекающему току, Ом.

Теплоемкость плавкой вставки

$$C = \sum C_{уд} m, \quad (2.3)$$

где  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость отдельных частей плавкой вставки, Дж/кг·град;

$m$  – масса отдельных частей плавкой вставки, кг.

Дифференциальное уравнение (2.1) имеет следующее решение:

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T}) + \tau_{нач} e^{-t/T}, \quad (2.4)$$

где  $T$  – постоянная времени нагрева плавкой вставки, с;

$\tau_{уст}$  – установившееся превышение температуры, град.

В частности, при  $\tau_{нач} = 0$  уравнение (2.4) будет иметь вид

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T}). \quad (2.5)$$

По уравнению (2.5) через время  $t = 3T$  получаем  $\tau = 0,95\tau_{уст}$ , т. е. температура достигла почти установившегося значения и отличается на 5 % от установившейся температуры.

Таким образом, при приведенных выше допущениях температура плавкой вставки при рабочих токах в продолжительном режиме работы изменяется по экспоненциальному закону. Через  $(3-4)T$  температура плавкой вставки достигает установившегося значения с погрешностью не выше 2-5 %.

В номинальном режиме работы имеет место номинальная теплоотдача

$$A_n = \frac{Q_{ном}}{\tau_{ном}} = \frac{I_{ном}^2 R}{\tau_{ном}}. \quad (2.6)$$

где  $\tau_{ном}$  – температура превышения плавкой вставки над окружающей средой при номинальном токе, град.

Установившаяся температура при любом токе

$$\tau_{уст} = \frac{Q}{A_n} = \frac{I^2 R \tau_{ном}}{I_{ном}^2 R} = \left( \frac{I}{I_{ном}} \right)^2 \tau_{ном}. \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) следует, что установившаяся температура плавкой вставки зависит от квадрата кратности тока и температуры превышения в номинальном режиме.

Постоянная времени нагрева плавкой вставки

$$T = \frac{C}{A_n} = \frac{\sum c_{уд} m}{I_{ном}^2 R} \tau_{ном}. \quad (2.8)$$

Из уравнения (2.8) следует, что постоянная времени нагрева плавкой вставки пропорциональна теплоемкости плавкой вставки, ее номинальной температуре превышения и обратно пропорциональна сопротивлению плавкого элемента и квадрату номинального тока. Физический смысл постоянной времени нагревания состоит в том, что она показывает время, в течение которого плавкая вставка нагреется до номинальной температуры при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Для реальных силовых предохранителей общего назначения постоянная времени нагрева плавкой вставки может достигать до нескольких минут. Например, для плавкой вставки с наполнителем при  $I_{ном} = 100$  А постоянная времени нагрева  $T = 9$  минут [17]. Желательно, чтобы величину  $T$  указывали заводы-изготовители в технических данных предохранителей.

Для конкретной плавкой вставки все величины, входящие в формулу (2.8), постоянны. Следовательно,  $T = const$ .

Если предположить, что  $A = 0$ , то уравнение (2.1) примет вид

$$Qdt = Cd\tau. \quad (2.9)$$

Интегрируя его при условии  $t_1 = 0$  и  $\tau_1 = 0$ , получим:

$$\tau = \frac{Q}{C}t = \frac{I^2 R}{\sum c_{уд} m}t. \quad (2.10)$$

Из уравнения (2.10) следует, что при отсутствии теплоотдачи изменение температуры плавкой вставки происходит по линейному закону.

Принятые ранее допущения справедливы лишь при рабочих токах (не выше номинального) и при продолжительном режиме работы идеального предохранителя.

В действительности тепловое сопротивление наполнителя значительно больше теплового сопротивления металла плавкого элемента. Тепловой контакт между элементами плавкой вставки не идеальный, а мощность тепловых потерь зависит от температуры плавкого элемента, поскольку он нагревается до высоких температур. Последнее обстоятельство позволяет записать уравнение (2.2) в виде

$$Q = I^2 R(1 + \alpha\tau), \quad (2.11)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления металла плавкого элемента, 1/град.

При сверхтоке нагревание плавкой вставки происходит быстрее, чем наполнителя и корпуса. Следовательно, температура наполнителя и корпуса отстает от температуры плавкого элемента. Чем больше перегрузка, тем больше разница температуры между ними. В условиях короткого замыкания за время менее 20 мс

теплоотдача от плавкого элемента не происходит, и он нагревается быстро до температуры плавления. В этом режиме теплоемкостью наполнителя и корпуса следует пренебречь, отчего постоянная времени нагрева значительно уменьшается до 15–20 мс.

В режиме токовых перегрузок плавкого элемента можно выделить ток, при котором плавкий элемент или его часть нагревается до температуры плавления. Этот ток называется *пограничным*  $I_{погр}$  [17]. Он является важной характеристикой предохранителя.

Отношение пограничного тока к номинальному току плавкой вставки характеризует зону нечувствительности предохранителя к перегрузкам:

$$\frac{I_{погр}}{I_{ном}} = \sqrt{\left(\frac{\tau_{плав}}{\tau_{ном}}\right)\left(\frac{1 + \alpha\tau_{ном}}{1 + \alpha\tau_{плав}}\right)}, \quad (2.12)$$

где  $\tau_{плав}$  – температура плавления металла плавкого элемента, °С.

Из уравнения (2.12) следует, что пограничный ток определяется в основном отношением температуры плавления материала плавкого элемента к номинальной температуре плавкого элемента. Номинальная температура плавкого элемента соответствует номинальному току  $I_{ном}$ .

Свойства основных материалов плавких вставок приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1– Свойства основных материалов плавких вставок

Материал вставки	Удельное сопротивление $\rho_0$ , мКОм·м	Температура, °С		Рекомендуемое отношение $I_{погр}/I_{ном}$ по [18]
		$\theta_{доп}$	$\theta_{пл}$	
Медь	0,0153	250	1083	1,6–2,0
Серебро	0,0147	480	961	1,1–1,6
Цинк	0,06	200	419	1,25–1,45
Свинец	0,21	150	327	1,25–1,45

Пограничный ток определяется по результатам испытаний плавкой вставки как среднеарифметическое из двух токов: максимального, не приводящего к плавлению в течение 1 ч, и минимального, приводящего к плавлению в течение 1 ч. Эти значения нормируются стандартом на предохранители [19]. Например, плавкие вставки предохранителей общего назначения на номинальный ток 63–100 А не должны перегорать при протекании тока  $1,3I_{\text{ном}}$  в течение 1 ч, а при токе  $1,6I_{\text{ном}}$  должны перегорать в течение 1 ч. Следовательно, пограничный ток находится примерно в этом диапазоне и имеет среднее значение  $1,45I_{\text{ном}}$ .

Из таблицы 2.1 следует, что для для серебряных плавких вставок величина  $\theta_{\text{доп}}$  самая высокая, и они имеют повышенную чувствительность. Отношение  $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}}$  определяется только допустимым нагревом плавкой вставки и может быть минимальным. Например, при  $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}} = 1,3$  температура узкого перешейка плавкого элемента из серебра при  $I_{\text{ном}}$  составляет 250 °С, а при  $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}} = 1,5$  она составляет 170 °С [17]. Следовательно, чем меньше отношение  $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}}$ , тем выше температура плавкого элемента.

Для снижения допустимой температуры плавкого элемента и, соответственно, пограничного тока, в медных плавких вставках используют металлургический эффект. Он заключается в следующем: на небольшой участок медной фольги или проволоки наносится легкоплавкий оловянный шарик. При токах перегрузки температура плавкого элемента повышается выше номинальной. Если она достигает 232 °С, олово плавится и начинается интенсивное растворение меди в расплавленном олове. В результате происходит уменьшение толщины более высокопроводящего медного слоя, отчего сопротивление плавкого элемента увеличивается. Выделяется дополнительное тепло, которое способствует дальнейшему увеличению скорости растворения меди. В результате происходит расплавление слоя олова именно в месте наплавки олова при температуре 280 °С. Предохранители с такими плавкими элементами имеют инерционную характеристику и реагируют на перегрузку  $(2-3)I_{\text{ном}}$ . В режиме перегрузок токами КЗ металлургический эффект не оказывает заметного влияния на процесс срабатывания предохранителя. Однако предохранители с такими плавкими вставками имеют нестабильные характеристики. Если хотя бы 1 раз

ток через плавкий элемент превысит значение пограничного тока, а потом снизится, то произойдет небольшое растворение меди. Характеристика предохранителя изменится. После этого процесс старения плавкой вставки значительно ускоряется.

Предохранитель может работать в 4 областях токов, указанных на рисунке 2.2.

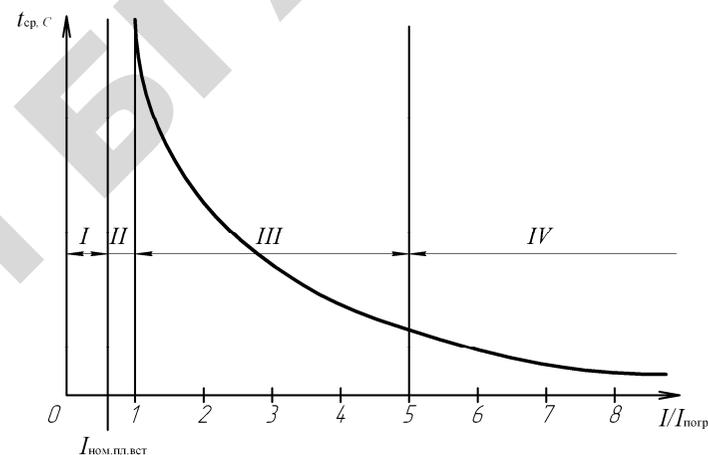


Рисунок 2.2 – Области режимов работы предохранителя:

*I* – рабочих токов (до номинального тока); *II* – допограничная ( $I_{\text{ном}} < I < I_{\text{погр}}$ );  
*III* – после пограничных перегрузок ( $I_{\text{погр}} < I < 5I_{\text{погр}}$ ); *IV* – КЗ ( $I > 5I_{\text{погр}}$ )

В области *I* (до номинального тока) предохранитель нагревается не выше номинальной температуры (см. вышеизложенный материал).

При допограничной перегрузке (область *II*) узкий перешеек плавкого элемента не расплавляется, но нагревается до значительных температур (приближается к температуре плавления).

После прекращения перегрузки состояние предохранителя возвращается в исходное. Следовательно, в этой области предохранитель не срабатывает, но его корпус нагревается до высоких температур. Происходит тепловое старение плавкой вставки.

При послепограничной перегрузке (область *III*) наибольшее время тратится на разогрев плавкого элемента по всей длине.

Наибольшей температуры достигает узкий перешеек плавкого элемента. До момента расплавления узкого перешейка температура всех частей предохранителя значительно повышается. На месте расплавленного узкого перешейка возникает электрическая дуга, происходит ее горение и гашение. Время горения дуги при токах перегрузки больше, чем при токах КЗ. Это объясняется высокой температурой наполнителя и отводом тепла через него и корпус в окружающую среду.

В режиме токов КЗ (область IV) процесс нагревания плавкого элемента до температуры плавления короткий, а время горения дуги меньше, причем дуга возникает сразу на нескольких узких перешейках.

Качественно различный характер нагревания плавкого элемента изображен на рисунке 2.3. В режиме перегрузки до высокой температуры нагревается и перегорает один узкий перешеек, а при токах КЗ – три.

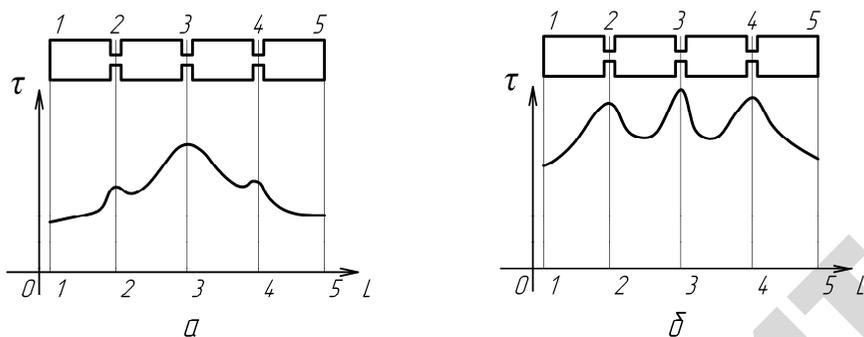


Рисунок 2.3 – Изменение температуры превышения плавкого элемента по длине в режиме послепороговой перегрузки (а) и в режиме токов КЗ (б)

На рисунке 2.4 изображены состояния плавкого элемента в различные моменты срабатывания предохранителя.

Из рисунка 2.4 видно, что при послепороговых перегрузках преддуговое время значительно и развивается одна дуга.

При токах КЗ одновременно расплавляются все перемычки и возникает несколько дуг. Появление каждой новой дуги сопровождается изменением тока и напряжения. Внутри предохранителя, где происходит горение дуги, в результате повышения давления и спекания песчинок кварцевого песка образуются песчаные камеры.

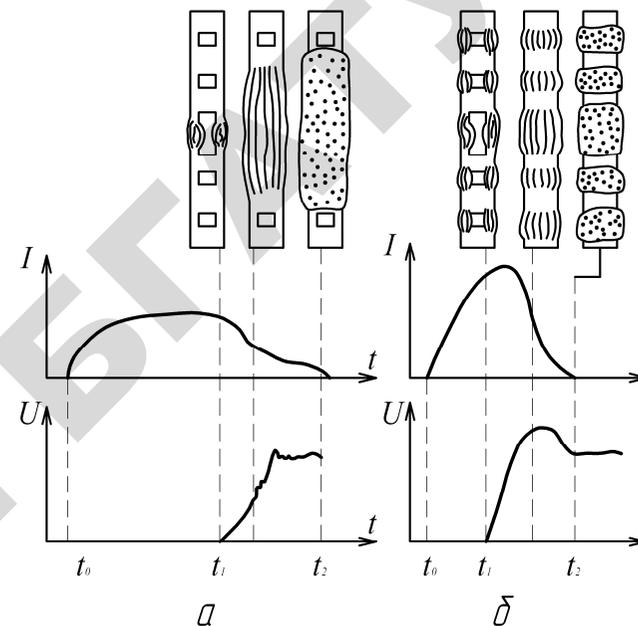


Рисунок 2.4 – Изменение действующего значения тока и напряжения на выводах предохранителя и состояния плавкого элемента в разные моменты времени при послепороговой перегрузке (а) и при токах КЗ (б) в процессе срабатывания предохранителя:  $t_0 t_1$  – преддуговое время;  $t_1 t_2$  – время дуги

При простоте конструкции плавкого предохранителя в нем наблюдаются сложные явления, которые до конца не изучены.

### 2.3. Характеристики плавких предохранителей

Держатели плавких предохранителей должны быть выражены следующими характеристиками [15]: номинальным напряжением; номинальным током; родом тока и номинальной частотой при ее наличии; номинальными потерями мощности; типоразмером; числом полюсов, если их больше одного; пиковым выдерживаемым током.

Плавкие вставки должны быть выражены следующими характеристиками [15]: номинальным напряжением; номинальным током; родом тока и номинальной частотой при ее наличии; номинальными потерями мощности; времятоковыми характеристиками;

диапазоном отключения; номинальной отключающей способностью; характеристиками пропускаемого тока; характеристиками интеграла Джоуля  $\int i^2 dt$ ; типоразмером.

Плавкие предохранители в комплекте должны быть выражены степенью защиты согласно ГОСТ 14254.

Стандартные значения номинальных переменных напряжений (в вольтах): первый ряд: 230; 400; 500; 690; второй ряд: 120; 208; 240; 270; 415; 480; 600; для постоянного тока: 110; 125; 220; 250; 440; 460; 500; 600; 750. Номинальное напряжение плавкой вставки может отличаться от номинального напряжения держателя плавкого предохранителя, для которого предназначена данная вставка. Номинальное напряжение плавкого предохранителя – наименьшее из всех номинальных напряжений его частей (держателя, плавкой вставки).

Стандартный ряд токов плавкой вставки (в амперах): 2; 4; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250. Если требуются более высокие или низкие значения токов, то они выбираются из ряда R10 по ГОСТ 8032.

Времятоковая характеристика  $t = f(I)$  предохранителя показывает зависимость времени срабатывания от тока. Для любых предохранителей время срабатывания находится в обратной зависимости от тока. Характеристики плавких предохранителей принято изображать в виде графиков в логарифмическом масштабе в связи с широким диапазоном изменения их параметров.

Время срабатывания предохранителя состоит из суммы преддугового времени и времени дуги [17]. Преддуговым временем  $t_{пред}$  считается интервал от момента начала протекания сверхтока до момента возникновения дуги. В этот период происходит нагревание плавкой вставки до температуры плавления и переход ее из твердого состояния в жидкое. Поэтому этот интервал разбивают еще на два участка [16]: время до плавления  $t_{пл}$  и время перехода из твердого состояния в жидкое  $t_{пер}$ .

Временем дуги  $t_d$  считается интервал времени между моментом появления дуги и моментом ее окончательного погасания.

Таким образом, общее время срабатывания плавкого предохранителя определяется выражением

$$t_{ср} = t_{пред} + t_d = t_{пл} + t_{пер} + t_d. \quad (2.13)$$

Времятоковая характеристика по оси времени может содержать значительный (минуты) или короткий (секунды) интервал времени.

Если по ней можно отсчитать значительное время, то это означает, что предохранитель общего назначения способен отключить не только токи КЗ, но и значительные токи перегрузки. Если на оси времени можно отсчитать короткий интервал в секундах, то предохранитель используется для отключения токов КЗ и вероятнее всего он быстродействующий.

На времятоковых характеристиках по оси времени откладывают преддуговое время или полное время срабатывания, а по оси токов – ожидаемый при КЗ ток.

Ожидаемым называется ток, который бы проходил по цепи, если бы включенный в нее плавкий предохранитель был заменен проводником, полным сопротивлением которого можно пренебречь [15]. Реальные сопротивления плавких элементов составляют от тысячных долей ома в предохранителях на большие токи до десятых долей ома в предохранителях слаботочных.

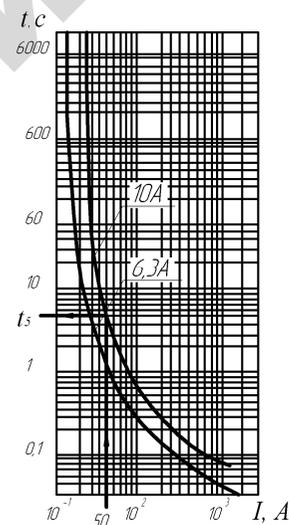


Рисунок 2.5 – Времятоковые характеристики инерционного предохранителя ППТ10 на номинальные токи плавких вставок 6,3 и 10 А

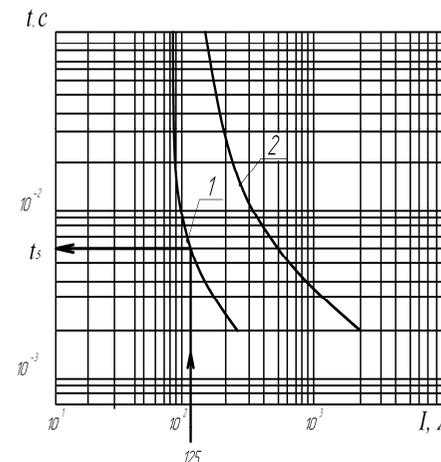


Рисунок 2.6 – Времятоковые характеристики быстродействующего предохранителя ПП50 на номинальный ток плавкой вставки 25 А:  
1 – преддуговое время; 2 – полное время срабатывания

На рисунке 2.5 изображены времятоковые характеристики предохранителя ППТ10 с плавкими вставками на 6,3 и 10 А.

Предохранитель предназначен для защиты оперативных и сигнальных цепей при перегрузках и коротких замыканиях.

На рисунке 2.6 изображены времятоковые характеристики плавкого предохранителя ПП50 с плавкой вставкой на 25 А, 110 В.

Кривая 1 (рисунок 2.6) соответствует преддуговому времени, а кривая 2 – полному времени срабатывания предохранителя. Кривые с преддуговым и полным временем срабатывания обычно изображают только для быстродействующих предохранителей (предохранитель ПП50 предназначен для защиты преобразователей и блоков питания).

Конструктивно плавкие вставки предохранителей ППТ10 и ПП50 похожи: фарфоровая трубочка с металлическими колпачками на торцах, внутри – кварцевый песок и плавкие элементы из меди разной формы и сечения. Однако плавкая вставка предохранителя общего назначения ППТ10 имеет массу 10 грамм и размеры  $\varnothing 11,4 \times 41$  мм, а быстродействующего предохранителя ПП50 – массу 2,7 грамм при размерах  $\varnothing 6,3 \times 31,8$  мм. Уменьшение массы плавкой вставки и сечения плавкого элемента обеспечило большее быстродействие предохранителю ПП50.

На время срабатывания плавкой вставки влияет температура окружающей среды, условия отвода тепла от контактов предохранителя, температура плавкого элемента до момента возникновения перегрузки, естественный износ (старение) плавкого элемента.

Параметры срабатывания предохранителя имеют отклонение порядка  $\pm(10-15)\%$  по току и  $\pm(10-25)\%$  по времени. Это следует иметь в виду при проверке предохранителей на селективность.

Учитывая технологический разброс параметров предохранителя и его разное время срабатывания с холодного и прогретого состояний, времятоковые характеристики предохранителя обычно задают в виде двух линий для одного значения тока.

На рисунке 2.7 изображены в виде двух линий времятоковые характеристики каждой плавкой вставки предохранителя ППНИ.

Время срабатывания предохранителя обычно определяется из графических зависимостей  $t_{cp} = f(I)$ . Но его можно найти из аналитических выражений. Например, для предохранителя ПН2 [16] в интервале времени от 0,005 до 10 с время срабатывания плавкой вставки находят из выражения

$$t = \frac{2500}{\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)^{4,8}} \quad (2.14)$$

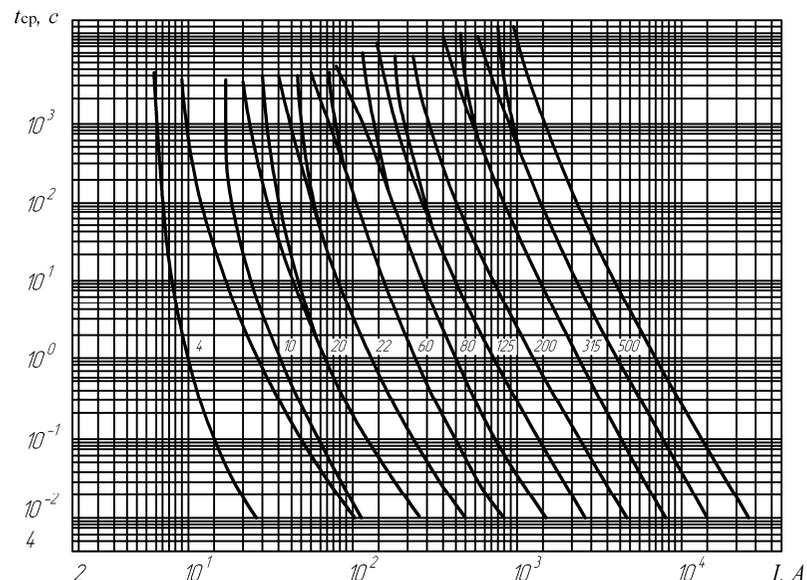
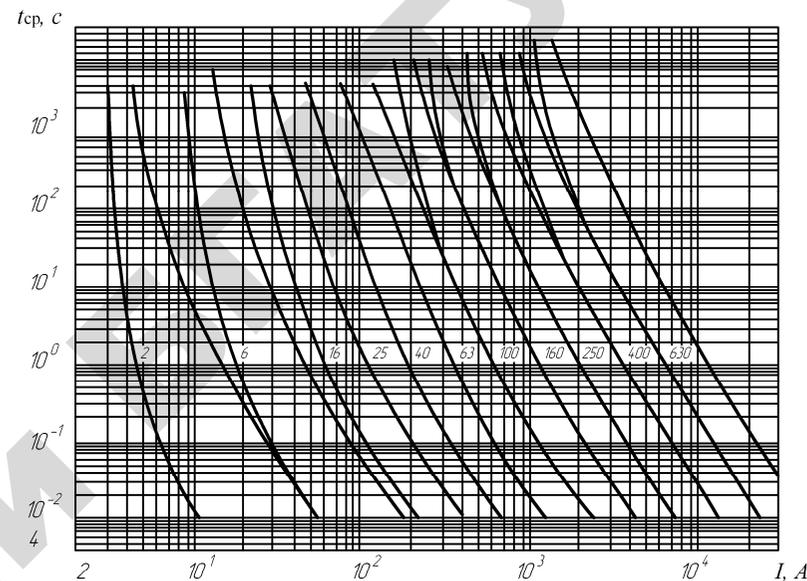


Рисунок 2.7 – Времятоковые характеристики предохранителей ППНИ

Диапазон отключения, отключающая способность и категория применения являются важными характеристиками плавкого предохранителя.

Диапазон отключения указывается первой буквой в обозначении типа плавкой вставки:

$g$  – с отключающей способностью во всем диапазоне;

$a$  – с отключающей способностью в части диапазона.

Вторая буква в обозначении типа плавкой вставки указывает категорию применения.

Пример:  $G$  – предохранитель общего назначения;  $R$  – для защиты полупроводниковых приборов;  $M$  – для защиты цепей электродвигателей;  $L$  – для защиты линий с небольшими расчетными значениями тока КЗ и т. д.

Пример двухбуквенного обозначения:

$gG$  – плавкие вставки общего назначения с отключающей способностью во всем диапазоне;

$gM$  – плавкие вставки для защиты цепей двигателей с отключающей способностью во всем диапазоне;

$aM$  – плавкие вставки для защиты цепей двигателей с отключающей способностью в части диапазона;

$gD$  – плавкие вставки с задержкой времени с отключающей способностью во всем диапазоне;

$gN$  – плавкие вставки без задержки времени с отключающей способностью во всем диапазоне;

$aR$  – предохранитель быстродействующий для защиты полупроводниковых приборов с плавкой вставкой в части диапазона нагрузок (при кратности тока более 3);

$gR$  – предохранитель быстродействующий для защиты полупроводниковых приборов с плавкой вставкой во всем диапазоне нагрузок.

Для защиты конденсаторных установок используют плавкие предохранители, обладающие высокой отключающей способностью (HRS), категории применения  $gL/gG$ , гарантирующие надежное отключение конденсаторной батареи при токовых перегрузках и КЗ.

Характеристика токоограничения (или пропускаемого тока) предохранителя показывает зависимость пропускаемого тока КЗ от ожидаемого тока КЗ.

Под *пропускаемым током КЗ* понимается максимальное мгновенное значение, достигаемое током в процессе отключения, когда плавкая вставка своим срабатыванием предотвращает достижение током максимально возможного в других условиях значения [15].

Если пропускаемый предохранителем ток равен ожидаемому току КЗ, то предохранитель не обеспечивает токоограничения (рисунок 2.8, кривая 1).

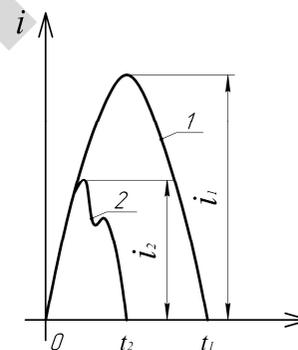


Рисунок 2.8 – Изменение тока при отключении предохранителя без токоограничения (кривая 1) и с токоограничением (кривая 2)

Если же пропускаемый предохранителем ток меньше ожидаемого тока КЗ, то предохранитель обеспечивает токоограничение (рисунок 2.8, кривая 2). В обеспечении токоограничения состоит существенное достоинство плавких предохранителей.

Из рисунка 2.8 видно, что при отсутствии токоограничения ток КЗ достигает амплитудного значения, а при токоограничении обрывается раньше.

В токоограничивающих предохранителях при токах КЗ дуга гасится и ток КЗ прекращается в течение первого полупериода (кривая 2 на рисунке 2.8).

Мгновенное значение пропускаемого тока зависит от фазы тока в момент возникновения тока КЗ. Фаза тока в свою очередь зависит от индуктивных и активных сопротивлений в цепи тока КЗ. При коэффициенте мощности  $\cos\varphi_{КЗ} = 0,208$  пропускаемый

максимальный ток может даже превышать в 1,5 раза ожидаемый ток [17]. Во внутренних сетях предприятий  $\cos\varphi_{КЗ}$  близок к единице, и наблюдается только уменьшение тока КЗ.

Следует отметить также, что токоограничивающее действие плавких вставок, имеющих медные плавкие элементы с металлургическим эффектом, ниже, чем плавких вставок с серебряными плавкими элементами. На характеристике токоограничения по оси ожидаемого тока КЗ указывается его максимальное значение, которое называется *предельным током отключения*. При таком токе КЗ еще гарантируется целостность плавкой вставки, а при больших токах КЗ – не гарантируется.

На рисунке 2.9 приведены характеристики токоограничения для предохранителей серии ПП50 с номинальным током плавкой вставки 16 А и предохранителей общего назначения серии ППНИ.

Из рисунка 2.9 можно установить, что предельный ток отключения для предохранителей серии ПП50 составляет 10 кА, а для предохранителей серии ППНИ  $I_{пр.откл} = 100$  кА.

Пропускаемый ток для заданной плавкой вставки зависит от величины тока КЗ: чем больше ток КЗ, тем больше пропускаемый ток, причем с увеличением ожидаемого тока КЗ токоограничение возрастает. Например, из рисунка 2.9 следует, что при  $I_{ож} = 10^3$  А для предохранителя ПП50 пропускаемый ток равен  $10^3$  А, т. е. токоограничения нет. При  $I_{ож} = 10^4$  А пропускаемый ток  $I_{п} = 2 \cdot 10^3$  А, т. е. уменьшение тока КЗ произошло в 5 раз ( $10^4 / 2 \cdot 10^3 = 5$ ).

*Коэффициент токоограничения* есть отношение ожидаемого тока КЗ к пропускаемому току КЗ. Чем меньшее значение имеет ток токоограничения при одном и том же ожидаемом токе КЗ, тем лучшие характеристики токоограничения имеет предохранитель.

Очень быстрое токоограничение не желательно. Оно приводит к возникновению перенапряжений на выводах предохранителя в момент прекращения тока в цепи. Напряжение, появляющееся на выводах плавкого предохранителя после отключения тока, называется *восстанавливающимся напряжением* [15].

Пиковое значение перенапряжения при отключении тока короткого замыкания не должно превышать значение амплитуды номинального напряжения в 1,5–1,7 раза. Во внутренних сетях предприятий перенапряжения не значительны из-за больших сопротивлений элементов схемы.

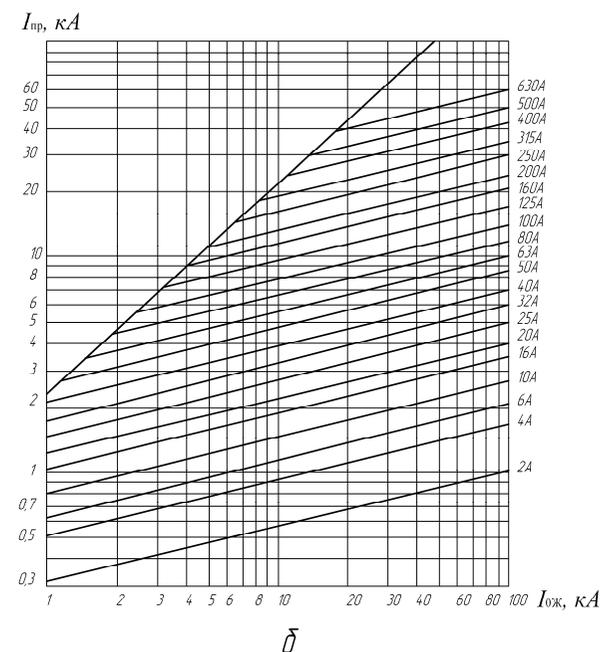
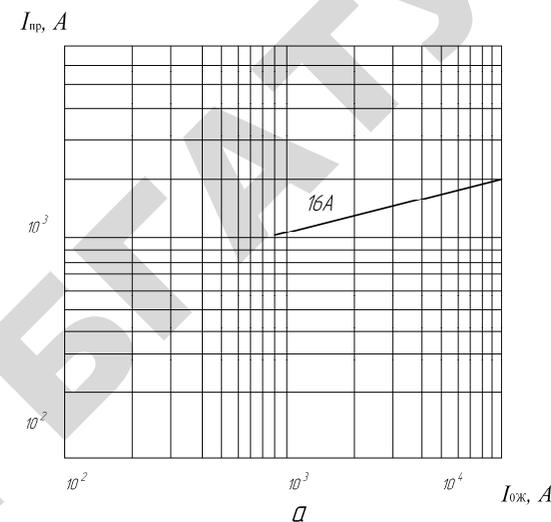


Рисунок 2.9 – Характеристики токоограничения быстродействующего предохранителя ПП50 с номинальным током плавкой вставки 16 А (а) и предохранителей общего назначения серии ППНИ (б)

Интегральная характеристика – зависимость интеграла Джоуля  $\int i^2 dt$  от ожидаемого тока КЗ. Интеграл Джоуля характеризует тепловое действие тока за период срабатывания предохранителя. Понятие интеграла Джоуля очень важно для быстродействующих предохранителей.

На рисунке 2.10 приведены характеристики полного интеграла Джоуля быстродействующих предохранителей серии ПП157.

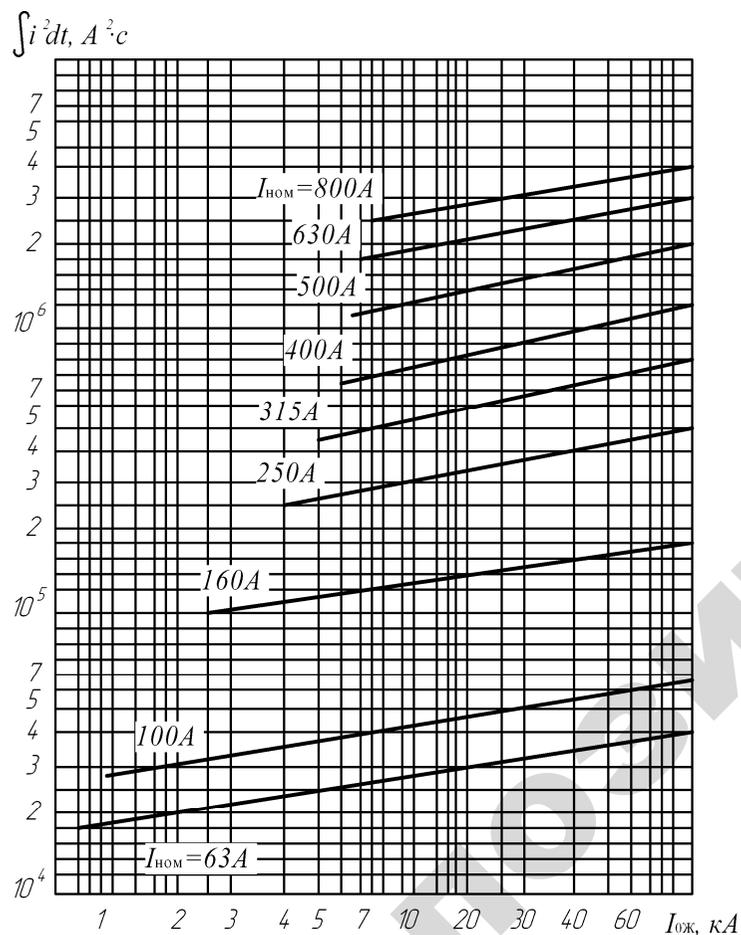


Рисунок 2.10 – Характеристики полного интеграла Джоуля быстродействующих предохранителей серии ПП157 на номинальное напряжение 660 В

Интегральная характеристика предохранителей приводится для области токов КЗ, превышающих номинальный в 10 раз и более.

С увеличением тока КЗ интеграл Джоуля большинства предохранителей увеличивается. Это объясняется более значительным увеличением  $I_{КЗ}^2$  по сравнению с уменьшением времени срабатывания предохранителя от увеличения тока КЗ. В современных предохранителях для защиты полупроводниковых приборов интеграл Джоуля может не изменяться, например, в предохранителях PSC gR/AR Корневского ЗНА.

Наименьшее значение преддугового интеграла предохранителя определяется по формуле [20]

$$I^2 t_{\min} = B^2 S_0, \quad (2.15)$$

где  $B$  – постоянная Мейера, зависящая от удельной теплоты плавления и испарения материала плавкого элемента (для алюминия  $B = 3,4 \cdot 10^4 A^2 \cdot c / мм^2$ ; для меди –  $10^5 A^2 \cdot c / мм^2$ ; для серебра –  $8 \cdot 10^4 A^2 \cdot c / мм^2$ );

$S_0$  – наименьшее поперечное сечение плавкого элемента предохранителя,  $мм^2$ .

Преддуговой интеграл (интеграл плавления) следует рассматривать как необходимую и достаточную величину тепла для расплавления узкого перешейка плавкого элемента предохранителя в адиабатическом режиме нагрева (при  $I_{КЗ}/I_{вст.ном} \geq 10$ ). Полный интеграл отключения предохранителей при уменьшении тока КЗ также уменьшается и существенно зависит от рабочего напряжения цепи КЗ.

Зависимость интеграла Джоуля от напряжения имеет вид

$$I^2 t_{откл} = I^2 t_{\min} \left[ 1 + a \left( \frac{U}{U_n} \right) \right]^b, \quad (2.16)$$

где  $U_n$  и  $U$  – номинальное и рабочее напряжения предохранителя;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты. Например, для предохранителя ПП158  $a = 4,56$ ;  $b = 0,8$ ;  $I^2 t_{\min} = 3,8 \cdot 10^4 A^2 \cdot c$  [20].

## 2.4. Конструкции плавких предохранителей, их плавких элементов и характеристика наполнителей

Любой предохранитель имеет *плавкий элемент* – часть плавкой вставки, предназначенную для расплавления при срабатывании плавкого предохранителя.

Плавкий элемент крепится в *плавкой вставке* – части плавкого предохранителя, включающей в себя плавкий элемент и заменяемой после срабатывания плавкого предохранителя.

*Контакт плавкого предохранителя* – две или несколько токоведущих частей, предназначенных для обеспечения непрерывности цепи между плавкой вставкой и соответствующим держателем.

*Держатель плавкой вставки* – съемная часть плавкого предохранителя, предназначенная для удержания плавкой вставки.

*Держатель плавкого предохранителя* – комбинация основания плавкого предохранителя с держателем плавкой вставки.

*Основание плавкого предохранителя* – несъемная часть плавкого предохранителя, снабженная контактами, выводами, при необходимости, оболочками.

*Вывод* – токоведущая часть плавкого предохранителя, предназначенная для электрического присоединения к внешним цепям.

*Указатель срабатывания (индикатор)* – устройство, предназначенное для указания срабатывания плавкого предохранителя.

*Боек* – механическое устройство, составляющее часть плавкой вставки, которое при срабатывании плавкого предохранителя освобождает энергию, необходимую для срабатывания другого аппарата или указателя или для обеспечения внутренней блокировки [15].

Существует большое число различных конструкций плавких предохранителей. В силовом электрооборудовании получили наибольшее распространение четыре разновидности конструкций, обусловленные в основном условиями монтажа и особенностями электрооборудования: 1) вставляемые в губки основания; 2) резьбовые пробочные; 3) для крепления болтами; 4) фланцевые.

Рассмотрим эти конструкции на примерах распространенных серий предохранителей. На рисунке 2.11 изображена конструкция вставляемого в губки основания предохранителя ПН2. Аналогичную конструкцию имеют предохранители ПП31, ПП32, ППН, ППНИ и другие, с некоторыми особенностями, связанными с формой и размерами основания.

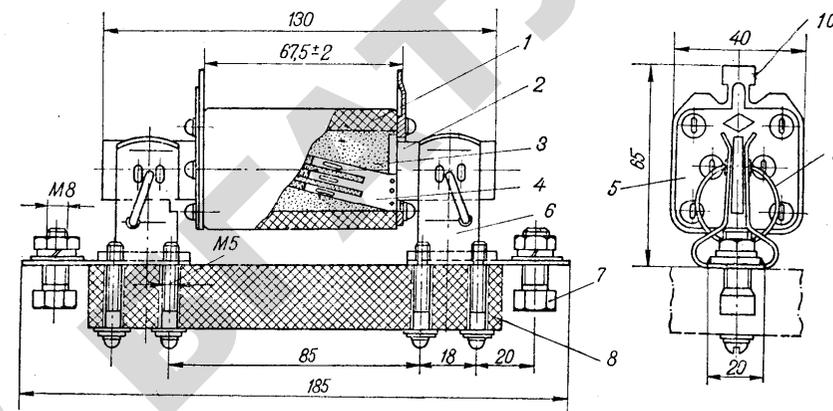


Рисунок 2.11 – Предохранитель ПН2-100:

1 – фарфоровый корпус плавкой вставки; 2 – контактный нож плавкой вставки; 3 – наполнитель (кварцевый песок); 4 – плавкий элемент; 5 – крышка плавкой вставки; 6 – контактные стойки основания предохранителя; 7 – болт для присоединения проводников; 8 – основание предохранителя; 9 – пружина; 10 – фигурные выступы

К основанию 8 (рисунок 2.11) прикреплены контактные стойки 6, в которые вставляется плавкая вставка. Она имеет фарфоровый прямоугольный корпус 1, внутри которого расположен плавкий элемент 4 и наполнитель 3 (кварцевый песок). По торцам плавкая вставка имеет крышки 5 с асбестовым уплотнением, заканчивающиеся контактными ножами 2. Кольцеобразная пружина 9 поджимает губки контактных стоек, обеспечивая их контакт с выводами плавкой вставки. Крышки 5 имеют фигурные выступы 10, за которые можно достать (снять) плавкую вставку под напряжением, используя специальную рукоятку.

На рисунке 2.12 изображена конструкция резьбового предохранителя ПРС.

Предохранитель ПРС имеет зажимы 1 и 8 для присоединения проводников. Зажимы расположены внутри пластмассового (стеатитового) корпуса. Зажим 1 имеет вывод к неподвижному контакту (винту 7), а зажим 8 – к резьбовому цилиндру (контактной гильзе 6). Плавкая вставка имеет фарфоровый корпус 4, внутри которого находятся наполнитель (кварцевый песок), плавкий элемент и указатель срабатывания. Одним торцом плавкая вставка прижимается к контакту 7, а вторым – к гильзе, закрепленной в съемной (выворачиваемой) фарфоровой головке 3. Головка имеет застекленное

отверстие 2, через которое виден указатель срабатывания плавкой вставки. Указатель представляет собой шайбу с окрашенным торцом, припаянную к одному выводу вспомогательного плавкого элемента, второй вывод которого припаян к противоположному выводу плавкой вставки. Шайба подпружинена. При перегорании основного плавкого элемента перегорает и плавкая вставка указателя срабатывания. Шайба в этом случае не держится у торца плавкой вставки и отходит от него. Через застекленное отверстие головки 2 видно, что предохранитель сработал.

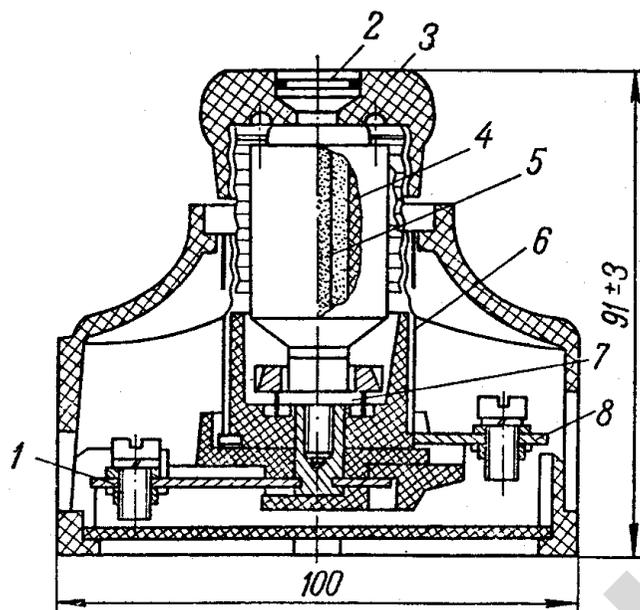


Рисунок 2.12 – Предохранитель ПРС:

1, 8 – зажимы для присоединения проводников; 2 – застекленное отверстие головки; 3 – съемная контактная фарфоровая головка; 4 – корпус плавкой вставки; 5 – плавкий элемент; 6 – контактная гильза; 7 – винт

Болтовое крепление выводов плавкой вставки имеют все современные предохранители ПП31, ПП32, ППН и большинство быстродействующих предохранителей.

На рисунке 2.13 изображена конструкция быстродействующего плавкого предохранителя серии ПП59.

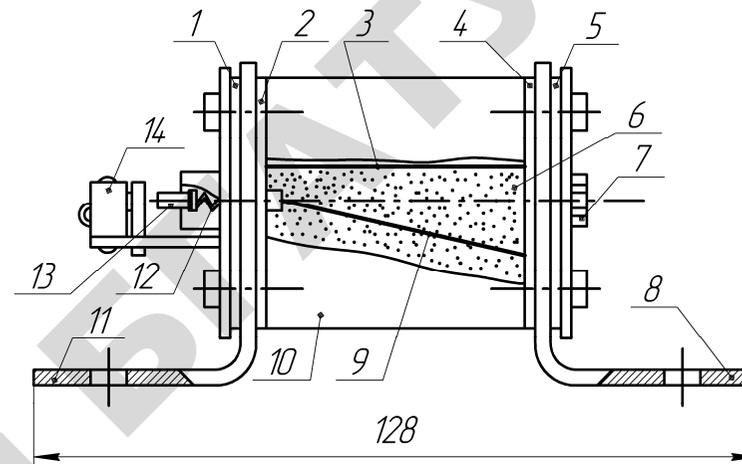


Рисунок 2.13 – Быстродействующий предохранитель серии ПП59 на ток 250 А: 1, 2, 4, 5 – изоляционные прокладки; 3 – основной плавкий элемент; 6 – наполнитель (кварцевый песок); 7 – отверстие с заглушкой для заполнения предохранителя; 8, 11 – медные выводы; 9 – дополнительный плавкий элемент сигнализатора срабатывания; 10 – ультрафарфоровый корпус; 12 – пружина; 13 – указатель срабатывания; 14 – контакт для связи с системой сигнализации и управления

Быстродействующий предохранитель ПП59 имеет ультрафарфоровый корпус 10, медные оцинкованные стойки-выводы 8 и 11, через которые он болтами присоединяется в электрическую цепь. Внутри корпуса расположен наполнитель 6, основной плавкий элемент 3 и дополнительный плавкий элемент 9 указателя срабатывания 13. По обе стороны выводов 8 и 11 расположены изоляционные уплотняющие прокладки 1, 2, 4 и 5. Имеется отверстие 7 с заглушкой для заполнения предохранителя кварцевым песком. Указатель срабатывания 13 расположен напротив контактного узла 14. Указатель срабатывания 13 в виде штыря удерживается пружиной 12. При срабатывании предохранителя перегорают основной и дополнительный плавкие элементы. Указатель срабатывания 13 под действием пружины 12 воздействует на контакт 14, посылая сигнал в схему управления и сигнализации.

Фланцевая конструкция предохранителя возникла по аналогии с фланцевой конструкцией силовых диодов и тиристоров в виде таблеток (дисков). Такая конструкция обеспечивает предохранителю малые размеры и массу. Она хорошо вписывается

в блоки «диод–выпрямитель» или «тиристор–выпрямитель». Например, быстродействующий предохранитель ПП71 фланцевой конструкции крепится на роторном преобразователе турбогенератора ТВВ-300 [17].

Плавкая вставка такого предохранителя имеет мембранный (дисковый) плавкий элемент, зажатый между латунными фланцами. Он поддерживается по краям держателями, изолированными от фланцев эпоксидной замазкой и изолированными шайбами. Корпус заполнен кварцевым песком.

Важнейшим конструктивным элементом плавкой вставки является плавкий элемент.

Для плавких элементов предохранителей наиболее подходит *серебро*. Это обусловлено тем, что серебро имеет высокую и стабильную электрическую проводимость, наиболее подходящие физические и технологические характеристики. Плавкие вставки из него имеют максимальные сроки службы по сравнению с плавкими вставками из других материалов. Однако серебро – дорогой материал. Его используют только для быстродействующих предохранителей.

*Медь* также широко используется для изготовления плавких вставок. Медь – хороший проводник тока. Но она начинает интенсивно окисляться при температуре выше 180 °С. Ее окись стабильна вплоть до температуры плавления меди, однако вследствие механических напряжений, возникающих при изменении температуры плавкого элемента, окисная пленка растрескивается и отслаивается. Сечение плавкого элемента уменьшается, а нагрев возрастает в связи с увеличением сопротивления плавкого элемента. Срок службы плавкого элемента уменьшается. Для увеличения срока службы приходится выполнять антикоррозийное покрытие плавкого элемента, применять плавкие элементы большего сечения, снижать температуру плавкого элемента. Последнее приводит к увеличению пограничного тока и отношения  $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}}$  примерно до 1,8, что ухудшает защитные возможности предохранителя.

*Фосфористая бронза* (сплав меди с цинком с добавлением фосфора) успешно используется в плавких предохранителях ППНИ.

*Цинк и свинец* имеют низкую температуру плавления (420 и 327 °С соответственно). Предохранители с такими плавкими элементами имеют невысокие температуры корпуса. Плавкие элементы из цинка или свинца имеют повышенные сечения из-за высоких удельных сопротивлений этих материалов (см. таблицу 2.1). Цинк

имеет высокий потенциал ионизации (9,4 электрон-вольт), что способствует гашению дуги. При плавлении цинка на его внешней поверхности образуются прочные пленки окисла, внутри которых может находиться жидкий металл. Предохранитель при этом пропускает ток. Значение пограничного тока становится неопределенным. Такие явления наблюдаются при перегрузках. В этом состоит большой недостаток цинковых элементов. Цинковые плавкие элементы применялись ранее в предохранителях ПР2 и используются теперь в предохранителях на низкие напряжения. Для увеличения срока службы цинковые элементы нуждаются в защитном покрытии.

*Алюминий* является перспективным материалом для плавких вставок предохранителей. Имеет температуру плавления ниже, чем у меди (658 °С против 1083 °С). Это позволяет снизить температуру плавкого элемента и корпуса предохранителя. Большее удельное сопротивление, чем у меди, требует применения больших сечений. Но главное, плавкий элемент из алюминия имеет более стабильные характеристики, чем из меди. Это обусловлено наличием на поверхности алюминия тонкой окисной пленки, защищающей его от коррозии вплоть до температуры плавления. При отключении токов КЗ влияющие пленки оксида не существенно. И только при токах, близких к пограничному, может наблюдаться длительное протекание тока внутри плавкой вставки (в трубке из оксида). Оксидная пленка имеет более высокую температуру плавления. Применение металлургического эффекта устраняет этот недостаток. Технологические трудности, связанные с пайкой и сваркой алюминия, успешно преодолены. Разработана серия предохранителей общего применения ППЗ1, все токоведущие части и плавкий элемент которых могут быть выполнены из алюминия и его сплавов [20].

По форме плавкие элементы могут быть различными. Для малых токов их изготавливают из проволоки, для больших токов – из фольги (ленты) различной формы, с прямоугольными, круглыми или косоугольными вырезами, образующими сужения (узкие перемычки).

Вид защитной характеристики предохранителя во многом зависит от отношения поперечного сечения широкой части плавкого элемента к поперечному сечению узкого перешейка. Для быстродействующих предохранителей это отношение более 5. Число узких перешейков больше у предохранителей, рассчитанных на большие напряжения. При токах КЗ дуги загораются на всех

перешейках, отчего более быстро гаснет дуга и нарастает напряжение. При больших номинальных токах плавкие элементы устанавливаются параллельно друг другу. Это улучшает условия гашения дуги за счет большей поверхности контакта плавкого элемента с наполнителем.

На рисунке 2.14, *а* изображен цинковый плавкий элемент *1* предохранителя ПР2 с косоугольными вырезами *2*, образующими узкие перешейки; на рисунке 2.14, *б* – медный плавкий элемент № 5 предохранителя ПН2. Он имеет поперечные вырезы или отверстия *3* и продольный вырез *4*, делящий плавкий элемент на две параллельные ленты. В средней части плавкий элемент имеет оловянные шарики *5* для создания металлургического эффекта. По краям плавкая вставка изогнута.

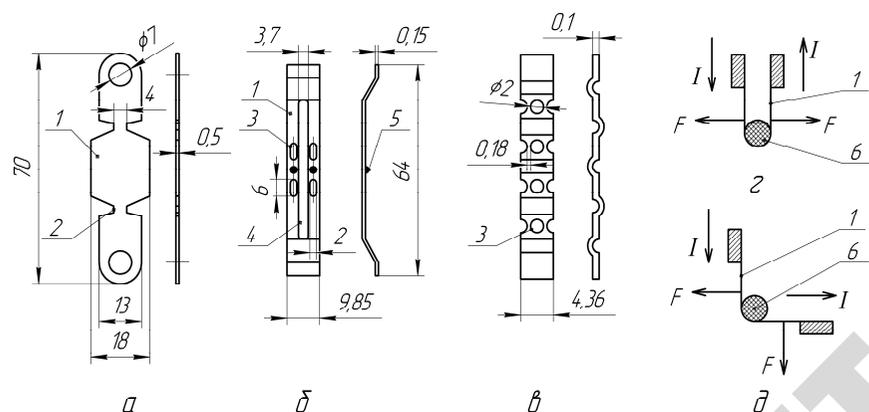


Рисунок 2.14 – Плавкие элементы предохранителей ПР (*а*), ПН2 (*б*), быстродействующего предохранителя ПП59 (*в*) и других быстродействующих пленочных предохранителей с электродинамическим ускорением разрыва плавкого элемента (*г, д*):

- 1* – плавкий элемент; *2* – косоугольный вырез; *3* – поперечные вырезы или отверстия; *4* – продольный вырез; *5* – оловянный шарик; *б* – корундовая поверхность на металлическом стержне

Изгибы имеют многие плавкие элементы. Например, серебряная плавкая вставка быстродействующего предохранителя ПП59 (рисунок 2.14, *в*) имеет 5 изгибов. Изгибы позволяют устранить внутренние механические напряжения в плавком элементе при их нагреве.

В некоторых быстродействующих предохранителях плавкий элемент напыляют на корундовую поверхность *б*, имеющую внутренний металлический стержень. Плавкий элемент помещают

в кварцевый песок. Плавкому элементу придают такую форму (рисунок 2.14, *г, д*), при которой электродинамические силы *F*, возникающие при токах КЗ, разрывают плавкий элемент *1* еще до того, как он расплавится. Участок плавкой вставки на металлическом стержне стержне *б* выполняется меньшего сечения. При токах перегрузки электродинамические силы малы и форма плавкого элемента не существенна – он плавится в суженном месте или в местах действия металлургического эффекта.

Ускоренное срабатывание предохранителя достигается так же при перегрузках и КЗ за счет пружины. Она разрывает плавкий элемент при размягчении металла раньше, чем расплавится узкое место плавкого элемента.

Важным элементом современных плавких вставок является наполнитель (дугогасящая среда).

Основные функции наполнителя:

- 1) отвод тепла от плавкого элемента в продолжительном режиме работы и за счет этого повышение номинального тока по сравнению с плавкой вставкой без наполнителя;
- 2) обеспечение надежности гашения дуги вследствие отбора энергии дуги при плавлении и испарении наполнителя, что обеспечивает образование фульгуритных трубок, быстрое спадание тока до нуля и уменьшение габаритов плавкой вставки;
- 3) образование фульгуритных трубок предотвращает слияние дуг, возникающих на перешейках, что повышает надежность гашения дуги;
- 4) внутри фульгуритных трубок возникает давление газа, что способствует гашению дуги;

5) увеличение преддугового интеграла Джуля благодаря улучшению теплоотдачи от перешейков;

6) ослабление теплового удара от действия дуги, который может вызвать растрескивание корпуса. Ослабление достигается благодаря высокому отношению теплового сопротивления наполнителя к его теплоемкости. Тепловой удар достигает корпуса уже после погасания дуги. Таким путем ослабляются термические и механические воздействия на корпус плавкой вставки.

Наиболее широко используется в качестве наполнителя *сухой кварцевый песок* с содержанием окиси кремния  $SiO_2$  не менее 99 %. Зерна кварца должны иметь размер 0,1–0,5 мм. Один грамм кварцевого песка может аккумулировать энергию 2 кДж.

Применение в предохранителях речного неочищенного песка с содержанием до 2 % примесей нежелательно. Примеси приводят к образованию токопроводящих мостиков и затрудняют гашение дуги. Поэтому неочищенный речной песок не применяется в плавких предохранителях.

Вместо кварцевого песка может применяться мел ( $CaCO_3$ ). Для придания рыхлости наполнителю его иногда смешивают с асбестовыми волокнами. Мел более предпочтителен, так как он не образует токопроводящих путей. Он разлагается с выделением углекислого газа  $CO_2$  и оксида кальция  $CaO$  – тугоплавкого материала с высоким электрическим сопротивлением. Реакция разложения мела проходит с поглощением энергии дуги и способствует ее гашению. Широкое применение мела ограничивается его высокой стоимостью по сравнению с кварцевым песком.

В предохранителях с наполнителем гашение дуги основано на интенсивной деионизации дуги в узких щелях между песчинками наполнителя. Слой сыпучего наполнителя обеспечивает защиту деталей предохранителя от термического воздействия дуги. Достоинством кварцевого песка в качестве наполнителя является его химическая нейтральность и термическая стойкость до температуры плавления. Он имеет достаточно высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с другими сыпучими материалами, низкую стоимость. Гашение дуги в наполнителе происходит более интенсивно, чем на воздухе, а перенапряжения относительно невелики. Практически все предохранители, используемые в силовом электрооборудовании, имеют плавкие вставки с наполнителем из кварцевого песка.

Ранее выпускался предохранитель ПР2 без наполнителя. В нем дугогасящая среда образовывалась в результате выделения газов из корпуса при горении дуги. В качестве газогенерирующего материала корпуса использовалась фибра. При воздействии дуги фибра выделяет водород и углекислый газ, давление в трубке повышается. В этих условиях происходит быстрая деионизация дугового промежутка и дуга гаснет. Однако размеры предохранителя, вследствие более низкой теплоотдачи от плавкого элемента, значительны. Эти предохранители были вытеснены более совершенными предохранителями с наполнителями.

## 2.5. Классификация предохранителей

Предохранители классифицируются в основном по назначению, быстродействию, конструктивным признакам.

По назначению предохранители делятся на следующие группы: 1) общего (промышленного) назначения; 2) сопутствующие; 3) для защиты силовых полупроводниковых приборов; 4) приборные; 5) бытовые; 6) для транспортных установок и т. д.

*Предохранители общего (промышленного) назначения* предназначены для защиты электрооборудования, обладающего достаточной термической и электродинамической стойкостью (электродвигателей, трансформаторов, кабелей и т. п.). Предохранители общего назначения отключают значительные токи перегрузки, начиная с пограничного тока до максимального отключаемого тока КЗ. Они имеют плавкие вставки типа *g* с отключающей способностью в полном диапазоне токов отключения. К ним относятся предохранители серии ПН2, НПН, НПР, ПРС, ПП31, ПП32, ППН, ППНИ. Предохранители общего (промышленного) назначения должны обслуживаться квалифицированным персоналом.

*Сопутствующие предохранители* предназначены для защиты автоматических выключателей или контакторов (электромагнитных пускателей) с тепловыми реле при токах КЗ, превышающих их отключающую способность. Сопутствующий предохранитель должен либо ограничить ток КЗ до допустимого значения для выключателя или контактора, либо отключить цепь раньше, чем разойдутся контакты выключателя или контактора. Такие предохранители имеют повышенное время срабатывания при токах до  $(6-10)I_{ном}$  и быстрое срабатывание при больших токах. Они имеют плавкие вставки типа *a* с отключающей способностью в части диапазона токов отключения и не могут быть использованы для отключения малых токовых перегрузок. Для этих целей применяются тепловые расцепители автоматических выключателей или тепловые реле, работающие совместно с электромагнитными пускателями. Сопутствующими являются предохранители серии ПП26 на токи от 25 до 630 А и напряжение 400 В. Предохранители, предназначенные для защиты электрооборудования в режимах КЗ, применяются как сопутствующие совместно с тепловыми реле, защищающими электрооборудование от токов перегрузки.

*Предохранители для защиты силовых полупроводниковых приборов* отличаются высоким быстродействием и токоограничи-

вающей способностью. Их появление было обусловлено малой термической стойкостью полупроводниковых приборов. В мощных силовых преобразовательных агрегатах предохранители устанавливаются в цепи каждого тиристора или диода, в менее мощных – для группы полупроводниковых приборов. Для быстрого отыскания сработавшего быстродействующего предохранителя они снабжены указателями срабатывания и вспомогательными контактами. Быстродействующими являются предохранители ПНБ5, ПНБ7, ПП57, ПП59, ПП40, ПП50, ПП60, ПП71 и др.

*Приборные предохранители* предназначены для защиты электрических приборов и аппаратов, устройств радиоэлектронной техники от сверхтоков. Их плавкие вставки выполняются без наполнителя или с наполнителем и содержат проволочный плавкий элемент в стеклянном или фарфоровом корпусе. По торцам плавкая вставка имеет металлические колпаки или лепестки для пайки. Они имеют низкую отключающую способность и рассчитаны на ток до 25 А.

К приборным предохранителям относятся также самовосстанавливающиеся предохранители и термопредохранители, основанные на ином принципе действия.

*Бытовые предохранители* предназначены для защиты проводок и бытовых электроустановок от токов короткого замыкания. Это резьбовые предохранители на ток до 20 А. Такими являются предохранители серии Е27 (старое обозначение Ц27) и Е40 (цифры обозначают диаметр резьбовой части в мм). Они отличаются более простой конструкцией, чем предохранители ПРС, меньшей ценой и могут обслуживаться неквалифицированным персоналом.

*Предохранители для транспортных установок* отличаются от обычных повышенной вибро- и ударостойкостью.

В цепях управления электрооборудованием применяются предохранители типов ППТ, ПТ, ПК30, ПР1М и др. Предохранители типа ППТ выпускаются на напряжение до 220 В и ток до 10 А. Плавкие вставки их имеют обозначение ВТФ-6 на ток 6 А и ВТФ-10 на ток 10 А.

Предохранители типа ПТ можно использовать в сети 380/220 В. Их плавкие вставки в первом габарите следующие: 0,5; 1; 2; 4; 5; 6; 8; 10; 16; 25; 40; 50 А и во втором габарите – до 80 А.

Предохранители ПК30 могут применяться в сетях напряжением до 250 В. Номинальный ток их плавких вставок: 0,15; 0,25; 0,5; 1; 2 А.

Предохранители ПР1М имеют неразборные пластмассовые вставки на 2; 4; 6; 8 и 10 А, а также пластмассовую рукоятку для снятия и установки предохранителя под напряжением.

По быстрдействию предохранители делятся на инерционные, нормального быстродействия и быстродействующие. Ориентировочно критерий оценки быстродействия предохранителей определяется по выражению [17]:

$$K_6 = \frac{t_5}{\sqrt{I_{\text{НОМ}}}}, \quad (2.17)$$

где  $t_5$  – преддуговое время срабатывания предохранителя при пятикратном токе (по отношению к номинальному току плавкой вставки); при приближенной оценке вместо преддугового времени берут полное время срабатывания.

Если  $K_6 \geq 1$ , то предохранитель можно отнести к *инерционным*; если  $K_6 \leq 0,01$ , то предохранитель *быстродействующий*; если  $K_6$  находится в интервале от 0,01 до 1, то предохранитель *нормального быстродействия*.

Например, для предохранителя ППТ10 с плавкой вставкой на 10 А (см. рисунок 2.5)  $t_5 \approx 5$  с при токе  $5 \cdot 10 = 50$  А. Тогда  $K = \frac{5}{\sqrt{10}} = 1,58$ . Следовательно, предохранитель ППТ10 инерционный.

Для предохранителя ПП50 (см. рисунок 2.6) с плавкой вставкой на 25 А  $t_5 = 0,006$  с, а  $K = \frac{0,006}{\sqrt{25}} = 0,0012$ . Следовательно, предохранитель ПП50 быстродействующий.

Все плавкие предохранители по виду времятоковых характеристик делятся на диапазоны отключения  $g$  и  $a$  (первая буква в обозначении типа плавкой вставки). Категория применения плавкого предохранителя обозначается второй буквой в обозначении типа плавкой вставки (см. п. 2.3).

По конструкции различают плавкие вставки разборные и неразборные. Разборные допускают замену плавкого элемента на месте эксплуатации или в ремонтной мастерской. У неразборных плавких вставок после перегорания плавкого элемента требуется замена всей плавкой вставки. Современные плавкие вставки предохрани-

телей требуют высоких технологий изготовления и поэтому их разбирать не рекомендуется.

По форме корпуса выделяют плавкие вставки с цилиндрическим корпусом (ПР2, НПН) или в виде прямоугольного параллелепипеда (ПН2, ПП57, ПП32, ППН и др.).

По наличию наполнителя различают предохранители с наполнителем и без наполнителя. Современные плавкие вставки, применяемые в силовом электрооборудовании, имеют наполнитель в виде кварцевого песка или мела.

По конструкции контактов плавкие вставки бывают с цилиндрическими контактами, с ножевыми контактами, с креплением под болт, с фланцевыми контактами (плавкая вставка в виде таблетки).

По наличию основания предохранители различают с собственным изоляционным основанием, допускающим установку предохранителя как на изоляционной, так и на металлической плоскости (резьбовые предохранители и др.); без основания, но с контактами, предназначенными для установки на изоляционной панели (большинство современных предохранителей); без основания, предназначенные для крепления на проводящих проводниках (шинах) комплектного устройства (старая серия ПДС), все современные предохранителями ПП31, ПП32, ППН, ПП57, ПП59 и другие.

Предохранители классифицируют также по способу охлаждения, по материалу плавких элементов, по наличию указателя срабатывания или контактов сигнализации и т. д.

## 2.6. Развитие и совершенствование плавких предохранителей<sup>1</sup>

К **первому поколению предохранителей** общего (промышленного) назначения относятся серии ПР2, ПН2, ПДС.

*Серия ПР2* изготавливалась по ГОСТ 3041-45 на токи плавких вставок от 6 до 1000 А и напряжение 220, 380 или 500 В в двух габаритах. Сегодня выпускается в ограниченном диапазоне токов. Отличительные особенности этих предохранителей: корпус плавкой вставки газогенерирующий цилиндрический из фибры; сменные плавкие элементы переменного сечения из цинка; плавкая вставка

без наполнителя; предохранители позволяют производить разборку и замену плавкого элемента непосредственно на месте эксплуатации. Бронзовые колпачки выводов плавкой вставки развинчиваются без применения специального инструмента. Эти предохранители имеют значительные габариты при невысокой отключающей способности и поэтому вытесняются предохранителями других серий. В новых разработках применять их не рекомендуется.

*Серия ПН2* была рассчитана на токи плавких вставок от 30 до 600 А при напряжении до 500 В. Отключающая способность предохранителей высокая (100 кА). Предохранители широко применялись в комплектных распределительных щитах, в блоках «рубильник–предохранитель». В новых разработках применять их не рекомендуется, хотя их продолжают изготавливать. Начали выпускать предохранители серии ПН2 в 50-х годах XX века.

*Серия ПДС* – резьбовые предохранители для установки только на токоведущих шинах комплектного устройства приклепыванием или привинчиванием. Они изготавливались на токи плавких вставок 1–600 А. В настоящее время они не выпускаются. Резьбовая конструкция позволяла менять плавкие вставки под напряжением. Но приклепывание или привинчивание к шинам одного штыревого вывода усложняло замену оснований предохранителя. Штыревой вывод не позволял установить предохранитель на изоляционных и металлических панелях. Плавкий элемент удерживался в керамической головке с застекленным отверстием, через который был виден указатель срабатывания плавкой вставки. Такая конструкция головки резьбового предохранителя сохранилась в следующем поколении резьбовых предохранителей серии ПРС, ПП23, ПП24.

Ко **второму поколению** отечественных предохранителей для силового электрооборудования относятся серии НПН, НПР, ПРС.

*Предохранители серии НПН* имели неразборную плавкую вставку цилиндрической формы. Корпус ее изготавливался из стекла, внутри были встроены наполнитель и плавкий элемент из медной ленты или проволоки с оловянным шариком. Изготавливались на токи плавких вставок 6–60 А, напряжение 500 В. Предназначены для внутрицеховых установок.

Курский завод «Электроаппарат» выпускает предохранители второго поколения НПН2-60 с предельным током отключения 10 кА. Номинальные токи плавких вставок: 6,3; 10; 16; 20; 25; 31,5; 40; 63 А. Климатическое исполнение УЗ, ТЗ, УХЛ4.

<sup>1</sup> На примере российских производителей.

Предохранители серии НПП имели аналогичное предохранителям НПН назначение, но отличались большими токами плавких вставок (60–400 А) при напряжении до 500 В. Использовались в распределительных устройствах, блоках «рубильник–предохранитель». В отличие от предохранителей НПН имели фарфоровый корпус, который можно было разобрать в условиях ремонтной мастерской.

Серия ПРС – предохранители резьбовые с пластмассовым корпусом. Основные детали этих предохранителей заимствованы от предохранителей ПДС. В отличие от них предохранители серии ПРС могут устанавливаться на изоляционных и металлических основаниях. Изготавливаются на токи плавких вставок 1–100 А при напряжении 500 В переменного тока и 440 В постоянного тока. Конструкция предохранителя ПРС рассмотрена на рисунке 2.12.

Предохранители совершенствуют с целью удешевления, повышения надежности работы, взаимозаменяемости, придания им новых свойств, увеличения функциональных возможностей.

Стремление к унификации и взаимозаменяемости электрических аппаратов, изготовленных в различных странах, привело к разработке нового поколения предохранителей. Такими можно считать резьбовые предохранители ПП23 и ПП24. Они унифицированы с предохранителями фирмы Siemens. Плавкие вставки этих предохранителей рассчитаны на токи 2–100 А при напряжении 660 В переменного тока и 440 В постоянного тока.

Совершенствование плавких предохранителей для силовых цепей с целью увеличения их надежности и снижения стоимости привело к созданию **третьего поколения** плавких предохранителей серии ПП31, ПП32, ППН, ППНИ.

Отличительная особенность предохранителей промышленного назначения *серии ПП31* состоит в том, что все токоведущие части его выполнены из алюминия и его сплавов. Номинальный ток плавких вставок – от 32 до 1000 А при 660 В переменного тока и 440 В постоянного тока. Отключающая способность – 100 кА при меньших габаритах и массе, чем у предохранителей ПН2.

Курский завод «Электроаппарат» выпускает плавкие предохранители общего назначения *серии ПП32*, предназначенные для защиты электрооборудования и электрических сетей от перегрузок и КЗ взамен предохранителей ПН2. Плавкие вставки предохранителей выпускаются в трех габаритах: ПП32-31 на номинальные токи от 20 до 100 А; ПП32-35 на токи от 80 до 250 А и ПП32-37 на токи

от 250 до 400 А. Отключающая способность – 100 кА. Выпускаются с бойком и свободным контактам, только с бойком, с указателем срабатывания или без сигнализации. По основным конструктивным размерам и монтажным исполнениям предохранители серии ПП32 подобны предохранителям серии ППН.

Предохранители *серии ППН* выпускаются Кореневским заводом низковольтной аппаратуры. Отличаются пониженными потерями мощности на 1 полюс по сравнению с другими предохранителями общего назначения. Защищают электрооборудование, провода и кабели от чрезмерных перегрузок и от токов КЗ. Предназначены для замены предохранителей серии ПН2 во внутренних электрических сетях. Рассчитаны для работы в сетях переменного тока 50 и 60 Гц, 380 и 500 В, а также в сетях постоянного тока 220 и 400 В. Номинальная отключающая способность – 50 кА, климатическое исполнение – ТЗ, УХЛЗ, УХЛ2. Плавкая вставка имеет фарфоровый прямоугольный корпус, который крепится на собственном изоляционном основании, или на изоляционном основании комплектующего устройства, или на проводниках комплектующего устройства (рисунок 2.15).

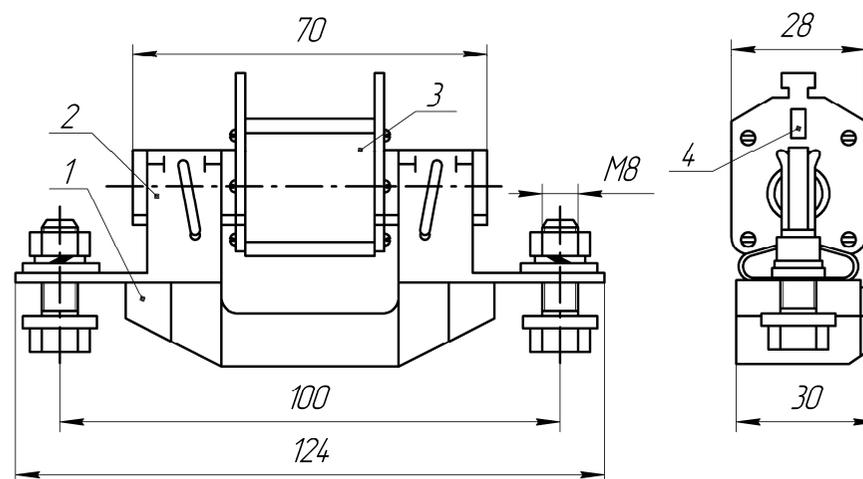


Рисунок 2.15 – Общий вид предохранителя ППН33 для плавких вставок на ток от 2 до 160 А с креплением на основании:  
1 – основание; 2 – держатель плавкой вставки (контактные выводы);  
3 – плавкая вставка; 4 – указатель срабатывания

Предохранители этой серии могут иметь указатель срабатывания, боек и свободные контакты. Номинальные действующие значения токов плавких элементов от 2 до 160 А (тип ППН-33), от 40 до 250 А (тип ППН-35), от 40 до 400 А (тип ППН-37), от 100 до 630 А (тип ППН-39) и от 500 до 1250 А (тип ППН-41). Для извлечения плавкой вставки из основания под напряжением служит специальная съемная рукоятка, а плавкая вставка имеет на торцах специальные выступы.

*Предохранители плавкие серии ППНИ типа gG* (рисунок 2.16) общего применения предназначены для защиты промышленных электроустановок и кабельных линий от чрезмерной перегрузки и короткого замыкания. Выпускаются на номинальные токи от 2 до 630 А, используются в однофазных и трехфазных сетях напряжением до 660 В и частотой 50 Гц.



Рисунок 2.16 – Плавкий предохранитель ППНИ

Преимущества предохранителей ППНИ следующие: благодаря современной конструкции, технологии изготовления и качеству применяемых материалов снижены потери мощности по сравнению с предохранителями ПН2 более чем на 30 %; основание держателя (изолятор) выполнено из армированной термореактивной пластмассы, стойкой к механическим воздействиям, перепадам температуры и динамическим ударам; габариты предохранителей ППНИ на 10–20 % меньше, чем предохранителей ПН2; в ассортименте продукции «ИЭК» представлен весь стандартный ряд плавких вставок с номинальными токами от 2 до 630 А, всего 65 позиций в 5 габаритах; токоограничение плавкой вставки позволяет снизить ожидаемый ток короткого замыкания в несколько раз. Это позволяет защитить установку от чрезмерных перегрузок. Широкий диапазон рабочих температур (от –45 до +60 °С) позволяет применять предохранители ППНИ в разных климати-

ческих поясах; высокая отключающая способность (при 660 В – 50 кА, а при 500 В – 120 кА).

Большое развитие получили *быстродействующие предохранители*. Первая серия быстродействующих предохранителей ПНБ2 отличалась от предохранителя ПН2 только материалом плавки элемента: вместо меди применили серебро. В дальнейшем была создана вторая серия быстродействующих предохранителей – ПНБ5 на токи от 40 до 630 А при напряжениях от 220 до 1250 В постоянного и переменного тока. Предохранители имели указатель срабатывания в отдельном стеклянном корпусе и вспомогательные блок-контакты для дистанционного управления.

Аналогичную конструкцию имеют более совершенные *предохранители серии ПНБ7*, выпускаемые Курским заводом «Электроаппарат» [8]. Они имеют номинальные токи от 25 до 1000 А для сети переменного тока до 660 В. Монтаж может производиться на собственном изоляционном основании, на основании комплектных устройств, на шинах комплектных устройств. Могут иметь указатель срабатывания и свободные контакты.

К третьему поколению быстродействующих предохранителей можно отнести *серии ПП57 и ПП59, ПП40, ПП50, ПП60* и другие, в которых плавкий элемент указателя срабатывания помещен в тот же корпус, что и основной плавкий элемент. Конструкция подобного предохранителя рассмотрена на рисунке 2.13.

*Предохранитель серии ПП40* с неразборными плавкими вставками типа gR из серебра характеризуются очень высокой отключающей способностью – 200 кА. Выпускаются на токи от 25 до 630 А в цепи переменного тока до 660 В и постоянного тока 440 В.

*Предохранители серии ПП50* с неразборными плавкими вставками типа αR предназначены для защиты преобразователей роботов «Бета». Номинальные токи 16, 25 и 40 А в сети 220 и 110 В постоянного тока. Плавная вставка состоит из фарфорового корпуса. Контактные выводы выполнены в виде колпачков с никелированным покрытием, к которым припаяны плавкие элементы, выполненные из меди. Внутренний объем плавкой вставки заполнен наполнителем.

*Быстродействующие предохранители серии ПП57* выпускаются [20] на номинальные токи 100, 250, 400, 630 А и 800 А с номинальными плавкими вставками от 25 до 800 А. Изготавливаются без сигнализации или с указателем срабатывания и свободными контактами. Климатическое исполнение У3, УХЛ3 и Т3.

Номинальное напряжение от 220 В (вставки на 25, 40, 63, 100, 160, 250 А) до 2000 В (вставка на 315 А при  $I_{откл.макс} = 50$  кА). Предельная отключающая способность предохранителей от 50 до 125 кА на переменном токе и 100 кА – на постоянном токе.

Разработана перспективная серия *быстродействующих предохранителей ПП59* [20] для применения в полупроводниковых преобразователях для электролиза, электропечей, электротранспорта, тиристорного электропривода, стационарных систем возбуждения и т. п.

Техническое задание на серию ПП59 существенно превосходит требования, предъявляемые к предохранителям серии ПП57.

Предохранители ПП59 имеют 3 габарита:

- 1) на напряжение 380 В переменного тока и 230 В постоянного тока;
- 2) на напряжение 660 В переменного тока и 460 В постоянного тока;
- 3) на напряжение 1250 В переменного тока и 1050 В постоянного тока. Номинальные токи плавких вставок от 250 до 1600 А.

Предохранители ПП59 отличаются высокой отключающей способностью – 200 кА при  $\cos\varphi = 0,1$  и 150 кА постоянного тока при постоянной времени отключаемой цепи  $T = 35$  мс. Имеют наименьший отключаемый ток  $2,3I_{ном}$  переменного тока и  $10I_{ном}$  постоянного тока.

При внутренних КЗ в преобразователях предохранители работают селективно при двух и более параллельных вставках в плечах моста при токах КЗ до  $50I_{ном}$ . При трех и более параллельных ветвей ток КЗ может быть свыше  $50I_{ном}$ .

Предохранители способны работать с циклической нагрузкой по ГОСТ 18142-80 при среднеквадратичной нагрузке в рабочем периоде равной  $0,85I_{ном}$  (для предохранителя 1-го габарита) и  $0,9I_{ном}$  (для остальных габаритов).

В последнее время наблюдается тенденция изготовления *пленочных быстродействующих предохранителей*. Плавкий элемент в таких предохранителях образован напылением серебра на изоляционную подложку из корунда. Последний наносится на торец металлического П-образного стержня. Несмотря на большую плотность номинального тока, плавкий элемент не перегревается, так как тепло интенсивно отводится внутрь стержня. Стержень размещен в оболочке с кварцевым песком. При токе КЗ тонкая металлическая пленка мгновенно испаряется. Под действием магнитного поля П-образного контура возникающая дуга отбрасывается от стержней внутрь кварцевого песка и в нем гаснет.

Совершенствование предохранителей направлено на устранение их недостатков. Одним из недостатков предохранителей как аппаратов коммутаций электрической цепи является отсутствие дистанционного управления.

Конструкции *управляемых предохранителей* разнообразны, но все они выполнены на основе механического разрыва плавкого элемента по сигналу дистанционного управления (например, от защитного устройства) [16]. В одних конструкциях разрезается или разрывается плавкий элемент, в других – контакт, включенный последовательно с плавкой вставкой.

Одним из основных недостатков плавких предохранителей является однократность действия. После каждого срабатывания плавкую вставку надо заменять новой. Создание предохранителя многократного действия является актуальным вопросом. Для изготовления такого предохранителя можно использовать плавкую вставку из жидкого металла. В качестве жидкого металла используют эвтектику гелия, натрия, калия, ртути. Под действием тока КЗ жидкий металл испаряется, вызывая взрывообразное повышение давления в дугогасительной камере. Пары металла обладают значительным сопротивлением и поэтому ток резко ограничивается, а возникшая дуга гаснет. После остывания и конденсации паров металла цепь плавкой вставки самопроизвольно восстанавливается за 2–4 мс. При непроходящем КЗ такой предохранитель будет многократно отключать и повторно включать электрическую цепь, что нежелательно. Этого недостатка можно избежать, если применять его с другим коммутационным аппаратом, например, с автоматическим выключателем, который срабатывает после отключения тока КЗ, в бестоковую паузу.

Плавкие предохранители многократного действия с жидким плавким элементом получили название *жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП)*. У ЖСП дугогасительной камерой является диэлектрическая втулка, герметизирующая плавкий элемент. Это исключает его окисление и способствует стабилизации защитной характеристики предохранителя. У ЖСП отношение  $I_{погр}/I_{ном}$  не превышает 1,1, а для плавких элементов из серебра и меди оно значительно выше. В связи с этим ЖСП пригодны для защиты электрооборудования от перегрузок, особенно для защиты полупроводниковых приборов.

Первые публикации об опытных образцах ЖСП появились в 1971–1975 гг. за рубежом. Достигнута отключающая способность ЖСП – 200 кА, номинальный ток – 800 А, срок службы – 30 лет.

Конструкция опытного образца российского ЖСП подробно описана в [21]. Опытный образец имел диэлектрическую втулку из оксида бериллия длиной 20 мм. Длина суженной части втулки составляла 3 мм, диаметр канала – 0,7 мм. В суженной части канала устанавливается тугоплавкий электрод. Ток подводится от контактного вывода через тугоплавкий электрод, жидкий металл – к металлическому фланцу, далее через корпус демпфирующего устройства – ко второму контактному выводу.

При токе перегрузки или КЗ происходило испарение жидкого металла в полость сильфона, разрыв цепи и возникновение электрической дуги с последующим гашением дуги в месте соприкосновения жидкого металла с тугоплавким электродом.

Разновидностью специальных быстродействующих предохранителей с очень малым временем срабатывания 0,2–0,7 мс и большой отключающей способности являются *взрывные предохранители*. Они применяются в цепях больших постоянных токов и напряжений. В них токоведущая вставка разрушается в аварийном режиме под действием взрывного заряда. Контроль тока в цепи осуществляется датчиком тока. При КЗ датчик тока выдает сигнал на импульсный трансформатор, от которого питается взрывное устройство, размещенное в корпусе плавкой вставки.

## 2.7. Общие вопросы выбора плавких предохранителей

Плавкие предохранители для внутренних сетей выбирают по следующим параметрам: 1) номинальному напряжению; 2) номинальному току плавкой вставки; 3) номинальному току предохранителя; 4) назначению; 5) конструктивному исполнению и способу монтажа и другим особенностям, указанным в его условном обозначении или паспорте.

Выбранный предохранитель проверяют: 1) по отключающей способности; 2) по чувствительности к однофазному току КЗ; 3) на селективность с другими предохранителями или автоматическими выключателями; 4) на селективность с контактором или электромагнитным пускателем.

Быстродействующие предохранители дополнительно выбирают по интегралу Джоуля, при этом учитывается, что для одного полупроводникового прибора выбирается предохранитель, или для ветви преобразователя с несколькими параллельными полупровод-

никовыми приборами. Быстродействующие предохранители не проверяются на селективность с контактором или электромагнитным пускателем.

Для любых предохранителей условие выбора по напряжению имеет вид

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{с}}, \quad (2.18)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение предохранителя, В;

$U_{\text{с}}$  – напряжение сети, в которую включается предохранитель, В.

Рекомендуется выбирать предохранители на то напряжение сети, в которой он будет работать, т. е.  $U_{\text{ном}} = U_{\text{с}}$ . Если выбирать предохранитель на большее напряжение, то следует иметь в виду, что получится предохранитель с большими габаритами и его время срабатывания увеличивается.

Выбор серии предохранителя, его типоразмера и других особенностей производят в следующем порядке.

1. *Определяют тип предохранителя по назначению* (общего назначения; для защиты полупроводниковых приборов; бытовые; приборные; сопутствующие). Назначение определяет функциональные признаки предохранителя по времятоковым характеристикам, конструкции и другим признакам.

Например, предохранители общего назначения имеют плавкие вставки типа  $G$ , а быстродействующие – типа  $R$  (см. п. 2.3).

2. *Определяют требуемый тип защитной характеристики*. По типу защитной характеристики плавкие предохранители бывают: типа  $g$  – с отключающей способностью в полном диапазоне токов отключения, способные отключать токи перегрузки и КЗ, и типа  $a$  – с отключающей характеристикой в части диапазона токов отключения (нечувствительны к перегрузкам; способны отключать только токи КЗ), как указано в п. 2.3.

Например, сопутствующие предохранители имеют характеристику и назначение, которое записывается  $aG$ , а общего назначения –  $gG$ .

3. *Выбирают конкретные серии предохранителей, обеспечивающие выполнение пунктов 1 и 2*, пригодные для работы под напряжением сети, в которую включается предохранитель.

Например, выбираются предохранители общего назначения ( $G$ ) с времятоковыми характеристиками типа  $g$ . Ими являются предохранители серий ПН2, ППН, ППНИ.

Из этих серий выпускаемых предохранителей выбирается одна серия, наиболее экономичная по потерям мощности, габаритам и массе, стоимости или другим критериям, имеющая номинальное напряжение предохранителей, равное (или большее) напряжению сети (лучше равное, чем большее).

При выборе серии обращают внимание на области применения предохранителей.

Например, из указанных серий выбирается предохранитель серии ППНИ, предназначенный для вводно-распределительных устройств, шкафов и распределительных пунктов, шкафов низкого напряжения и ящиков управления.

4. Далее обращаются к структуре условного обозначения предохранителей выбранной серии. Например, для серии ППНИ структура условного обозначения плавкой вставки приведена ниже.

При выборе серии и типоразмера предохранителя обращают внимание на:

1) способ монтажа и вид присоединения проводников к выводам предохранителя (монтаж на собственном изоляционном основании; на изоляционном основании комплектующего устройства; на проводниках комплектного устройства);

2) наличие указателя срабатывания (наличие бойка) и свободных контактов (если требуется дистанционно передать сигнал о срабатывании предохранителя);

3) степень защиты (обычно IP00) и на климатическое исполнение и категорию размещения (УХЛ3, УХЛ2, Т3);

4) диапазон рабочих температур;

5) номинальную отключающую способность предохранителя.

Если плавкий предохранитель монтируется на собственном изоляционном основании (держателе), то требуется выбрать это основание. Например, для предохранителей ППНИ используется держатель предохранителя типа ДП, типоразмер которого определяется по типоразмеру плавкой вставки предохранителя (всего 5 типоразмеров в 5 габаритах).

Например, предохранители ППНИ имеют следующую структуру условного обозначения:

ППНИ –  $X_1X_2$  габ.  $X_3X_4$ ,  $X_5X_6X_7A$ :

ППНИ – серия предохранителя;

$X_1X_2$  – шифр номинального тока: 33 – номинальный ток предохранителя 160 А; 35 – 250 А; 37 – 400 А; 39 – 630 А;

габ.  $X_3X_4$  – габарит: 00; 0; 1; 2; 3;

$X_5X_6X_7A$  – номинальный ток плавкой вставки, А (от 2 до 630 А, см. таблицу 2.3).

Предохранители ППН имеют следующую структуру условного обозначения:

ППН –  $X_1X_2$  –  $X_3X_4$  –  $X_5X_6X_7X_8$ :

ППН – серия предохранителя;

$X_1X_2$  – шифр номинального тока: 31 – номинальный ток предохранителя 100 А; 33 – 160 А; 35 – 250 А; 37 – 400 А; 39 – 630 А;

$X_3$  – способ монтажа и вид присоединения проводников к выводам предохранителя: 2 – монтаж на собственном изоляционном основании; 5 – монтаж на изоляционном основании комплектующего устройства; 7 – монтаж на проводниках комплектного устройства;

$X_4$  – наличие указателя срабатывания, бойка и свободных контактов: 0 – без указателя срабатывания, без бойка и без свободных контактов; 1 – с указателем срабатывания, со свободными контактами; 3 – с указателем срабатывания, без бойка, без свободных контактов;

$X_5X_6$  – степень защиты ОО – IPOO;

$X_7X_8$  – климатическое исполнение и категория размещения (УХЛ3; Т3; УХЛ2).

Например, требуется выбрать: предохранитель общего назначения; расчетный ток плавкой вставки 125 А; для монтажа в шкафу на шинах; с указателем срабатывания и свободным контактом; для установки под навесом в умеренном климате.

Получится следующий тип предохранителя: ППН–33–70–ООХЛ2;  $I_{\text{вет.ном}} = 125$  А,  $U_{\text{ном}} = 380$  В, 50 Гц.

## 2.8. Выбор номинального тока плавкой вставки предохранителя

Допустимый нагрев предохранителя обеспечивается при номинальном токе плавкой вставки. Следовательно, при продолжительном режиме работы и не изменяющемся по величине токе нагрузки (рисунок 2.17, а) номинальный ток плавкой вставки должен быть равен (или больше) рабочему току цепи  $I_{\text{раб}}$ :

$$I_{\text{н.пл.вст}} \geq I_{\text{раб}} \quad (2.19)$$

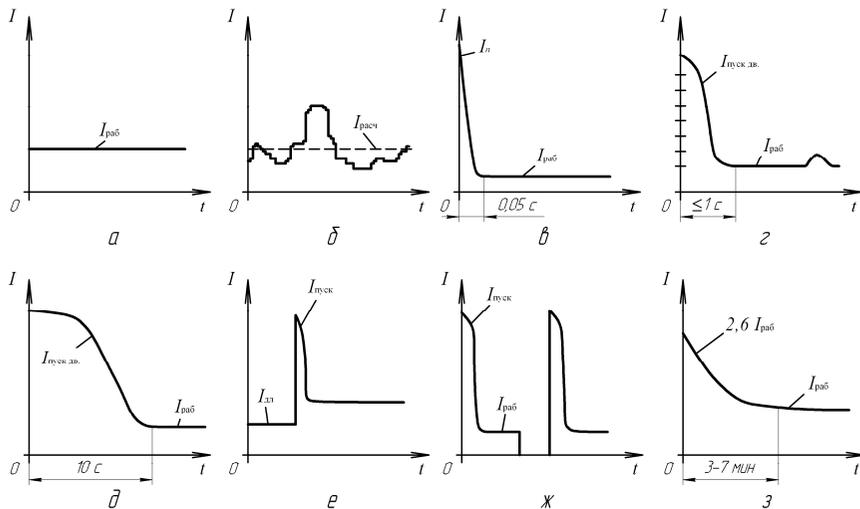


Рисунок 2.17 – Нагрузочные диаграммы типовых токовых нагрузок электрической цепи:

*а* – электрический водонагреватель; *б* – групповое включение без электродвигателей; *в* – групповое включение осветительных приборов с энергосберегающими лампами; *г, д* – одиночный асинхронный электродвигатель; *е* – группы электрических приемников с электродвигателем; *ж* – одиночный электродвигатель в режиме частых включений; *з* – лампы типа ДРЛ

В остальных случаях требуется учитывать токовую нагрузочную диаграмму защищаемой цепи (рисунок 2.17).

При продолжительном режиме работы и изменяющемся по величине токе нагрузки без пусковых токов вычисляется расчетный  $I_{расч}$  (эквивалентный) ток (рисунок 2.17, б). Номинальный ток плавкой вставки в этом случае должен быть

$$I_{н.пл.вст} \geq I_{расч} K_{зап}, \quad (2.20)$$

где  $K_{зап}$  – коэффициент запаса, учитывающий увеличение рабочего тока относительно расчетного тока;  $K_{зап} = 1,1-1,2$ .

При включении осветительных установок наблюдаются кратковременные (менее 0,05 с) броски тока, превышающие рабочие токи в 8–14 раз (рисунок 2.17, в). Аналогичные броски тока имеют место при включении контакторов и электромагнитов переменного тока. При частых включениях таких электрических приборов необходимо завышать ток плавкой вставки и вычислять его по уравнению (2.20).

При пуске асинхронных электродвигателей наблюдаются значительные пусковые токи различной продолжительности и частоты, превышающие номинальные токи в 4,5–7,5 раза (рисунок 2.17, г).

В этом случае

$$I_{н.пл.вст} = \frac{I_{пуск.дв}}{\alpha}, \quad (2.21)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от времени действия пусковых токов и частоты их проявления.

Если продолжительность пуска менее 1 с и пусков в час не более 15, то  $\alpha = 2,5$  (рисунок 2.17, г).

Если продолжительность пуска от 1 до 10 с и пусков в час не более 15, то  $\alpha$  изменяется от 2,5 до 1,75 (рисунок 2.17, д).

Если электродвигатель работает в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками, то  $\alpha$  уменьшают до 1,6 (рисунок 2.17, ж). Чем чаще производится включение и отключение электродвигателей, тем больший должен быть запас надежности предохранителей. В этих режимах медные плавкие элементы плавких вставок подвержены значительным термическим напряжениям и быстро стареют. Это обстоятельство является причиной, по которой плавкие предохранители с медными плавкими элементами не рекомендуются для защиты цепей асинхронных двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Многими исследованиями установлено, что старение плавких вставок предохранителей происходит при токах, равных половине тока плавления [16]. Следовательно, для стабильности характеристик кратковременные перегрузки по току не должны превышать половины тока плавления (срабатывания) плавкой вставки. Руководствуясь этими соображениями и зная время разбега электродвигателя, находим допустимую кратность тока плавкой вставки. Например, для плавких вставок типа ППНИ зависимость  $t = f(k_i)$  построена на рисунке 2.18, причем линия *AB* примерно соответствует плавким вставкам от 40 до 125 А, а линия *BC* – плавким вставкам от 160 до 400 А.

Например, при времени пуска  $t_n = 2$  с и при выборе предполагаемого предохранителя ППНИ до 125 А на линии *AB* получаем  $k_{i\text{граф}} = 3,8$  (рисунок 2.18). Следовательно, ток срабатывания  $I_{ср} = 3,8 I_{н.пл.вст}$ .

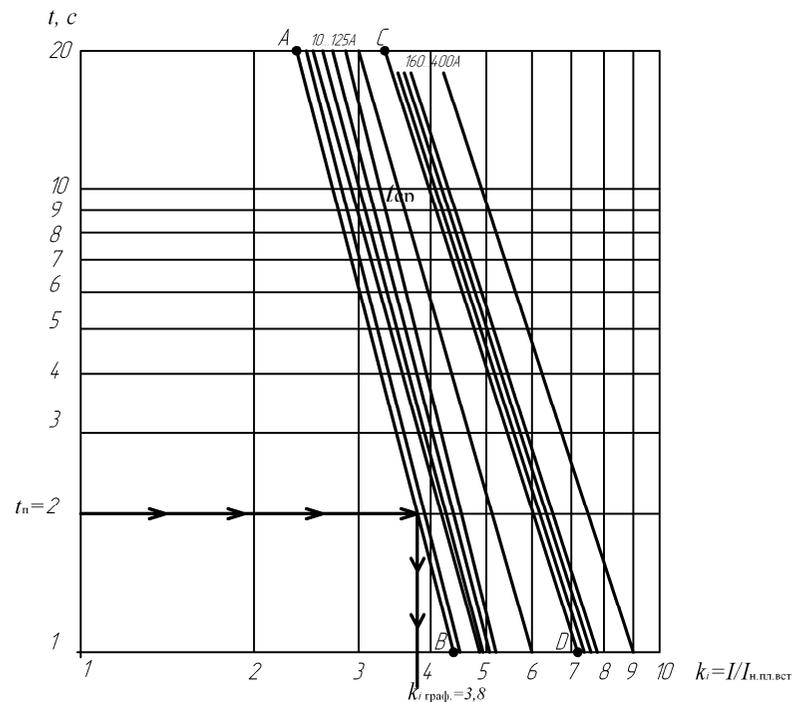


Рисунок 2.18 – Зависимость времени срабатывания предохранителей серии ПНИ от кратности тока перегрузки плавкой вставки

Пользуясь приведенным критериям, имеем:

$$I_{\text{пуск.дв}} = 0,5I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot 3,8I_{\text{н.пл.вст}} = 1,9I_{\text{н.пл.вст}}$$

Следовательно,  $I_{\text{н.пл.вст}} = I_{\text{пуск.дв}}/1,9$ . В этом выражении  $\alpha = 1,9$ .

Если в расчете получится ток плавкой вставки более 125 А, то, пользуясь линией CD, при заданном времени пуска определяют  $k_{i \text{ граф}}$ , ток срабатывания и далее номинальный ток плавкой вставки.

Пользуясь этой методикой, можно найти коэффициент  $\alpha$  (для любого времени пуска электродвигателя):

$$\alpha = 0,5k_{i \text{ граф}} \quad (2.22)$$

Для предохранителей других серий возможны иные значения  $k_{i \text{ граф}}$ . Например, согласно рисунку 2.19, предохранитель ПН2 срабатывает за время 1 с при кратности тока 5. Следовательно,

$k_{i \text{ граф}} = 5$ . Ток  $I_{\text{ср}} = 5I_{\text{вст.ном}}$ . Тогда, пользуясь проведенным выше критерием, среднее значение пускового тока  $I_{\text{п.дв}}$  за этот период должно быть не более 0,5 тока срабатывания  $I_{\text{ср}}$  плавкой вставки за это же время. Таким образом, пусковой ток двигателя связан с током вставки соотношением:  $I_{\text{н.пл.вст}} = 0,5I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot 5I_{\text{н.пл.вст}} = 2,5I_{\text{н.пл.вст}}$ .

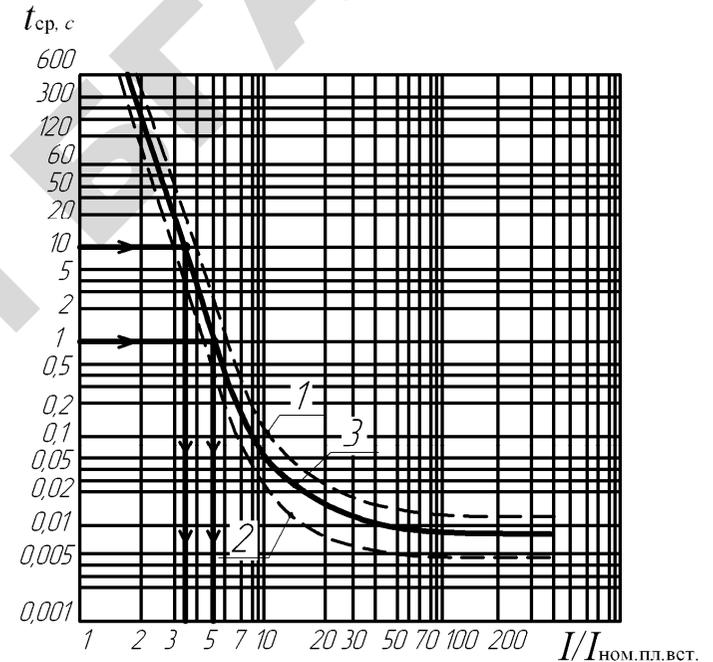


Рисунок 2.19 – Времятоковая характеристика предохранителя ПН2: 1 – с холодного состояния; 2 – с горячего состояния; 3 – средняя линия

Отсюда следует: при  $t_{\text{п.дв}} = 1$  с,  $I_{\text{н.пл.вст}} \geq I_{\text{пуск.дв}}/2,5$ . Здесь  $\alpha = 2,5$ .

При тяжелых условиях пуска электродвигателя ( $t_{\text{п.дв}} > 1$  с) по аналогии с приведенным выше расчетом, используя рисунок 2.19, можно установить требуемый ток плавкой вставки  $I_{\text{вст.ном}}$ . Например, при  $t_{\text{п.дв}} = 10$  с допустимый пусковой ток должен составлять  $0,5I_{\text{ср}}$  предохранителя. Следовательно, он равен  $0,5 \cdot 3,5I_{\text{н.пл.вст}} = 1,75I_{\text{н.пл.вст}}$ . Отсюда  $I_{\text{н.пл.вст}} = I_{\text{п.дв}}/1,75$ . В этом случае  $\alpha = 1,75$ .

Аналогично можно найти ток плавкой вставки при любой продолжительности пуска электродвигателя и для любой серии плавкого предохранителя.

Следует отметить, что для более точного нахождения коэффициента  $\alpha$  можно воспользоваться времятоковыми характеристиками конкретной серии предохранителей. При заданном времени пуска находят ток срабатывания предохранителей  $I_{ср}$  для группы плавких вставок. Далее выбирают плавкую вставку, для которой  $I_{пуск.дв} \leq 0,5I_{ср}$ .

Для цепей, питающих группу электрических приемников (электродвигателей):

$$I_{н.пл.вст} = \frac{(I'_{пуск} + I'_{дл})}{\alpha}, \quad (2.23)$$

где  $I'_{пуск}$  – пусковой ток наибольшего по мощности электродвигателя (или группы одновременно включаемых электродвигателей), А (рисунок 2.17, е);

$I'_{дл}$  – длительный расчетный ток линии до момента пуска наибольшего по мощности электродвигателя (или группы одновременно включаемых электродвигателей) без рабочего тока пускаемого электродвигателя (или группы электродвигателей), А (рисунок 2.17, е).

В осветительных установках с лампами высокого давления типа ДРЛ пусковой ток составляет (2–2,6)  $I_{раб}$  и длится, постепенно уменьшаясь, 3–7 мин (рисунок 2.17, и).

В этом случае

$$I_{н.пл.вст} = (1,8 - 2,4) I_{раб}. \quad (2.24)$$

В целях управления и сигнализации номинальный ток плавкой вставки выбирают по условию

$$I_{н.пл.вст} \geq \sum I_{раб} + 0,1 \sum I_{вкл}, \quad (2.25)$$

где  $\sum I_{раб}$  – суммарный рабочий ток, потребляемый катушками аппаратов, сигнальными лампами и другими потребителями защищаемой цепи при их одновременной работе, А;

$\sum I_{вкл}$  – суммарный ток, потребляемый при включении катушек одновременно включаемых аппаратов переменного тока, А.

Номинальный ток плавкой вставки выбирается из ряда стандартных значений для конкретного типа предохранителя. Выбирается ближайшее большее стандартное значение.

Плавкие предохранители не рекомендуется использовать в НКУ (низковольтных комплексных устройствах) для защиты цепей отдельных электродвигателей по следующим причинам: во-первых,

при перегорании одного предохранителя создается неполнофазный режим питания электродвигателя. Этот режим питания является аварийным режимом для двигателя. Он приводит к выходу нагруженного электродвигателя из строя. Во-вторых, не обеспечивается селективность с контактором (см. материал ниже).

## 2.9. Проверка выбранного предохранителя

После выбора номинального тока плавкой вставки и конкретно типа предохранителя проверяют, сможет ли выбранный предохранитель отключить расчетный ток КЗ, не разрушаясь.

*Проверка на отключающую способность:*

$$I_{пред.откл} > I_{КЗ}^{(3)}, \quad (2.26)$$

где  $I_{пред.откл}$  – предельный (максимальный) отключаемый предохранителем ток, кА;

$I_{КЗ}^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ через предохранитель, кА.

*Проверка на чувствительность к однофазному току КЗ* вызвана тем, что токи однофазного КЗ меньше трехфазного и могут составить небольшую кратность к току плавкой вставки. В этом случае время отключения КЗ значительно и возможен перегрев проводов и возгорание изоляции. Поэтому чувствительность предохранителя определяется отношением:  $I_{КЗ}^{(1)} / I_{н.пл.вст}$ . Чем больше это отношение, тем более чувствителен предохранитель к однофазному КЗ (быстрее срабатывает). ПУЭ определяют, что однофазный ток КЗ должен превышать не менее чем в 3 раза номинальный ток плавкой вставки предохранителя в невзрывоопасных помещениях, т. е. должно выполняться условие

$$I_{н.пл.вст} < \frac{I_{КЗ}^{(1)}}{3}. \quad (2.27)$$

Для взрывоопасных помещений:

$$I_{н.пл.вст} < \frac{I_{КЗ}^{(1)}}{4}. \quad (2.28)$$

Проверка на селективность предохранителей проводится в том случае, если в цепи КЗ установлены несколько последовательно включенных предохранителей.

На рисунке 2.20, а показана схема питания потребителя. При КЗ у потребителя для обеспечения селективности требуется, чтобы первым сработал предохранитель  $FU3$ . Если же этого не произойдет, то перегорит  $FU2$  и отключатся все потребители, подключенные к НКУ, что недопустимо. Чтобы избежать этого, защитная характеристика более удаленного предохранителя должна лежать выше защитной характеристики ближайшего к месту КЗ предохранителя (рисунок 2.20, б). В этом случае фактическое время срабатывания  $t_{ср.2}$  предохранителя  $FU2$  (на больший ток) должно быть больше наибольшего времени срабатывания  $t_{ср.3}$  предохранителя  $FU3$  (на меньший ток), т. е.  $t_{ср.2} \geq t_{ср.3}$ . Учитывая 50%-ный разброс характеристик, для предохранителя  $FU2$  следует взять отрицательный допуск по времени срабатывания, а для предохранителя  $FU3$  – положительный допуск. Тогда  $0,5t_{ср.2} > 1,5t_{ср.3}$  [17]. В результате получим необходимое условие селективности в общем виде:

$$t_{ср.б} \geq 3t_{ср.м}, \quad (2.29)$$

где  $t_{ср.б}$ ,  $t_{ср.м}$  – время срабатывания большего и меньшего по току предохранителя, с.

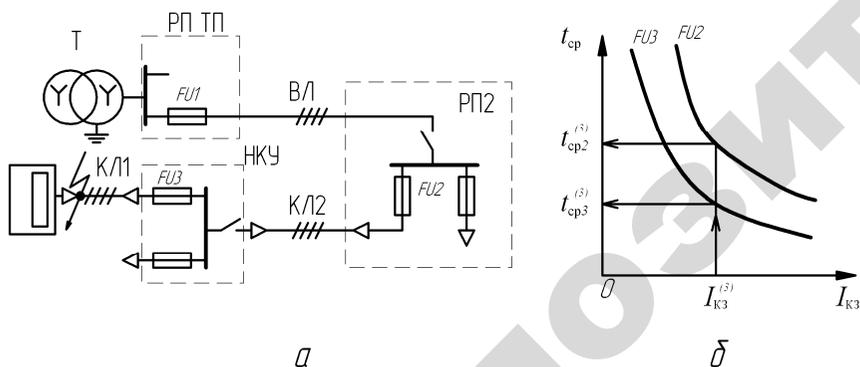


Рисунок 2.20 – Однолинейная схема питания трехфазного потребителя (а) и требуемые защитные характеристики предохранителей, включенных последовательно (б):  $I_{к3}^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ

Таким образом, для селективной работы предохранителей необходимо, чтобы время срабатывания предохранителя на больший ток было в три раза больше, чем у предохранителя на меньший ток.

Однако на практике неудобно сравнивать защитные характеристики предохранителей, заданные в логарифмическом масштабе. Удобнее сравнивать номинальные токи плавких вставок. Но в этом случае выполнить условие (2.29) возможно с большей погрешностью, поскольку наклон защитных характеристик плавких вставок к оси токов различный. То, что справедливо для малых токов, не подтверждается для больших токов (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Обеспечение селективности предохранителей серии ПН2 на токи от 30 до 400 А и серии ППН на токи от 6 до 160 А

$I_{вст.ном}$ меньшей, А	$I_{вст.ном}$ большей при кратности тока КЗ		$I_{вст.ном}$ меньшей, А	$I_{вст.ном}$ большей при кратности тока КЗ	
	10	20		10	20
	Серия ПН2			Серия ППН	
30	50	60	6	10	16
40	60	80	10	16	20
50	80	100	16	20	25
60	100	120	25	32	40
80	120	120	32	40	50
100	120	120–150	40	50	63
120	150	200	50	63	80
150	200	250	63	80	100
200	250	300	80	100	125
250	300	400	100	125	160
300	400	500	125	150	200
400	600	600	160	200	250

Для плавкой вставки предохранителя ПН2, например, на 30 А селективность обеспечивается при большей плавкой вставке на 50 А, т. е. на второй ступени шкалы после 30 А. При токе 100 А селективность обеспечивается через 1 ступень, т. е. при токе 120 А. Кроме этого, при большей кратности тока  $I_{к3}/I_{вст.ном.мен} = 20$  для предохранителя на 30 А селективность обеспечивается на третьей ступени, при 60 А.

Для предохранителей более совершенной серии ППН селективность обеспечивается через одну или две ступени шкалы. Поэтому для практиков, не желающих определять селективность по защитным характеристикам, рекомендуется следующее правило: последовательно установленные в цепи однотипные предохранители должны отличаться на одну или две ступени шкалы, а разнотипные – на три ступени шкалы. Это правило учитывает 50%-ную погрешность времени срабатывания предохранителей.

Перспективным направлением проверки предохранителей на селективность является использование аналитических выражений для защитных характеристик плавких вставок. Для предохранителя ПН2 такая зависимость задана уравнением (2.14).

В [21] определено по аналитическим выражениям, что предохранители ПН2 обеспечивают селективность, если отношение токов плавких вставок большего предохранителя к меньшему превышает 1,26 (при 50%-ной погрешности в определении времени срабатывания предохранителя). Этот способ используют для расчетов на ПЭВМ.

Если в электрической сети установлены предохранители и автоматические выключатели, то проверяется селективность их работы.

Рассмотрим случай, когда ближе к источнику питания находится автоматический выключатель. В этом случае селективность обеспечивается, если автоматический выключатель имеет отсечку тока большую, чем ток КЗ за предохранителем. Предохранитель для надежного срабатывания должен иметь плавкую вставку в 3 раза ниже тока КЗ за предохранителем (условие чувствительности предохранителя).

Возможно использование для обеспечения селективности автоматического выключателя с полупроводниковым расцепителем, который обеспечивает регулируемую выдержку времени при срабатывании. В этом случае легко обеспечить селективность, выбрав выдержку времени срабатывания автоматического выключателя  $t_{ср.ав}$  при КЗ больше времени срабатывания предохранителя  $t_{ср.пр}$ . Поскольку автоматические выключатели имеют меньшую погрешность срабатывания, чем предохранители, то уместно принять разброс времени срабатывания предохранителя и автоматического выключателя по 25 %. При этом селективность обеспечивается, если  $0,75 t_{ср.ав} \geq 1,25 t_{ср.пр}$ , откуда

$$t_{ср.ав} \geq 1,67 t_{ср.пр} \quad (2.30)$$

Рассмотрим второй случай, когда ближе к источнику питания находится плавкий предохранитель. В этом случае селективность обеспечивается, если время срабатывания предохранителя при КЗ больше, чем автоматического выключателя. При погрешности защитных характеристик этих аппаратов по времени в 25 % получим выражение  $0,75 t_{ср.пр} \geq 1,25 t_{ср.ав}$ , откуда

$$t_{ср.пр} \geq 1,67 t_{ср.ав} \quad (2.31)$$

Проверка предохранителя на селективность с контактором или электромагнитным пускателем проводится только в том случае, если эти аппараты подключены к цепи, защищаемой предохранителем. Этот случай встречается во внутренних сетях предприятий, если предохранители используются в НКУ.

Селективность предохранителя обеспечивается, если время срабатывания предохранителя меньше, чем время отпускания контактора или пускателя ( $t_{отп}$ ) из-за снижения напряжения в сети при КЗ. В противоположном случае контактор или пускатель будет отключать токи КЗ. Их контакты, не рассчитанные на отключение токов КЗ, будут повреждены.

При проверке используется ток однофазного КЗ. С учетом 50 % погрешности на время срабатывания предохранителя  $t_{ср.пр}$  необходимо, чтобы выполнялось условие

$$1,5 t_{ср.пр} \leq t_{отп} \quad \text{или} \quad t_{ср.пр} \leq 0,67 t_{отп} \quad (2.32)$$

Обычно время отпускания контакторов и электромагнитных пускателей не превышает 0,1–0,15 с. Из выражения (2.32) следует, что при этих условиях  $t_{ср.пр} \leq 0,1$  с. Такое малое время срабатывания обеспечивают предохранители при  $I_{КЗ} > 10 I_{н.пл.вст}$ . В этом случае

$$I_{н.пл.вст} < \frac{I_{КЗ}^{(1)}}{10} \quad (2.33)$$

По этому условию выбрать предохранитель сложнее, чем по чувствительности к однофазному току КЗ (см. формулу (2.27)). Это условие может быть определяющим для выбора предохранителя во внутренних сетях предприятий. Из-за невозможности выполнить данное условие во внутренних сетях предприятий приходится заменять в НКУ предохранители на автоматические выключатели с токовой отсечкой.

## 2.10. Выбор быстродействующих плавких предохранителей защиты полупроводниковых приборов

Основным параметром быстродействующего предохранителя является интеграл Джоуля  $\int i^2 dt$ , имеющий размерность  $A^2 \cdot c$ . Различают полный интеграл Джоуля  $W_{\text{полн.пред}}$ , который состоит из суммы преддугового интеграла  $W_{\text{пред.дуг}}$  и интеграла дуги  $W_{\text{дуги}}$ :

$$W_{\text{полн.пред}} = \int_0^{t_{\text{ср}}} i^2 dt = W_{\text{пред.дуг}} + W_{\text{дуги}},$$

$$W_{\text{пред.дуг}} = \int_0^{t_{\text{пред.дуг}}} i^2 dt, \quad (2.34)$$

$$W_{\text{дуги}} = \int_{t_{\text{пред.дуг}}}^{t_{\text{пред.дуг}} + t_{\text{дуг}}} i^2 dt,$$

где  $i$  – мгновенное значение тока, протекающего через предохранитель, А;

$t_{\text{пред.дуг}}$  – преддуговое время, с;

$t_{\text{дуг}}$  – время дуги, с;

$t_{\text{ср}}$  – полное время срабатывания (отключения) предохранителя, равное преддуговому времени плюс время дуги, с.

Полупроводниковые силовые приборы (диоды, тиристоры, симисторы, транзисторы) характеризуются также  $W_{\text{приб}}$  (допустимым интегралом Джоуля), который иногда называют защитным показателем прибора:

$$W_{\text{приб}} = \int i^2 dt. \quad (2.35)$$

Наиболее важным условием надежной защиты полупроводникового прибора является следующее требование: в течение интервала времени от начала аварийного режима до отключения аварийного тока температура полупроводникового прибора, включенного последовательно с предохранителем, не должна превышать допустимые значения. В противном случае произойдет тепловой пробой полу-

проводникового прибора. Чтобы это условие выполнить, предохранитель должен обладать высоким быстродействием. Только в этом случае полный интеграл Джоуля предохранителя окажется меньше интеграла Джоуля полупроводникового прибора. С учетом коэффициента запаса  $K_{\text{зап}}$  условие защиты прибора запишется в виде

$$W_{\text{пол.пред}} \leq K_{\text{зап}} W_{\text{приб}}. \quad (2.36)$$

По рекомендациям [22]  $K_{\text{зап}} = 0,83-0,67$ .

В таблице 2.3 приведены интегралы Джоуля некоторых полупроводниковых приборов и предохранителей.

Таблица 2.3 – Интеграл Джоуля некоторых предохранителей и полупроводниковых силовых приборов

Параметры	Тип полупроводникового прибора			Тип предохранителя		
	Диод Д161-250	Тиристор Т171-320	Диод ВЛ320	ПП157	ПП159	ПН2-400
Номинальный ток, А	250	320	320	250	250	400
Интеграл Джоуля прибора, $A^2 \cdot c$	$2 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	$2,18 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^{5*}$	$1,5 \cdot 10^{5**}$	$30 \cdot 10^5$
*Интеграл Джоуля при напряжении 660 В и минимальном отключаемом токе 2 кА. **Для 1 габарита предохранителя.						

Из таблицы 2.3 следует, что быстродействующий предохранитель ПП157 не способен защитить диод Д161-250, поскольку его интеграл Джоуля с учетом условия (2.36) не меньше, чем предохранителя.

В этом случае следует:

1) уменьшить рабочий ток диода до 160 А. Тогда плавкую вставку предохранителя можно взять тоже на 160 А. Ее интеграл Джоуля при токе 2 кА составит  $10^5 A^2 \cdot c$ , что меньше интеграла Джоуля прибора. Лучшим решением будет применение предохранителя ПП159 на ток 250 А без уменьшения рабочего тока диода;

2) увеличить число параллельно включенных полупроводниковых приборов.

Из таблицы 2.3 следует, что предохранитель общего применения ПН2-400 не может защитить полупроводниковые приборы,

поскольку его интеграл Джоуля на порядок превышает интеграл Джоуля полупроводниковых приборов.

Сложнее обстоит выбор при параллельном включении нескольких полупроводниковых приборов. Например, на рисунке 2.21 приведена схема выпрямительной установки на большой ток. В каждом плече выпрямителя включены три диода. Последовательно с каждым диодом включен быстродействующий предохранитель.

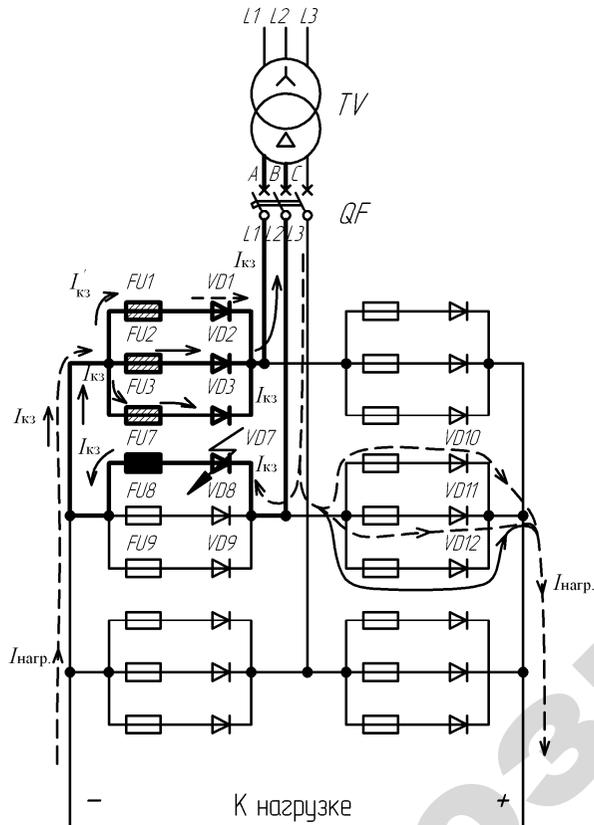


Рисунок 2.21 – Принципиальная электрическая схема силовой части выпрямительного агрегата

Предположим, что в мгновение, когда ток нагрузки  $I_{нагр}$  протекал через диоды  $VD10-VD12$  и  $VD1-VD3$ , произошел пробой диода  $VD7$  (зачернен). Возникает внутреннее КЗ в цепи, и ток КЗ протекает от фазы  $B$

через  $VD7$ , предохранитель  $FU7$  и замыкается на фазу  $A$  через параллельно включенные цепи предохранителей  $FU1-FU3$  и диодов  $VD1-VD3$ .

Авария будет ликвидирована и выпрямитель продолжит работу, если плавкие элементы  $FU1-FU3$  не успеют сработать, а диоды  $VD1-VD3$  выйти из строя за время срабатывания предохранителя  $FU7$ .

Следует обратить внимание, что ток КЗ через параллельную ветвь в плече преобразователя будет протекать в три раза меньший, чем ток КЗ  $I_{кз}^{(2)}$  через предохранитель  $FU7$ . В общем виде ток через каждую параллельную ветвь  $I_{кз}^{(2)}$  равен:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{I_{кз}^{(2)}}{n}, \quad (2.37)$$

где  $n$  – число параллельных ветвей в плече преобразователя.

Очевидно, что при этом в  $n^2$  раз уменьшится тепло, выделенное в каждом предохранителе и диоде в параллельных плечах, поскольку оно пропорционально квадрату тока. Это обстоятельство облегчает защиту параллельно включенных полупроводниковых приборов. В этом случае условие защиты полупроводникового прибора в параллельной ветви плеча преобразователя с помощью быстродействующего предохранителя в соседнем плече имеет вид

$$W_{пол.пред} \leq \frac{n^2 W_{приб}}{K_{зап}}. \quad (2.38)$$

Например, для диода  $VD1$  в условиях рисунка 2.21 можно записать:  $W_{пол.FU7} \leq 3^2 \cdot W_{VD1} / K_{зап}$ .

Из формулы (2.38) видно, что увеличение числа параллельных ветвей  $n$  облегчает выполнение условий защиты. Кроме выполнения условия (2.38), должно быть выполнено условие селективности предохранителей в соседних плечах преобразователя. Например, если на рисунке 2.21 в цепи КЗ оказались предохранители  $FU7$  и параллельные ветви с предохранителями  $FU1-FU3$ , то для обеспечения селективности требуется, чтобы сработал предохранитель  $FU7$  и отключил ветвь  $VD7-FU7$ , но не сработал ни один предохранитель  $FU1-FU3$ .

В отличие от обычных электроустановок селективное срабатывание быстродействующего предохранителя обеспечивает непрерывность работы преобразователя, в котором произошло КЗ.

Для повышения надежности работы преобразователя требуется, чтобы предохранители  $FU1-FU3$  не подплавилась при КЗ в ветви  $FU7$ . В этом случае рассматривается не полный интеграл Джоуля, а интеграл плавления Джоуля или преддуговой интеграл предохранителей  $FU1-FU3$ .

Для селективного отключения только предохранителя поврежденного полупроводникового прибора с учетом разброса интегралов плавления и отключения необходимо обеспечить соотношение

$$\frac{n^2 W_{\text{полн.маx}}}{K_{\text{зап}}} \leq W_{\text{пл.мин}}, \quad (2.39)$$

где  $W_{\text{полн.маx}}$  – наибольшее значение полного интеграла отключения предохранителя  $FU7$ ,  $A^2 \cdot c$ ;

$W_{\text{пл.мин}}$  – наименьшее значение интеграла плавления предохранителя  $FU1$ ,  $A^2 \cdot c$ .

Из уравнения (2.39) определяют минимальное число параллельно включенных приборов [22].

Уравнение (2.39) справедливо при условии, что токи равномерно разделяются по  $n$  параллельно включенным полупроводниковым приборам. Иначе в формулу вводится коэффициент неравномерности деления тока по ветвям в плече выпрямителя [20]. Селективность обеспечивается при наличии, как правило, не менее трех параллельных ветвей.

Интеграл Джоуля предохранителя и интеграл Джоуля для полупроводникового прибора приводятся в каталогах. Для предохранителя они находятся по интегральным характеристикам (рисунок 2.10).

Если величина интеграла Джоуля для полупроводникового прибора не приведена в каталогах, то она может быть определена по выражению

$$(I^2 t)_{\text{приб}} = \frac{(I_m^2 T)}{4}, \quad (2.40)$$

где  $I_m$  – допустимое значение ударного неповторяющегося тока в прямом направлении, А; например, для тиристора типа Т320  $I_m = 35$  кА;

$T$  – период переменного тока, с; при 50 Гц  $T = 20 \cdot 10^{-3}$  с.

Величина  $I_m$  существенно зависит от частоты тока. При необходимости следует уточнять конкретные условия применения полу-

проводникового прибора и предохранителя. В процессе отключения аварийного тока величина  $I_m$  также не должна быть превышена. Это условие записывается в виде

$$I_m \geq \frac{I_{\text{пр.маx}}}{n}, \quad (2.41)$$

где  $I_{\text{пр.маx}}$  – наибольшее значение пропускаемого предохранителем тока при аварийном отключении. Значение этого тока приводится заводом-изготовителем в информационных материалах. Это значение может быть определено по зависимости пропускаемого тока от ожидаемого тока КЗ (см. рисунок 2.9).

## 2.11. Согласование характеристик термической стойкости электрооборудования и защитных характеристик плавких предохранителей

В рассмотренном ранее материале (пп. 2.7–2.10) о выборе плавких предохранителей не упоминалось о характеристиках термической стойкости электрооборудования. Рассмотрим выбор плавких предохранителей с учетом таких характеристик.

При нормальном режиме работы ток, протекающий по эксплуатируемому электрооборудованию, может превышать его номинальный ток  $I_{\text{ном}}$ , достигая значения длительного тока  $I_{\text{н.дл}}$ , не приводящего к нагреву токоведущих частей электрооборудования выше установленной нормы, определяемой классом изоляции. Допустимое значение длительного тока  $I_{\text{н.дл}}$  определяется коэффициентом запаса конструктивных и электротехнических параметров электрооборудования в каждом конкретном случае.

При выборе плавких предохранителей необходимо иметь сведения о параметрах защитного электрооборудования в процессе эксплуатации, а именно, о номинальном токе  $I_{\text{ном}}$ , о допустимом значении длительного тока нагрузки  $I_{\text{н.дл}}$ , о токе перегрузке  $I_{\text{перг}}$ , о токе КЗ  $I_{\text{КЗ}}$ .

Нагрузочная и перегрузочная способности электрооборудования в аварийных режимах определяются *характеристикой термической стойкости*, которая регламентирует допустимое время  $t_{\text{доп}}$  протекания по защищенному электрооборудованию тока заданной величины.

Характеристика термической стойкости электрооборудования изображается в виде двух параллельных линий, определяемыми разбросом значений из-за влияния окружающей среды, погрешностей конструктивных и физико-технических свойств материалов электрооборудования, отклонения электротехнических параметров питающей сети.

Надежность защиты электрооборудования предохранителем на аварийных режимах определяется степенью рационального согласования характеристики термической стойкости защищаемого объекта и времятоковой характеристики предохранителя. Поэтому выбору предохранителей предшествует выбор диапазона тока срабатывания защиты (в том числе тока отключения  $I_{отк}$ ) и расчет параметров характеристики термической стойкости защищаемого электрооборудования (в том числе времени допустимого аварийного режима  $t_{доп.ав.реж}$ ).

Ток отключения  $I_{отк}$ , при котором должен работать предохранитель в аварийном режиме, устанавливается по значению меньшим действующего значения установившегося тока аварийного режима  $I_{у.ав.реж}$ . Величина времени допустимого аварийного режима  $t_{доп.ав.реж}$ , определяющая термическую способность защищаемого электрооборудования, рассчитывается по формулам, характерным для каждого вида защищаемого электрооборудования.

После определения этих величин для каждого конкретного вида защищаемого электрооборудования выбор параметров предохранителя осуществляется с учетом рекомендаций, определяющих эффективность защиты, общих для всех видов защищаемого электрооборудования.

На рисунке 2.22 изображены линии 1 и 2, представляющие характеристики термической стойкости защищаемого электрооборудования. На оси тока им соответствуют значения токов  $I_{ном}$  и  $I_{н.дл.}$ . Ток отключения принят  $I_{отк}$ , причем  $I_{отк} \approx kI_{ном}$ , где  $k = 2-3$ .

Линии 3, 4 и 5, представляют собой времятоковые характеристики плавкого предохранителя. Линия 3 соответствует срабатыванию предохранителя с горячего состояния, а линия 5 – с холодного состояния. Номинальный ток плавкой вставки  $I_{вст.ном} > I_{ном}$ , а ток плавления представлен средней линией и имеет отклонения  $+\Delta I_{пл}$  и  $-\Delta I_{пл}$ . Ток плавления – это пограничный ток предохранителя.

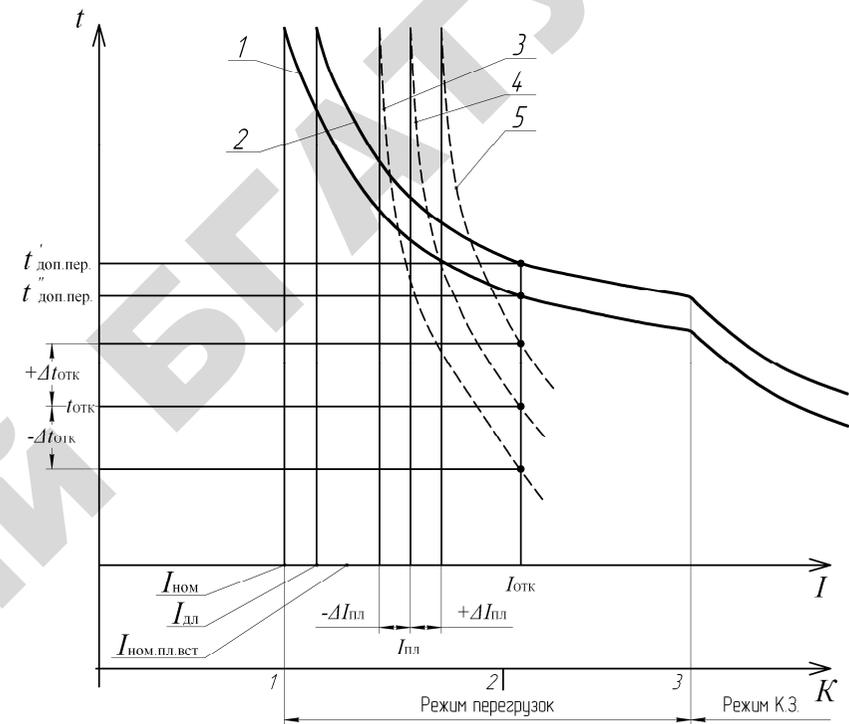


Рисунок 2.22 – Согласование характеристик термической стойкости электрооборудования и защитных характеристик плавких предохранителей в режиме перегрузок:

1, 2 – характеристики термической стойкости защищаемого электрооборудования;  
3, 4, 5 – времятоковые характеристики отключения плавкого предохранителя;  
 $k$  – кратность тока перегрузки

Суть согласования характеристик, представленных на рисунке 2.22, состоит в том, чтобы характеристики плавкого предохранителя 3, 4 и 5 проходили ниже характеристик 1 и 2 защищаемого электрооборудования в диапазоне токов до отключаемого.

При этом будут иметь место следующие неравенства:

$$I_{пл} + \Delta I_{пл} < I_{отк} \quad (2.42)$$

$$t_{отк} + \Delta t_{отк} < t''_{доп.пер} \quad (2.43)$$

где  $t_{отк}$  – время отключения (срабатывания) предохранителя при токе  $I_{отк}$ , с;

$t''_{доп.пер}$  – допустимое время перегрузки по характеристике термостойкости электрооборудования для тока  $I_{отк}$ , с.

Из-за достаточно продолжительного времени действия тока перегрузки анализ тепловых режимов кабелей, проводов и электрооборудования производится с учетом отдачи тепла в окружающую среду. Допустимое время перегрузки из условия термической стойкости определяется по выражению

$$t_{доп.пер} = T_n \ln \frac{\tau_{нач} - \tau_{у.пер}}{\tau_{кон} - \tau_{у.пер}}, \quad (2.44)$$

где  $T_n$  – постоянная времени нагревания электрооборудования, с; должна предоставляться в нормативно-технических документах на кабели, провода и другое электрооборудование;

$\tau_{нач}$  – начальное превышение температуры защищаемого электрооборудования к моменту начала протекания по нему тока перегрузки, °С;

$\tau_{у.пер}$  – установившееся значение превышения температуры защищаемого оборудования при перегрузке, °С;

$\tau_{кон}$  – конечное значение превышения температуры защищаемого оборудования при перегрузке, °С.

Конечное значение превышения температуры рекомендуется брать на 5 % ниже установившегося значения, т. е.  $0,95\tau_{у.пер} = \tau_{кон}$ .

Установившееся значение превышения температуры определяют по уравнению

$$\tau_{у.пер} = \tau_{нач} \left( \frac{I_{н.пер}}{I_{ном}} \right)^2, \quad (2.45)$$

где  $I_{ном}$  и  $I_{н.пер}$  – номинальный ток и ток перегрузки, А.

Для снижения значений времени отключения  $t_0$  предохранителя необходимо выбирать плавкую вставку с наименьшим значением номинального тока.

Превышение температур  $\tau_{нач}$ ,  $\tau_{у.пер}$  определяется относительно температуры окружающей среды 25–35 °С.

Максимальная допустимая температура нагрева электрооборудования при длительном протекании тока  $I_{н.дл}$  лимитируется классом изоляции согласно ГОСТ 8865-87.

В режиме КЗ производится аналогичное сравнение характеристик термической стойкости электрооборудования и времятоковых характеристик плавкого предохранителя. Отличие состоит в том, что ток отключения  $I_0$  должен быть меньше действующего значения установившегося тока КЗ  $I_{у.КЗ}$ , и его рекомендуется выбирать как  $I_0 > 5I_{ном}$ . Кроме этого, при КЗ анализ тепловых режимов электрооборудования проводится без учета отдачи тепла в окружающую среду, т. е. в адиабатном режиме.

Для защиты цепей асинхронного двигателя от токов однофазного КЗ следует выбирать

$$I_{отк} < I_{дв.пуск} - \Delta I_{дв.пуск}, \quad (2.46)$$

где  $I_{дв.пуск}$ ,  $\Delta I_{дв.пуск}$  – пусковой ток двигателя и его отклонение, А.

Если необходимо защитить цепи асинхронного двигателя от токов двухфазного режима КЗ, то выбирают

$$I_{отк} < \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{дв.пуск} - \Delta I_{дв.пуск}). \quad (2.47)$$

При отсутствии исходных данных о возможных разбросах параметров защитной характеристики отключения предохранителя и характеристики термической стойкости защищаемого объекта рекомендуется при выборе типа размера предохранителя принимать для инженерных расчетов разброс параметра тока  $\pm(10-25)\%$ , времени  $\pm(10-25)\%$ , значения интеграла Джоуля  $\pm(10-25)\%$ .

Предохранители, предназначенные для защиты электрооборудования в режимах КЗ, применяются как сопутствующие к тепловым реле, защищающим электрооборудование от токов перегрузки.

## 2.12. Эксплуатация плавких предохранителей

В процессе эксплуатации плавкие предохранители могут изменять свои характеристики из-за старения материала плавких элементов. Особенно подвержены старению плавкие элементы из меди на воздухе. Срок службы плавких элементов из меди намного короче срока службы плавких элементов из серебра. Изменение электрического сопротивления серебряной и медной проволоки диаметром 0,13 мм на воздухе при постоянной нагрузке током 2,6 А (перегрузка  $1,1I_{ном}$ ) показано на рисунке 2.23, а, при переменной циклической нагрузке – на рисунке 2.23, б [17].

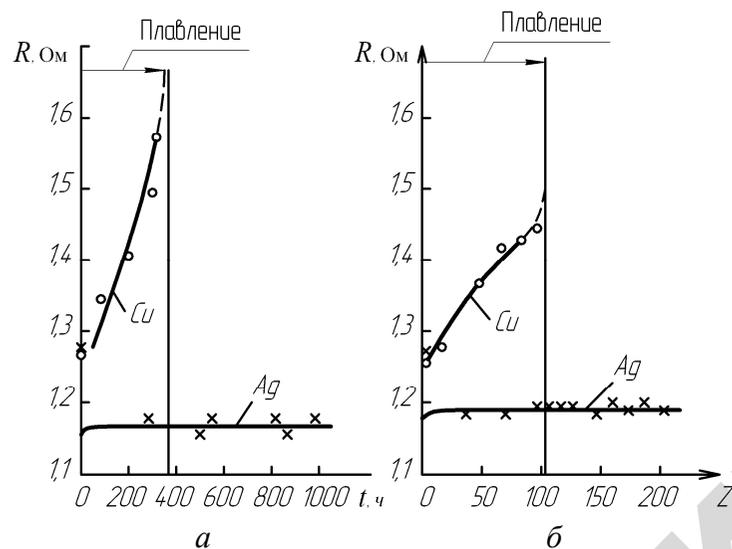


Рисунок 2.23 – Изменение электрического сопротивления серебряной и медной проволоки при непрерывной нагрузке в зависимости от времени (а) и при циклической нагрузке в зависимости от числа циклов  $Z$  включения – отключение (б):  $t$  – время работы;  $Z$  – число циклов нагрузки

Как видно из рисунка 2.23, а, при постоянной нагрузке медная проволока вышла из строя через 380 часов непрерывной работы, а серебряная была работоспособна и через 1000 часов [17].

Плавкие вставки очень чувствительны к циклическим нагрузкам. Из рисунка 2.23, б видно, что медная проволока выдержала 104 цикла нагрузки (1 час – работа, 1 час – пауза). Это составило в сумме 107 часов работы, что в 3,65 раза меньше, чем при

непрерывной работе [17]. Учитывая это, рекомендуется менять плавкие вставки на ответственном и напряженно работающем электрооборудовании не реже 1 раза в год.

Размещение плавкого элемента в кварцевом песке способствует более равномерному распределению температуры вдоль плавкого элемента и его большему сроку службы при циклических нагрузках.

Перезарядка плавких вставок производится только для предохранителей, допускающих разборку плавких вставок по правилам технической эксплуатации. Например, допускают перезарядку в условиях ремонтной мастерской плавкие вставки предохранителей ПР2. Для замены сгоревшего плавкого элемента используют новые плавкие элементы заводского изготовления.

Корпус плавкой вставки обязательно заполняют наполнителем. Для плавких вставок с наполнителем существенное значение имеет качество уплотнения наполнителя. Воздушные полости в таких плавких вставках не допустимы. Они ухудшают защитные характеристики предохранителя, приводят к увеличению длительности горения дуги, уменьшению предельного отключаемого тока и могут вызвать разрушение предохранителя при срабатывании. Это следует учитывать при перезарядке плавких вставок. Чем плотнее утрамбован кварцевый песок в корпусе плавкой вставки, тем лучше.

Плотность наполнителя существенно влияет на характеристики предохранителя. Снижение объемной плотности наполнителя на 3–10 % при ручной засыпке наполнителя приводит к ухудшению характеристик плавкого предохранителя. В частности, снижается среднее напряжение на дуге (на 6–15 %), увеличиваются пропускаемый ток (на 8–15 %), преддуговой интеграл (на 15–30 %), интеграл отключения (более чем на 30 %), энергия дуги (более чем на 40 %). При уменьшении содержания кварцевого песка (на 10–20 %) интеграл Джоуля и энергия дуги увеличиваются в 3–5 раз. Это, как правило, приводит к взрыву плавкой вставки при больших отключаемых токах КЗ.

Перегоревшие плавкие элементы разборных предохранителей без наполнителя (например, ПР2) следует заменить запасными заводской калибровки. При отсутствии плавких элементов заводского изготовления возможна установка калиброванных в электротехнической лаборатории плавких элементов. Применение некалиброванных плавких вставок запрещается правилами эксплуатации электроустановок [23].

Временно можно установить медную (желательно луженую) проволоку, выбранную с учетом того, что ток плавления для проводников можно рассчитать по формуле

$$I_{\text{пл}} = k_1 \sqrt{d^3}, \quad (2.48)$$

где  $I_{\text{пл}}$  – ток, при котором плавится проводник заданного диаметра, А;

$d$  – диаметр проводника, мм;

$k_1$  – коэффициент, зависящий от материала проводника. Для свинца  $k_1 = 10,8$ ; для олова  $k_1 = 12,8$ ; для алюминия  $k_1 = 59,2$ ; для меди  $k_1 = 80$ .

В формуле (2.48) ток плавления есть пограничный ток плавкой вставки. Номинальный ток плавкой вставки всегда меньше пограничного (см. п. 2.2). Для медной одиночной проволоки предохранителя ПР2 можно принять  $I_{\text{пл}} = 1,51 I_{\text{ном.пл.вст}}$ . Тогда номинальный ток медной плавкой вставки из проволоки и ее диаметр связаны между собой формулами

$$I_{\text{ном.пл.вст}} = 52,98 \sqrt{d^3}, \quad (2.49)$$

$$d = 0,071 \sqrt[3]{I_{\text{ном.пл.вст}}^2}. \quad (2.50)$$

Номинальному току плавкой вставки без наполнителя 1 А соответствует диаметр медной проволоки 0,07 мм, току 2 А – 0,11 мм, току 3 А – 0,15 мм, току 4 А – 0,18 мм, току 5 А – 0,21 мм, току 6 А – 0,25 мм, току 10 А – 0,35 мм, току 16 А – 0,47 мм, току 25 А – 0,6 мм, току 32 А – 0,72 мм, току 40 А – 0,83 мм, току 63 А – 1,12 мм. Для тока плавкой вставки 80 А требуются две проволоочки диаметром по 0,8 мм, на 100 А – две проволоочки диаметром по 1 мм. Распределение тока по нескольким параллельным проволоочкам улучшает теплоотдачу от проволоочек и характеристики предохранителя. Поэтому заводские предохранители НПР100 при токе 60 А имели 4 проволоочки диаметром 0,55 мм, на ток 80 А – 6 проволоочек диаметром 0,47 мм, на ток 100 А – 6 проволоочек диаметром 0,6 мм, а предохранитель НПР200 на ток 125 А имел 8 проволоочек по 0,6 мм, на ток 160 А – 10 проволоочек диаметром 0,6 мм, на ток 200 А – 12 проволоочек диаметром 0,6 мм.

Плавкие элементы соединяют с контактными выводами плавкой вставки с помощью контактной сварки или пайкой с использованием латунных припоев (54 % латуни, 23 % сурьмы, 23 % буры). Использовать оловянный припой не рекомендуется, потому что расплавленное олово растворяет медь, уменьшая сечение плавкой вставки, что недопустимо.

Подбор проволоочек для плавких вставок предохранителей и испытание предохранителей в электротехнической лаборатории производится на специальном универсальном стенде. При отсутствии заводского стенда можно собрать простой стенд из элементов, указанных на рисунке 2.24.

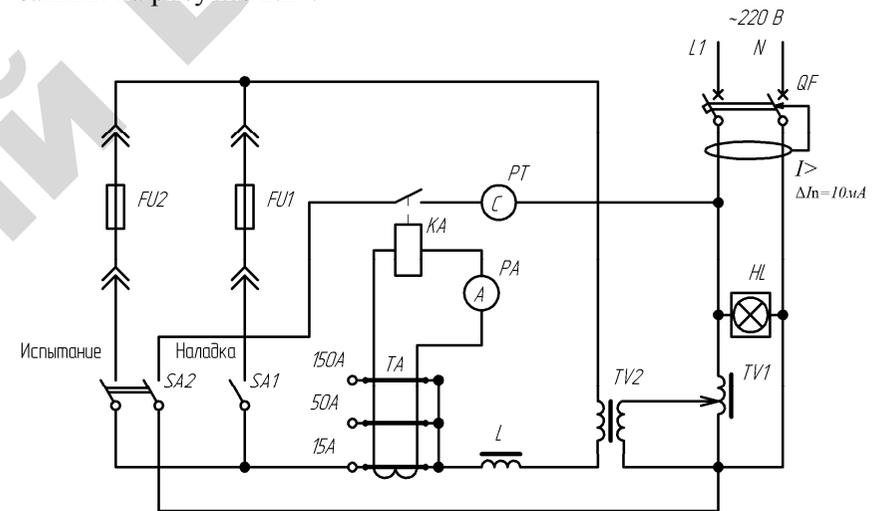


Рисунок 2.24 – Принципиальная электрическая схема стенда для испытания плавких вставок предохранителей

Элементы стенда, представленного на рисунке 2.24, следующие:  $QF$  – дифференциальный выключатель АД12/2/10/10;  $TV2$  – трансформатор понижающий на 400–630 ВА с низковольтной обмоткой на 8–12 В, выполненной из медного провода сечением не менее  $6 \text{ мм}^2$ ,  $TV1$  – автотрансформатор ЛАТР-2 на номинальный ток 9 А;  $TA$  – лабораторный трансформатор тока типа УТТ-5 на первичные токи 15–150 А;  $KA$  – реле тока типа РТ-40;  $PT$  – электрический секундомер типа ПВ-53-Л;  $SA1$  – однополюсный выключатель нагрузки ВН-32/1/100 на ток 100 А;  $SA2$  – двухполюсный выключатель

нагрузки ВН-32/2/100 на ток 100 А;  $L$  – дроссель (выполнен на магнитопроводе ПЛ 25×50×120);  $PA$  – амперметр на 5 А класса 0,5 или 1,0;  $FU1$  – плавкий предохранитель наладочной цепи;  $FU2$  – испытуемый плавкий предохранитель.

Схема позволяет обеспечить режимы наладки и испытаний. Испытуемый предохранитель  $FU2$  и вспомогательный предохранитель  $FU1$  закрепляются в специальном кожухе. Перед испытанием предохранителя и подачей в главную цепь напряжения предохранительная установка запирается поворотом смонтированной на крышке рукоятки (по требованиям техники безопасности).

В наладочном режиме в схеме используется предохранитель  $FU1$  с заведомо неплавящейся плавкой вставкой. Включают выключатель нагрузки  $SA1$ . По амперметру  $PA$  устанавливается желаемый ток испытаний, увеличивая напряжение, снимаемое с автотрансформатора  $TV1$ . После этого отключают  $SA1$  и включают  $SA2$ . Ток проходит через испытуемый предохранитель  $FU2$ . Второй контакт выключателя нагрузки  $SA2$  подает питание на электрический секундомер  $PT$ , а контакт реле тока  $KA$  замыкает цепь секундомера  $PT$ , и он включается. При срабатывании предохранителя  $FU1$  секундомер  $PT$  отключается контактом токового реле  $KA$ .

Использование наладочного режима позволяет исключить измерение токов в период колебаний стрелки амперметра  $PA$  при включении выключателя нагрузки  $SA2$ . Использование предохранителя  $FU1$  обеспечивает одинаковые условия протекания токов (одинаковые контактные сопротивления) при наладке и испытании. Дроссель  $L$  позволяет уменьшить бросок тока при включении. Он увеличивает общее сопротивление цепи и исключает изменение тока в цепи при нагреве плавкой вставки.

При испытаниях плавкой вставки необходимо обеспечить размещение плавкого элемента в соответствии с реальным условием его работы при эксплуатации. Если в сгоревшей плавкой вставке он размещен в стеклянном или фарфоровом корпусе, то и испытания надо проводить, размещая его в таком же корпусе, припаявая к наконечникам. Если плавкая вставка имеет наполнитель, то и испытания ее надо проводить с наполнителем. Это связано с необходимостью обеспечить одинаковые условия охлаждения плавкого элемента. При нарушении этого условия номинальный ток плавкой вставки не гарантируется.

При испытаниях пользуются следующим критерием: плавкая вставка предохранителя общего применения без наполнителя

должна перегорать за время 10 с при токе, превышающем номинальный ток плавкой вставки в 2,5 раза. В наполнителе она должна сгорать за 10 с при кратности тока 2,8–3,5 (в зависимости от тока плавких вставок).

Окончательный вывод при правильном подборе проволоки для плавкого элемента предохранителя делают после испытания заряженного предохранителя на нагревание испытательным током (1,3–1,5)  $I_{\text{вст.ном}}$ , где 1,5 берут для вставок до 10 А; 1,4 – от 10 до 25 А и 1,3 – при токе 25 А и более. В течение часа они не должны перегорать. Если же токи испытаний увеличить на 25 %, то они должны перегорать в течение часа.

Для расширения отключающей способности предохранителей можно включать их параллельно. Если, например, необходимо применить предохранитель на ток 630 А с отключающей способностью 200 кА, а есть предохранители с отключающей способностью на 100 кА, то используют два параллельно включенных предохранителя на ток 315 А с отключающей способностью на 100 кА каждый.

Последовательное включение предохранителей используется с целью расширения номинального рабочего напряжения при ожидаемом токе короткого замыкания не менее 10 номинальных значений. При меньших токах короткого замыкания последовательное соединение предохранителей не рекомендуется. При малых кратностях перегрузки имеет место существенный разброс времени плавления предохранителя, что может повлечь за собой отключение цепи только одним предохранителем, не рассчитанным на двойное напряжение.

Исследования показывают, что тепло от плавкого элемента предохранителя в основном отводится через подводящие проводники. Например, для предохранителя ПП59 на ток 400 А при коэффициенте теплоотдачи  $1,3 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>·°С, температуре воздуха 40 °С и температуре корпуса 100 °С общие потери мощности составляют 55 Вт. Потери мощности через корпус 11 Вт, через подводящие проводники – 44 Вт [20]. Таким образом, 70–80 % тепла, выделенного в плавком элементе предохранителя, отводится через подводящие проводники. Поэтому очень важно при эксплуатации обеспечить подключение предохранителя через подводящие проводники определенного сечения, заданного в паспорте предохранителя. Необходимо помнить, что при уменьшении сечения проводников по сравнению с номинальным сечением увеличивается температура его плавкого элемента и контактного соединения, а при увеличении сечения температура уменьшается.

Рекомендациями МЭК предусмотрено, что сечение подводящих проводников надо выбирать из расчета номинальной плотности тока  $1-1,6 \text{ А/мм}^2$ . Как правило, изготовитель приводит в информационных материалах данные о сечении проводников, при котором установлен номинальный ток плавкой вставки, а также потери мощности в предохранителях.

По потере мощности можно судить о качестве предохранителей. Например, новые серии предохранителей ППН и ППНИ имеют на 30 % меньшие потери мощности, чем предохранители ПН2.

При эксплуатации предохранителей должна контролироваться температура контактных соединений. Температура контактных выводов плавких вставок в месте контакта с контактными зажимами основания обычно по техническим данным не превышает  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  у предохранителей на номинальный ток до 15 А,  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  – у предохранителей на ток до 100 А и  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  – на большие токи.

Необходимо обращать внимание на контакт плавкой вставки с держателем. При плохом контакте переходное сопротивление контакта может достигать 50 % электрического сопротивления плавкого элемента, отчего происходит перегрев предохранителя в номинальном режиме работы и уменьшается срок его службы.

Предохранители необходимо обслуживать в сроки, определяемые нормами ППРЭсх [24].

Достоинства плавких предохранителей следующие: 1) простота конструкции; 2) малые габариты; 3) высокая отключающая способность; 4) небольшая стоимость.

Предохранители имеют следующие недостатки:

1) плавкие элементы стареют с течением времени (исключение – плавкие элементы из серебра), вследствие чего они ложно срабатывают при пусковых токах или кратковременных перегрузках;

2) плавкие вставки имеют значительный разброс времени срабатывания в зависимости от состояния (холодное или горячее) плавкого элемента;

3) плавкая вставка однократного действия, после срабатывания ее необходимо заменять;

4) плавкие предохранители не защищают электрооборудование при незначительных перегрузках. Они надежно срабатывают только при трехкратных и более перегрузках по току;

5) плавкие предохранители не рекомендуются для защиты силовых цепей асинхронных электродвигателей. Это связано с тем, что при однофазных КЗ плавкая вставка перегорает в одной фазе и воз-

никает опасный для трехфазного электродвигателя неполнофазный режим работы. Они могут применяться как сопутствующие предохранители (совместно с тепловыми токовыми реле защиты от перегрузки).

### 2.13. Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит защитное действие предохранителя?
2. Из каких составляющих складывается время срабатывания предохранителя?
3. Какой ток называется номинальным током плавкой вставки предохранителя?
4. Какой ток плавкой вставки называется пограничным?
5. Объясните постоянную времени нагрева предохранителя и укажите, от чего она зависит.
6. Объясните суть металлургического эффекта в плавких вставках.
7. Объясните процесс перегорания плавкой вставки при перегрузках и токах КЗ.
8. Изобразите времятоковую характеристику предохранителя. Покажите на оси токов номинальный ток плавкой вставки.
9. Покажите на характеристике предохранителя пограничный ток.
10. Что влияет на время срабатывания предохранителя?
11. Изобразите характеристику токоограничения предохранителя и объясните ее параметры.
12. Изобразите интегральную характеристику предохранителя и объясните ее параметры.
13. Какие материалы используются для изготовления плавких вставок предохранителей инерционных, нормального быстродействия и быстродействующих?
14. Какие дугогасящие среды используются в предохранителях?
15. Какие требования предъявляются к наполнителям предохранителей?
16. Какие конструкции плавких элементов вы знаете?
17. Объясните классификацию предохранителей по назначению.
18. Объясните классификацию предохранителей по конструкции.
19. Назовите критерий быстродействия предохранителей и приведите классификацию предохранителей по быстродействию.
20. Дайте характеристику предохранителям серии ППН.
21. Дайте характеристику предохранителям серии ППНИ.

22. Объясните направления совершенствования плавких предохранителей и реализацию этих направлений.

23. По каким параметрам выбирается предохранитель?

24. Запишите критерии, по которым проверяется предохранитель.

25. Запишите критерий выбора быстродействующего предохранителя.

26. Запишите критерий селективности быстродействующих предохранителей.

27. В чем состоит особенность параллельного и последовательного соединений предохранителей?

28. Определите по данным рисунка 2.5, при каком токе сработает плавкая вставка на 10 А предохранителя ППТ10 за 1 с и определите кратность тока КЗ при этом условии.

29. Определите на данном рисунка 2.6, во сколько раз преддуговое время предохранителя ПП50 с плавкой вставкой на 25 А меньше полного времени срабатывания при токе КЗ 200 А.

30. Определите кратность тока срабатывания плавкой вставки на 100 А предохранителя ППНИ с горячего состояния при времени срабатывания 1 с.

31. Определите наименьшее время срабатывания предохранителя ППНИ с плавкой вставкой 20 А.

32. Определите значение интеграла Джоуля для плавкой вставки 100 А предохранителя ПП57 при токе КЗ 200 кА.

33. Запишите тип предохранителя общего назначения серии ППН на ток 200 А, имеющего собственное изоляционное основание, без указателя срабатывания, без бойка и свободных контактов, для установки в шкафу, в умеренном климате, внутри помещения.

34. Определите пропускаемый ток предохранителя ППНИ с плавкой вставкой 16 А при  $I_{КЗ} = 10^4$  А.

35. Определите номинальный ток плавкой вставки предохранителя ППНИ для защиты кабеля от тока КЗ. Кабель подключает к сети асинхронный электродвигатель мощностью 0,55 кВт,  $I_{н.дв} = 1,25$  А. Кратность пускового тока  $K_i = 4$ . Время пуска электродвигателя  $t_n = 0,2$  с. Установите время срабатывания выбранного предохранителя по защитным характеристикам.

36. Определите, какой ток плавкой вставки должен иметь предохранитель *FU2* (см. рисунок 2.20) по условиям селективности, если известно, что *FU3* того же типа имеет номинальный ток плавкой вставки 40 А, а кратность тока КЗ для *FU3* составляет 20.

37. Определите время срабатывания плавкой вставки 25 А предохранителя ППНИ при токах  $I_{КЗ} = 100$  А и  $I_{КЗ} = 300$  А.

2.38. Определите коэффициент токоограничения предохранителя ППНИ с плавкой вставкой 25 А при токах КЗ  $I_{КЗ1} = 1$  кА и  $I_{КЗ2} = 12$  кА.

39. Определите, какая плавкая вставка (40 А или 63 А) предохранителя ППНИ срабатывает раньше при токе 200 А, если плавкая вставка 63 А прогрета током, а 40 А включается холодной.

40. Определите кратности тока срабатывания плавких вставок 20 А и 200 А предохранителей ППНИ с горячего состояния за время срабатывания 1 с.

41. Определите, во сколько раз изменяется интеграл Джоуля предохранителя ПП57 с плавкой вставкой на 160 А при токах КЗ 3 кА и 100 кА.

42. Выберите предохранитель типа ППНИ для защиты силовых цепей асинхронного электродвигателя, имеющего номинальный ток 3,25 А; кратность пускового тока  $K_i = 6,5$ . Пуск асинхронного электродвигателя длится менее 1 с. Питание электродвигателя осуществляется кабелем АВВГ-4х2,5 мм<sup>2</sup>. Кабель частично проложен в трубе. Ток трехфазного КЗ  $I_{КЗ}^{(3)} = 459$  А, а однофазного КЗ  $I_{КЗ}^{(1)} = 151,4$  А. Время отпускания электромагнитного пускателя  $t_{отп} = 0,1$  с. Предохранитель предполагается установить в шкафу управления.

43. Выберите плавкую вставку предохранителя ППНИ для защиты осветительной линии с лампами ДРЛ, имеющей рабочий ток  $I_{раб} = 9,75$  А. Осветительная сеть включается пакетным выключателем. Линия выполнена кабелем АВВГ-4х2,5 мм<sup>2</sup>. Токи КЗ:  $I_{КЗ}^{(3)} = 300$  А;  $I_{КЗ}^{(1)} = 100$  А.

44. Проверьте на селективность предохранители серии ППНИ *FU3* и *FU2*, включенные по схеме рисунка 2.20, если номинальный ток плавкой вставки предохранителя *FU3* составляет 16 А, а *FU2* – 25 А. Ожидаемый ток КЗ  $I_{КЗ}^{(1)} = 160$  А.

## Глава 3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ЗАЩИТА С ИХ ПОМОЩЬЮ ОТ СВЕРХТОКОВ

### 3.1. Общие сведения и требования к автоматическим выключателям

*Автоматический выключатель* – механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях цепи, включать и проводить токи в течение определенного промежутка времени и прерывать их при определенных аномальных условиях цепи, например, при коротких замыканиях [25].

Автоматические воздушные выключатели имеют ручное местное или дистанционное управление. Они отключают электрическую цепь автоматически с помощью расцепителей при возникновении сверхтока или других аварийных режимов в цепи. Коммутация цепи происходит между подвижным и неподвижным контактами.

Упрощенно можно считать, что автоматические выключатели объединяют функции рубильника (или контактора при дистанционном включении) и реле защиты. Роль реле защиты от аварийного режима выполняют расцепители. *Воздушными* автоматы называют потому, что их контакты замыкаются и размыкаются в воздухе при атмосферном давлении [25].

Конструкции, характеристики и защитные функции автоматических выключателей весьма разнообразны. Можно условно разделить их по назначению и принципам конструирования на три большие группы: 1) общего назначения; 2) быстродействующие на большие постоянные токи; 3) специальные.

*Автоматические выключатели общего назначения* предназначены для работы в промышленных, сельскохозяйственных, бытовых и других установках. Они имеют пластмассовый корпус (кожух) и практически не выбрасывают наружу пламя и ионизированные газы при отключении сверхтоков. Их электромагнитные расцепители не регулируются в условиях эксплуатации. Часто такие автоматические выключатели называются *установочными*. Они могут, как правило, использоваться в цепях переменного и постоянного токов.

Различают автоматические выключатели общего назначения токоограничивающие и селективные. *Токоограничивающий автоматический выключатель* – выключатель с чрезвычайно малым временем отключения, в течение которого ток короткого замыкания не успевает достичь своего максимального значения [30]. В токоограничивающих автоматических выключателях при больших токах КЗ под действием электромагнитных сил еще до момента срабатывания расцепителя контакты расходятся на малое расстояние (до 1–1,5 мм), возникает электрическая дуга и ток КЗ через 1 мс ограничивается за счет сопротивления дуги в 2–5 раз. После этого срабатывает расцепитель и контакты расходятся окончательно. Полное время срабатывания токоограничивающих автоматов составляет 10–15 мс.

В *селективных автоматических выключателях* обеспечивается регулируемая выдержка времени перед отключением, не зависящая от величины тока КЗ. Обычно селективными являются автоматические выключатели с электронными расцепителями.

*Быстродействующие автоматические выключатели постоянного тока* на большие токи имеют время срабатывания 2–8 мс вместо 50–100 мс для установочных не токоограничивающих автоматических выключателей. Для достижения такого малого времени отключения требуются другие принципы работы расцепителей и всей механической системы автомата [26]. В электрооборудовании сельскохозяйственных предприятий такие автоматические выключатели не встречаются, поэтому в учебно-методическом пособии они не рассматриваются.

К специальным автоматическим выключателям относятся выключатели гашения магнитного поля возбуждения больших по мощности машин постоянного тока [26], не встречающиеся в электрооборудовании сельскохозяйственных предприятий.

Таким образом, в дальнейшем рассматриваются только установочные автоматические выключатели переменного и постоянного токов.

К автоматическим выключателям предъявляются следующие требования:

1) в течение продолжительного времени токоведущие части выключателя должны пропускать номинальный ток, не перегреваясь. На этот ток рассчитаны его присоединительные зажимы, контакты, электромагнитные расцепители;

2) в течение короткого времени через токоведущую цепь автоматического выключателя может протекать значительный ток КЗ, и элементы этой цепи должны выдержать этот ток, не разрушаясь;

3) автоматические выключатели должны иметь малое время отключения. Это позволит обеспечить электродинамическую и термическую стойкость защищаемых электроустановок, уменьшить разрушение и другие последствия, возникающие от больших токов КЗ;

4) автоматические выключатели должны иметь минимальные зоны выхлопа нагретых и ионизированных газов в процессе гашения дуги. Это позволит уменьшить габариты распределительного устройства и повысить безопасность обслуживания;

5) расцепители автоматических выключателей должны обеспечить необходимые уставки срабатывания и селективность. Удобно иметь регулируемые по току срабатывания и задержке времени расцепители.

### 3.2. Принцип действия автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем максимального тока

Для отключения тока КЗ используются автоматические выключатели с электромагнитным расцепителем максимального тока. Этот расцепитель является основным в автоматических выключателях.

Принцип действия автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем максимального тока рассмотрим на примере однополюсного аппарата (рисунок 3.1). Он включается с помощью рукоятки 1 (т. е. замыкается подвижный контакт 2 с неподвижным контактом 4, сжимается отключающая пружина 5, и рычаг 6 сцепляется с защелкой 7). Пружина 8 удерживает защелку от размыкания.

При протекании токов нагрузки меньших, чем ток КЗ, электромагнитный расцепитель не срабатывает, хотя на его якорь 12 действует сила, сжимающая регулировочную пружину 10 и стремящаяся расположить его по оси катушки расцепителя 11.

При токах КЗ якорь электромагнита 12 перемещается к оси катушки, преодолевая противодействие регулировочной пружины 10. Боек 9, приобретя кинетическую энергию, совместно с якорем электромагнита 12 перемещается вверх и ударяет по защелке 7. Защелка поворачивается и расцепляется с рычагом 6.

Под действием отключающей пружины 5 подвижный контакт 2 отходит от неподвижного контакта и цепь нагрузки разрывается. Возникающая при разрыве цепи дуга гаснет в дугогасительной решетке 3.

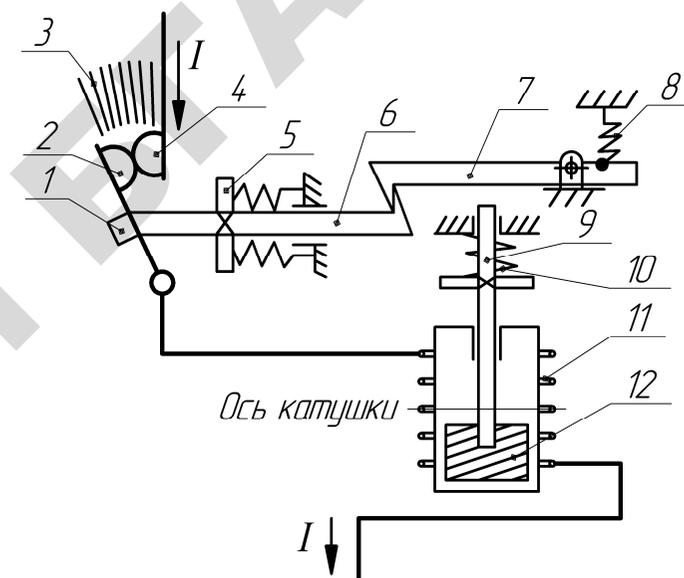


Рисунок 3.1 – Упрощенная схема автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем максимального тока:

1 – рукоятка; 2 – подвижный контакт; 3 – дугогасительная решетка; 4 – неподвижный контакт; 5 – отключающая пружина; 6 – рычаг; 7 – защелка; 8 – пружина защелки; 9 – боек; 10 – регулировочная пружина; 11 – катушка расцепителя; 12 – якорь электромагнита

Ток срабатывания электромагнитного расцепителя можно изменить за счет уменьшения или увеличения числа витков катушки расцепителя при изготовлении его на заводе-изготовителе или путем изменения степени сжатия регулировочной пружины 10. С увеличением степени сжатия пружины ток срабатывания увеличивается, при уменьшении степени сжатия – уменьшается.

В расцепителях клапанного типа (с поворотным якорем) применяется растягивающая регулировочная пружина. Ее действие аналогично: с увеличением степени растяжения ток срабатывания увеличивается и наоборот.

Большинство современных автоматов с электромагнитным расцепителем максимального тока не допускают регулировку тока срабатывания в эксплуатации. Для них указывается одно минимальное, гарантированное значение тока срабатывания. При больших значениях автомат также срабатывает. Только при ремонте автомата возникает необходимость регулировки его тока срабатывания.

На рисунке 3.1 приведена упрощенная схема автоматического выключателя с электромагнитным расцепителем максимального тока соленоидного типа, встречающаяся в автоматических выключателях АП50. В реальных конструкциях автоматов применяются более сложные кинематические схемы.

Независимо от конструктивного выполнения автоматических выключателей с расцепителем максимального тока, основные физические процессы в нем связаны со следующими факторами: 1) с гашением дуги при разрыве тока; 2) с обеспечением несвариваемости и минимального износа контактов; 3) с обеспечением надежного срабатывания при КЗ.

### 3.3. Условия существования и гашения дуги в автоматических выключателях

Искры между расходящимися контактами образуются при малых токах и значительных напряжениях или при напряжениях ниже 15–20 В и любых по величине токах. На рисунке 3.2 приведены линии минимальных токов дугообразования на контактах из различных материалов [27]. Токи, величины которых на рисунке 3.2 размещаются левее линий, вызывают искры на контактах, а правее – дуги.

Линии на рисунке 3.2 изображены по приближенным значениям, поскольку на величину тока дугообразования влияют состояние контактов, наличие примесей и загрязнений в газовой среде, характер нагрузки (индуктивная, активная или емкостная) в отключаемой цепи. Минимальные токи дугообразования снижаются с повышением температуры газовой среды и контактов.

Из рисунка 3.2 следует, что при напряжении 220 В искрение на контактах возможно при токах менее 0,5 А. При больших токах на контактах имеет место дугообразование.

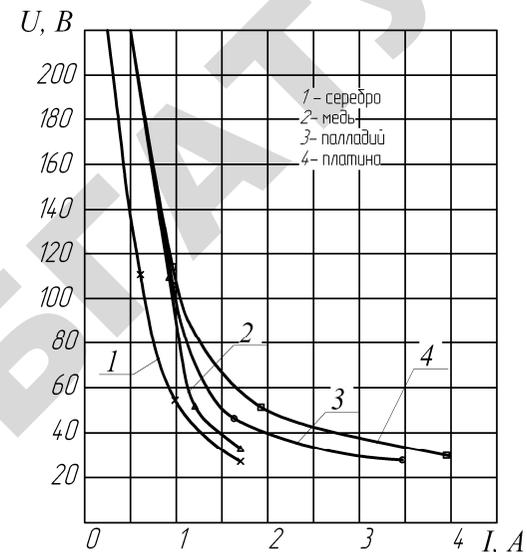


Рисунок 3.2 – Минимальные токи дугообразования на контактах из разных материалов

Дуга или искры между расходящимися контактами создают токопроводящую связь в цепи в течение малого промежутка времени. В этот период электромагнитная энергия цепи, запасенная в индуктивных или емкостных элементах, преобразуется в тепловую энергию электрической дуги или искры, не создавая недопустимых перенапряжений на контактах. В этом состоит положительное значение дуги или искры. При «мгновенном» размыкании контактов создаются недопустимо высокие перенапряжения в цепи.

Дуга и искры имеют большие температуры (6000 °С и больше). Они выжигают контакты. В этом их отрицательное значение.

Дуга между контактами в цепи постоянного тока образует ствол дуги и содержит прианодную и прикатодную области (рисунок 3.3).

У электродов (контактов) на промежутке  $10^{-6}$  м имеет место резкое падение напряжения. Эти напряжения называют *катодным*  $U_k$  и *анодным*  $U_a$  (рисунок 3.3). Суммарное значение этих напряжений  $U_s$  составляет 15–30 В, причем у катода – 10–20 В и не зависит от тока. Градиент напряжений в этих областях очень высокий и составляет  $10^7$ – $10^8$  В/м, а на стволе дуги  $E = (2-3)10^3$  В/м, т. е. в десятки тысяч раз меньше.

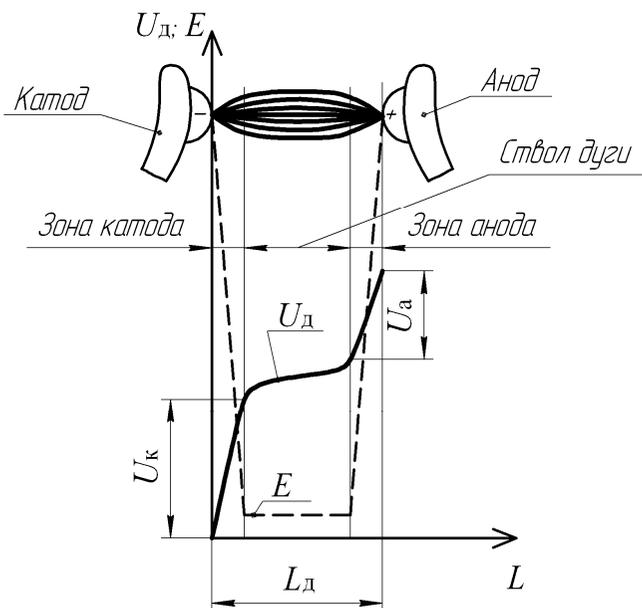


Рисунок 3.3 – Распределение напряжения дуги  $U_d$  и градиента напряжения  $E$  в стационарной дуге постоянного тока

Околоэлектродное падение напряжения  $U_s$  не зависит от длины дуги  $l$ , а падение напряжения на стволе дуги пропорционально длине дуги, т. е.  $E_d l_d$ . Падение напряжения  $U_d$  на дуговом промежутке:

$$U_d = U_s + E_d l_d, \quad (3.1)$$

где  $E_d$  – градиент напряжения на дуге, В/м.

Для одного дугового промежутка, материала электродов и среды имеется одна *статическая характеристика дуги*  $U_d = f(I_d)$ . Эта характеристика соответствует установившемуся равновесному состоянию в дуге, когда ионизация воздуха равна деионизации. При этом подводимая к дуге мощность равна отводимой в окружающую среду мощности.

Статическая характеристика дуги имеет падающий криволинейный характер (рисунок 3.4). Выгиб кривой вниз свидетельствует о том, что сопротивление дуги уменьшается быстрее, чем увеличивается ток.

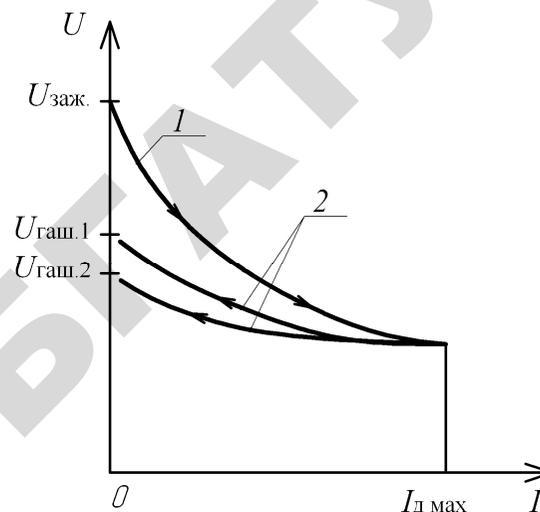


Рисунок 3.4 – Вольт-амперные характеристики дуги постоянного тока: 1 – статическая характеристика; 2 – динамическая характеристика

*Динамической* называется характеристика дуги при неустановившемся состоянии дуги, т. е. при изменении тока и напряжения во времени (в динамике). Чем быстрее изменяется ток в дуге, тем ниже будет лежать динамическая характеристика дуги. Это объясняется инерционностью дуги. Степень ионизации дуги и ее температура не могут мгновенно изменяться. Поэтому в динамике параметры дуги не успевают соответствовать значениям статической характеристики.

Напряжение, при котором дуга зажигается, называется *напряжением зажигания дуги*  $U_{зак}$ , а напряжение, при котором дуга гаснет, – *напряжением гашения дуги*  $U_{гаш}$ , причем  $U_{зак} > U_{гаш}$  (рисунок 3.4). Если падение напряжения на дуге  $U_d$  характеризует дуговой промежуток как проводник, то напряжения зажигания и гашения характеризуют изоляционные свойства промежутка.

Электрическую сеть постоянного тока в период горения дуги можно представить как последовательно включенные индуктивность  $L$ , сопротивление  $R$  и дугу  $U_d$  (рисунок 3.5, а). Сеть обладает некоторой емкостью  $C$ . Ее действие проявляется в переходном процессе. Кроме этого, сеть имеет конечное значение сопротивления изоляции  $R_{из}$ .

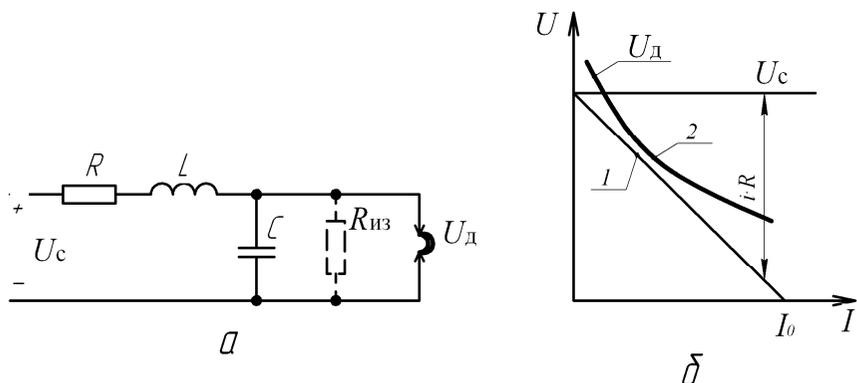


Рисунок 3.5 – Электрическая схема сети (а) и графические зависимости к условию гашения дуги постоянного тока (б):  
1 – реостатная характеристика сети; 2 – характеристика дуги

В любой момент горения дуги напряжение сети  $U_c$  уравновешивается тремя напряжениями: 1) на дуге  $U_d$ ; 2) на активном сопротивлении  $iR$ ; 3) на индуктивном сопротивлении  $L di/dt$ . Это можно выразить уравнением

$$U_c = U_d + iR + L di/dt, \quad (3.2)$$

При устойчиво горящей дуге изменение тока не наблюдается, т. е.  $di/dt = 0$ . В этом случае уравнение (3.2) запишется в виде

$$U_c = U_d + iR. \quad (3.3)$$

В автоматических выключателях необходимо обеспечить гашение дуги в процессе отключения. Это значит, ток дуги должен уменьшаться, чему соответствует условие  $di/dt < 0$ . Из выражения (3.3) имеем:

$$U_d > U_c - iR, \quad (3.4)$$

т. е. напряжение, подводимое к дуге, должно быть недостаточным для ее горения.

Условие (3.4) в графическом виде представлено на рисунке 3.5, б. Графическая зависимость  $U_d = f(I_d)$  лежит выше линии  $(U_c - iR)$  и не соприкасается с ней. Прямая 1 (рисунок 3.5, б) соответствует зависи-

мости  $(U_c - iR)$  и называется *реостатной характеристикой сети*. Она соединяет на графике две точки на осях координат:  $U_c$  – напряжение источника питания;  $I_0$  – заданный отключаемый ток.

Предположим, что вольт-амперная характеристика дуги пересекается с реостатной характеристикой сети в точках 1 и 2 (рисунок 3.6). В этих точках имеет место равновесное состояние и  $L di/dt = 0$ . Однако в точке 1 это равновесие неустойчиво. Если по какой-то причине ток станет больше  $i_1$ , то из-за того, что  $U - iR > U_d$  (есть «избыточное» напряжение), он сразу увеличится до значения  $i_2$ . Производная  $L di/dt$  на этом участке положительна, это означает, что в цепи накапливается электромагнитная энергия.

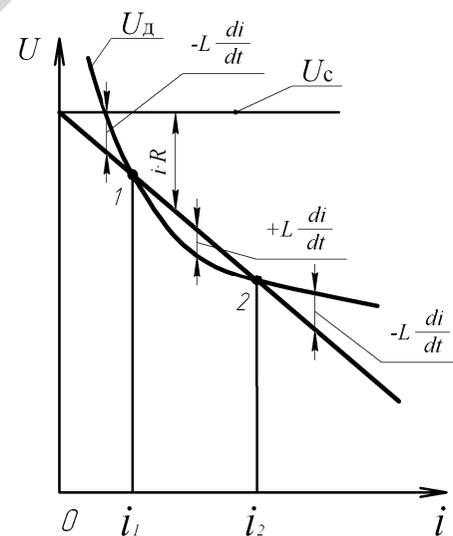


Рисунок 3.6 – Устойчивость дуги постоянного тока в точке 2 и неустойчивость в точке 1

В точке 2 равновесие устойчивое. При больших токах, чем  $i_2$ , имеем  $U_d > U - iR$  и  $L di/dt < 0$ , т. е. для поддержания большого значения тока напряжение  $U$  недостаточное. Ток в цепи будет падать до значения  $i_2$ .

Таким образом, условие гашения дуги постоянного тока на контактах состоит в том, что во всем диапазоне изменения тока (от максимального до нуля) характеристика дуги должна лежать

выше реостатной характеристики сети. Это условие необходимое, но не достаточное. Связано это со следующим: после размыкания контактов автомата (момент  $t_1$ , рисунок 3.6) сопротивление дуги начинает увеличиваться вследствие охлаждения столба дуги дугогасительным устройством. Напряжение на дуге  $U_d$  растет, но при усиленном гашении оно будет меньше восстанавливающейся электрической прочности  $U_{в.пр}$  межконтактного промежутка.

Под *восстанавливающейся электрической прочностью дугового (межконтактного) промежутка* понимается пробивное напряжение, которое способно вызвать повторное зажигание дуги в этом промежутке в тот или иной момент времени [26].

В конце процесса гашения дуги, когда ток измеряется величиной менее 1 А и резко обрывается при значении напряжения гашения, в момент  $t_2$  возникает перенапряжение на контактах и в сети. В этот момент не расходуемая в дуге электромагнитная энергия на индуктивности уменьшается до нуля, а емкость проводов сети заряжается до максимального значения. Чем больше индуктивность сети, тем выше перенапряжение. Избыточные заряды, образующиеся на емкостях сети, рассеиваются через сопротивление утечки изоляции сети, и перенапряжение спадает до напряжения сети.

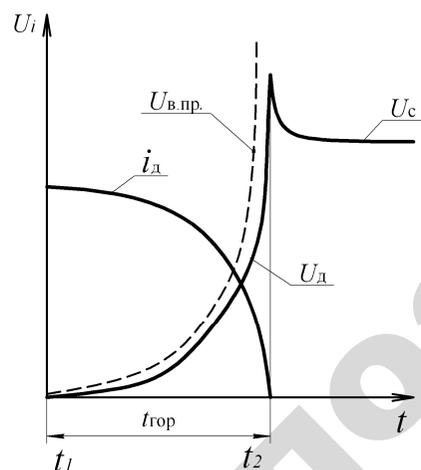


Рисунок 3.7 – Характер изменения тока дуги  $i_d$ , напряжения на дуге  $U_d$ , восстанавливающейся прочности дугового промежутка  $U_{в.пр}$  в цепи постоянного тока

Таким образом, необходимое условие гашения дуги постоянного тока должно быть дополнено достаточным условием: восстанавливающая электрическая прочность межконтактного промежутка должна быть больше напряжения на дуге, т. е.  $U_{в.пр} > U_d$ .

В цепях переменного тока создаются более благоприятные условия для гашения дуги, потому что переменный ток любой величины периодически проходит через нулевое значение. В это мгновение наблюдается интенсивный рост восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка. В момент  $t_2$  ( $i = 0$ ) (рисунок 3.8) восстанавливающаяся прочность равна  $U_{в.пр}$ , а напряжение на контактах желает восстановиться до сетевого, но из-за незакончившегося процесса деионизации промежутка по причине инерционности составляет сначала нулевое значение.

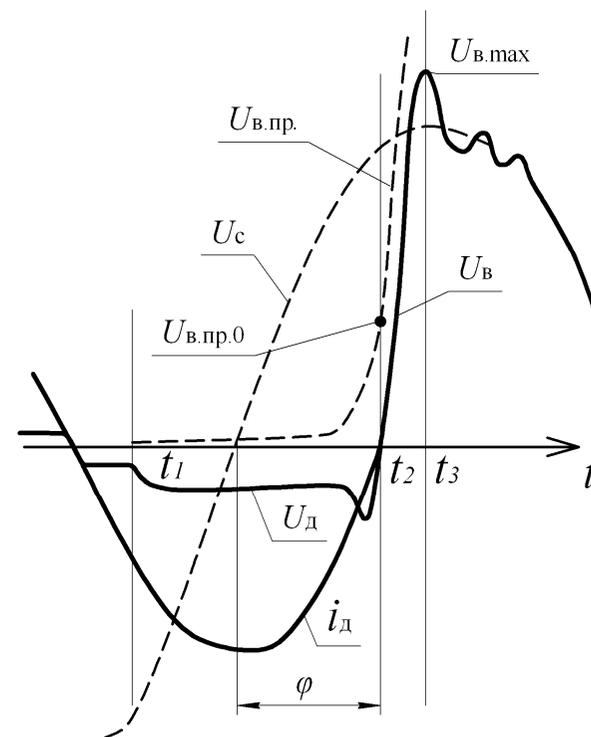


Рисунок 3.8 – Характер изменения тока дуги  $i_d$ , напряжения на дуге  $U_d$ , восстанавливающейся прочности  $U_{в.пр}$  дугового промежутка, восстанавливающегося напряжения  $U_{в}$  цепи переменного тока

В следующем промежутке времени (от  $t_2$  до  $t_3$ ) восстанавливающееся напряжение  $U_v$  достигает сетевого напряжения и превышает его из-за электромагнитных явлений в индуктивности  $L$  и емкости  $C$ , из-за сопротивления  $R_{из}$  и остаточного сопротивления  $R_{ост}$  межконтактного промежутка, причем  $R_{ост} < R_{из}$ . При  $R_{из} = \infty$  наблюдаются колебания напряжения с собственной частотой (Гц):

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.5)$$

В реальных сетях низкого напряжения  $f_0 = 1-100$  кГц коэффициент амплитуды  $K_a = U_{max}/U$  восстанавливающегося напряжения составляет 1,1-1,5.

В теории восстанавливающегося напряжения доказывается, что в зависимости от соотношения параметров цепи может наблюдаться колебательный (периодический) или экспоненциальный (апериодический) процесс восстановления напряжения. Условия перехода колебательного процесса в апериодический определяются соотношением

$$R_{ост} \leq \pi f_0 L. \quad (3.6)$$

Таким образом, условие гашения дуги переменного тока следующее: электрическая дуга переменного тока будет погашена и цепь отключена, если за переходом тока дуги через нулевое значение кривая восстанавливающейся прочности  $U_{в,пр}$  межконтактного промежутка будет лежать выше кривой восстанавливающегося напряжения  $U_v$ . Если эти кривые пересекаются, то возникает повторное зажигание электрической дуги на контактах.

В автоматических выключателях дуга перемещается по расходящимся контактам и «рогам» со скоростью  $V_d$  под действием сил электромагнитного взаимодействия дуги (тока) с магнитным полем контура тока (рисунок 3.9). Скорость перемещения дуги между электродами изменяется от расстояния между электродами. Можно выделить три характерных момента поведения дуги между контактами.

На I участке имеет место не дуга, а перешеек из расплавленного металла. Его длина составляет не более 0,5-2 мм и зависит от материала электродов и силы тока. Дуга (перешеек) на этом участке почти не движется.

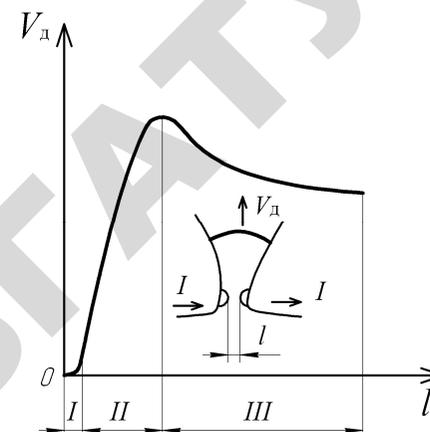


Рисунок 3.9 – Зависимость скорости движения дуги от расстояния между электродами

На II участке наблюдается резкое возрастание скорости дуги с увеличением расстояния между электродами. Перешеек расплавленного металла рвется, возникает дуговой разряд. С увеличением длины дуги влияние капель и паров металла уменьшается, а объем ионизированного газа увеличивается.

Увеличение скорости расхождения контактов на I и II участках способствует уменьшению износа контактов и улучшает условия гашения дуги.

На III участке имеет место расширение дуги, растягивание и расщепление ее под действием встречного потока воздуха. Скорость ее поперечного перемещения уменьшается.

В ограниченном объеме погасить дугу за счет растяжения ее в атмосферном воздухе затруднительно. Но ее можно растянуть зигзагообразно, направив дугу на препятствие в виде перегородок из теплоустойчивого материала (в дугогасительных камерах) или на стальные пластины (в дугогасительных решетках).

В дугогасительных камерах наиболее эффективного щелевого типа (рисунок 3.10, а) имеется узкий просвет (щель) между стенками из дугоустойчивого изоляционного материала (асбоцемента, керамики, кордиерита и т. п.). В щель загоняется электрическая дуга 2 принудительно (обычно с помощью магнитного поля). Там она

«расплющивается» в узкой щели и гасится за счет усиленного отвода тепла от нее при тесном соприкосновении со стенками дугогасительной асбестоцементной камеры 1. Дугогасительные камеры используются в контакторах и в автоматических выключателях на большие токи.

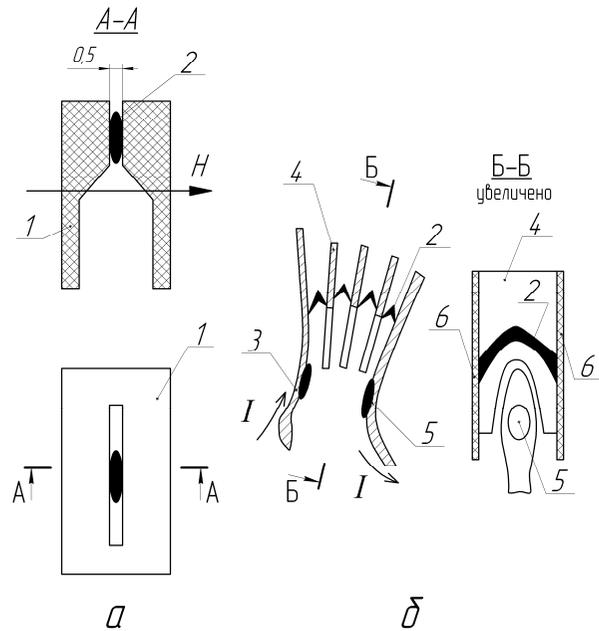


Рисунок 3.10 – Сечения дугогасительной щелевой камеры (а) и дугогасительной решетки (б):

1 – дугогасительная асбестоцементная камера; 2 – электрическая дуга; 3, 5 – неподвижный и подвижный контакты; 4 – стальная пластина решетки; 6 – изоляционные теплостойкие пластины;  $H$  – направление действия внешнего магнитного поля

Дугогасительная решетка (рисунок 3.10, б) имеет пакет стальных пластин толщиной 1–3 мм, разделенных воздушными промежутками шириной не менее 2 мм. Стальные пластины закреплены боковыми сторонами в изоляционных теплостойких пластинах 6. При расхождении контактов 3 и 5 возникает электрическая дуга 2, которая за счет электродинамических сил контура тока 3–2–5 переходит на стальные пластины 4 решетки, разбивается на отдельные

дуги и охлаждается в решетке. Этому перемещению способствуют именно ферромагнитные пластины. Магнитный поток, образованный током дуги, замыкается по пластинам и выравнивает скорость отдельных дуг между пластинами. Даже при малых токах дуга не останавливается под решеткой. При медных или латунных пластинах наблюдается остановка дуги под решеткой при малом токе. Только при частоте тока более 500 Гц эффективность стальных пластин начинает уменьшаться из-за появления вихревых токов в пластинах. При частоте более 2,5 кГц стальные пластины перестают втягивать дугу. В этом случае вместо стальных пластин используют латунные пластины, обладающие большей восстанавливающей прочностью. Латунные пластины при частоте тока 50 Гц менее эффективны, чем стальные пластины.

Закономерность нарастания во времени восстанавливающей прочности межконтактного промежутка является основной характеристикой дугогасительного устройства в сети переменного тока.

Периоды восстановления электрической прочности межконтактного промежутка от состояния проводника до диэлектрика изображены на рисунке 3.11.

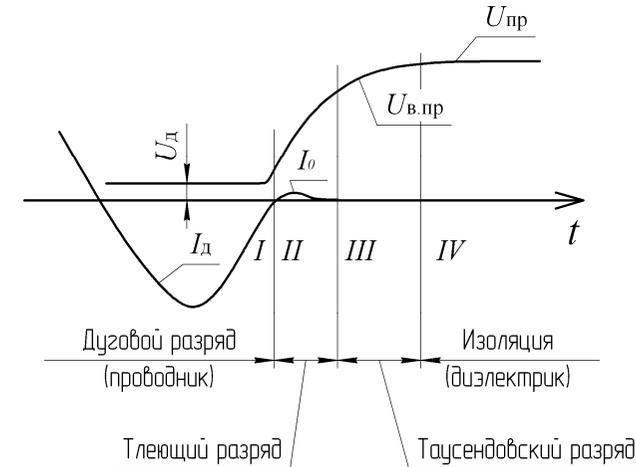


Рисунок 3.11 – Периоды восстановления электрической прочности расходящихся контактов автомата переменного тока:  
 $I_d$  – ток дуги;  $I_0$  – остаточный ток газового промежутка;  
 $U_{в.пр}$  – напряжение восстанавливающей прочности;  
 $U_{пр}$  – пробивное напряжение

В I период проводящий ток дуги уменьшается до нуля; восстанавливающаяся прочность равна напряжению на дуге  $U_d$ .

Во II периоде существует кратковременно остаточный ток  $I_0$  (мА) и тлеющий разряд. Восстанавливающая прочность образуется на приэлектродных участках. Скорость ее роста определяется скоростью охлаждения контактов и газовой среды.

В III период прочность восстанавливается по всей длине газоразрядного столба. Для этого периода характерен таунсендовский разряд. Скорость восстанавливающегося напряжения уменьшается.

В IV период прочность промежутка восстанавливается до пробивного напряжения окружающей среды. Межконтактный промежуток становится диэлектриком.

Таким образом, определяющим для восстановления электрической прочности межконтактного промежутка является II этап, который связан с охлаждением дуги под действием дугогасительного устройства (камеры или решетки).

Положительное значение дугогасительной решетки заключается в следующем:

1) позволяет охлаждать дугу в малом объеме при уменьшении сопровождающих дугу световых и звуковых эффектов;

2) в автоматах постоянного тока дугогасительная решетка «поднимает» вольт-амперную характеристику выше одноименной характеристики открытой дуги (без дугогасительной решетки) и тем самым обеспечивает выполнение условия гашения дуги постоянного тока. При наличии дугогасительной решетки это условие запишется в виде

$$U_{д.р} = U_3 (m - 1) + U_d > U_c - i R, \quad (3.7)$$

где  $U_{д.р}$  – напряжение на дуге при наличии дугогасительной решетки, В;

$m$  – число пластин дугогасительной решетки. Остальные величины формулы раскрыты в формулах (3.1)–(3.4);

3) дугогасительная решетка в автоматах переменного тока повышает активное сопротивление дуги в процессе его гашения. В результате она ограничивает величину тока и приводит к уменьшению угла сдвига фаз между током и напряжением, вследствие чего ток проходит через нуль раньше своего естественного перехода через нуль. При этом облегчаются условия процесса восстановления напряжения и уменьшается длительность горения дуги. После

прохождения тока через нуль быстро восстанавливается электрическая прочность промежутков между пластинами до 300 В при малых токах и до 70 В при больших токах. Благодаря быстрому росту восстанавливающейся прочности число пластин дугогасительной решетки в аппаратах переменного тока в 7–8 раз меньше, чем в аппаратах постоянного тока.

### 3.4. Эрозия и дуговой износ контактов автоматических выключателей

*Эрозия контактов* – перенос материала контакта с одного контакта на другой контакт.

*Дуговой износ контактов* – выгорание контактов под воздействием электрической дуги.

Электрическая эрозия наблюдается при небольших токах. При больших токах характерен дуговой износ контактов. Он определяет коммутационную износостойкость автоматического выключателя, т. е. его способность гарантированно выполнять определенное число отключений в заданных условиях, обычно предельного отключаемого тока. *Коммутационная износостойкость* автоматических выключателей меньше, чем контакторов, и составляет до 30 вкл./час. Это объясняется тяжелыми условиями отключения токов КЗ из-за большой плотности тока у электродов ( $10^{11}$ – $10^{20}$  А/м<sup>2</sup>) и высокой температурой дуги (6 000–20 000 °С). Металл контактов на участке основания дуги плавится и взрывообразно испаряется. При этом из электродов выбрасываются пары металла и капель размером от 1 мкм до 2 мм. Начальная скорость их примерно 5 м/с. Возникают потоки разогретых паров металлов, газовых и ионизированных частиц в направлении от основания дуги в дуговой столб, называемые *потоками плазмы*. При токах в сотни ампер скорость их фронта достигает десятков метров в секунду, а длина – десятков сантиметров. В межэлектродном промежутке образуется облако плазмы. Потоки плазмы влияют на износ контактов, во-первых, вследствие уноса ими частиц металла из электродов (выгорания электродов), во-вторых, вследствие выделения уносимой ими тепловой энергии на поверхности противоположного электрода.

Вопросы эрозии и дугового износа контактов недостаточно изучены. Количественно оценивают износ по различным эмпирическим

формулам. Обычно рассчитывается удельный массовый или объемный износ.

Объемный износ контактов  $V$  (мм<sup>3</sup>) на 1 отключение зависит от материала контактов, величины тока  $I_0$  в степени  $\alpha$  и от времени  $t$  (с) горения дуги [18]:

$$\Delta V = K_{\theta} (6400 \cdot I_0)^{\alpha} \cdot t, \quad (3.8)$$

где  $K_{\theta}$  и  $\alpha$  – коэффициент и показатель степени, определяющие характер износа контактов из различных материалов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Коэффициент  $K_{\theta}$  и показатель степени  $\alpha$ , характеризующие объемный дуговой износ контактов

Материал	Коэффициент $K_{\theta}$		Показатель степени $\alpha$	
	анода	катода	анода	катода
Медь	26,0	8,0	1,25	1,75
Серебро	19,0	7,0	1,4	1,8
Композиция:				
серебро–никель	0,3	0,2	2,0	2,5
серебро–окись кадмия	0,8	0,06	1,7	2,2
серебро–вольфрам	0,9	0,7	1,6	1,7
серебро–графит	37,0	78,0	0,8	0,6

Из таблицы 3.1 следует:

1) композиционные материалы подвержены меньшему износу (меньше коэффициент  $K_{\theta}$ , чем у меди и серебра, за исключением состава серебро–графит);

2) с увеличением тока  $I_0$  у состава серебро–графит скорость износа будет наименьшей (показатель степени  $\alpha$  меньше единицы). Такой состав пригоден для дугостойких контактов.

Если сопоставить удельный дуговой износ контактов из различных чистых материалов, то при токе 12 кА и короткой дуге наименьшему износу подвержен графит. За графитом стоят следующие по параметру возрастания дугового износа материалы: вольфрам; молибден; никель; железо; титан; серебро; цинк; алюминий; олово. Из этого следует, что тугоплавкие материалы подвержены меньшему дуговому износу. Однако они имеют повышенное удельное электрическое сопротивление и для электрических контактов не пригодны. Выход найден в использовании композиционных материалов (металлокерамики) для контактов автоматов. Большая часть такого состава образована хоро-

шим проводником (обычно серебром), а меньшая содержит тугоплавкий дугостойкий материал.

Металлокерамические контакты изготавливают из порошковых металлов методом прессования из смеси заданного состава в форме уже готового изделия с последующим спеканием прессовок и отжигом.

Обычно в установочных (или универсальных) автоматах применяются контакты с разным сочетанием металлокерамики, например, серебро–никель в паре с композицией серебро–графит или в паре с композицией серебро–никель–графит. При больших номинальных токах (>250 А) иногда автоматы имеют главные и вспомогательные дугостойкие контакты (рисунок 3.12). Дугостойкие контакты 1 и 4 замыкаются первыми и размыкаются последними. Они выполняются обычно из композиции медь–графит, имеющей 73 % меди и 3 % графита (марка КМК-Б10), или серебро–графит в аналогичной пропорции (КМК-А41).

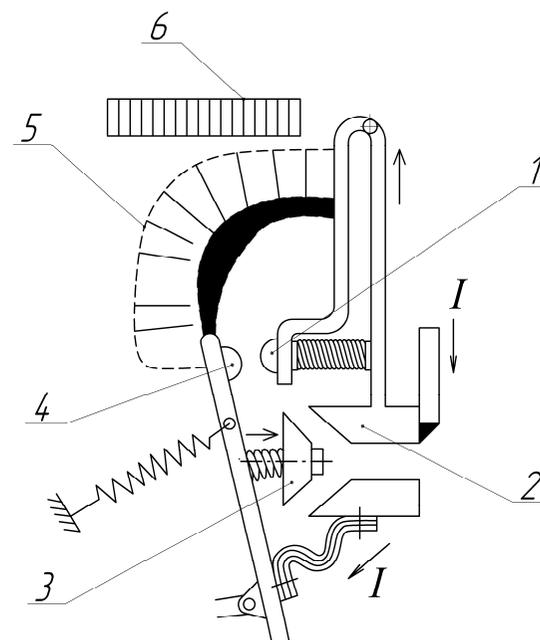


Рисунок 3.12 – Фрагмент контактной системы с основными и вспомогательными дугостойкими контактами: 1, 4 – дугогасительные контакты; 2, 3 – основные контакты; 5 – дугогасительная решетка; 6 – пламягасительная решетка

Используются так же металлокерамика СВ50 (серебро-вольфрам) на неподвижном контакте и СН-29ГЗ на подвижном контакте. Главные контакты обычно выполняются медными, с гальваническим покрытием (слой 20 мкм) из серебра или, при больших токах, из припаянных серебряных пластин. Через главные контакты в продолжительном режиме проходит 70–80 % тока, поскольку контактное сопротивление их меньше, чем дугостойких контактов.

Наличие дугостойких материалов в контактах благоприятно влияет на снижение износа контактов при вибрациях, возникающих после удара подвижного контакта о неподвижный. Если при этом между контактами возникает зазор, то образуется электрическая дуга и контакты изнашиваются. При больших токах у основания дуги металл контакта расплавляется, и при последующем соединении контактов они свариваются. У дугостойких металлокерамических контактов износ при вибрациях меньше и сваривание контактов не наблюдается.

Время вибрации контактов прямо пропорционально массе контакта и его скорости движения и обратно пропорционально силе прижатия контактов. Для уменьшения вибрации увеличивают жесткость включающей пружины и уменьшают кинетическую энергию подвижного контакта (его массу и скорость движения).

При больших номинальных токах для нажатия контактов используется электродинамическое усилие от протекающего тока. На рисунке 3.13, *а* показан фрагмент контактной системы с электродинамическим компонентом. Неподвижный контакт 3 закреплен на конце стержня (проводника) 2. Этот проводник параллелен проводнику 1 и соединен с ним в точке 0 шарнирно, с возможностью поворота вокруг оси 0. При ударе подвижного контакта 4 по неподвижному контакту 3 проводник 2 смещается влево, и незначительно сжимается пружина 5. Силе нажатия  $F_{\text{наж}}$  подвижного контакта противодействует сила амортизации  $F_{\text{а}}$  пружины 5. При возникновении тока в контуре проводников 1 и 2 дополнительно возникает электродинамическая сила  $F_{\text{эд}}$  отталкивания проводников 1 и 2, которая увеличивает нажатие контактов и исключает их вибрацию. Такой механизм действия используется в селективных автоматических выключателях АЗ700.

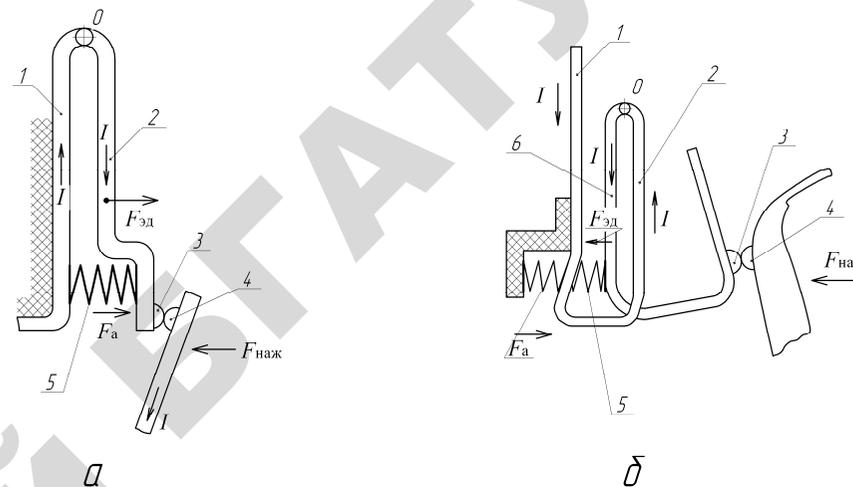


Рисунок 3.13 – Схема контактной системы автоматического выключателя, обеспечивающая образование электродинамического прижимающего усилия в контакте (*а*) и упреждающего отрыва контактов под действием электродинамического усилия при КЗ (*б*):

- 1, 2 – параллельные проводники; 3, 4 – контакты; 5 – пружина;  
6 – дополнительный параллельный проводник с контактом 3 и возможностью поворота вокруг оси 0

Следует отметить, что в токоограничивающих автоматических выключателях той же серии используются электродинамические силы для ускорения размыкания контактов при токах КЗ. На рисунке 3.13, *б* показана контактная система такого автомата. При замыкании контактов 3 и 4 ток течет по трем параллельным стержням (проводникам) 1, 2 и 6. В стержнях 1 и 6 токи параллельны и протекают в одном направлении. Следовательно, между ними действует сила притяжения. Между стержнями 6 и 2 действует сила отталкивания, поскольку токи в них противоположны. Таким образом, на стержень 6 обе силы действуют в одном направлении  $F_{\text{эд}}$ , указанном на рисунке 3.13, *б*. Эта электродинамическая сила  $F_{\text{эд}}$  мала при номинальных токах.

При токах КЗ электродинамическая сила возрастает, и стержень 6 с контактом 3 отбрасывается влево.

Как следствие этого, возникает дуга между контактами 3 и 4. Если ток цепи более 100 кА, то через 1 мс за счет сопротивления дуги ток уменьшается до 20–50 кА [28]. Нового касания контактов

не происходит, так как электромагнитный расцепитель максимального тока срабатывает, и расхождение контактов 3 и 4 окончательно завершается.

### 3.5. Основные элементы автоматических выключателей общего назначения

Автоматические выключатели общего назначения, независимо от конструкции, состоят из следующих основных элементов: контактной системы; дугогасительной системы; привода и механизма передачи усилия от привода к контактам; механизма расцепления и расцепителей; вспомогательных контактов.

*Контактная система* – главный элемент выключателя. Материалы для контактов рассмотрены в п. 3.4. Автоматы на большие токи имеют главные и дугогасительные контакты. Дугогасительные контакты включаются первыми, а отключаются – вторыми, принимая на себя отключение токов КЗ и дугу.

*Дугогасительная система* обеспечивает гашение дуги в ограниченном объеме. Широкое распространение получили камеры со стальными дугогасительными решетками и камеры с узкими щелями. Под воздействием электродинамических сил, созданных контуром отключаемого тока, дуга растягивается между расходящимися контактами, входит в дугогасительную решетку, дробится на части и гаснет (см. п. 3.3). Автоматы на большие токи имеют дополнительно пламягасительные решетки.

Автоматические выключатели включаются обычно с помощью *ручного привода*. Автоматы на большие токи включаются дистанционно с помощью электромагнитного или электродвигательного привода. Дистанционное управление перспективно. Недостатком электромагнитного привода является большая скорость движения подвижного контакта, приводящая к ударам и вибрации контактов. Электродвигательный привод имеет плавный ход и предпочтителен электромагнитному приводу. Чтобы обеспечить работу такого привода при отсутствии напряжения в момент КЗ, используют включающую пружину. Микроэлектродвигатель через редуктор предвзвешивает ее заводит. После подачи команды на включение освобождается удерживающая защелка, и пружина включает автоматический выключатель.

*Механизм передачи усилия от привода к контактам* содержит систему скачкообразного замыкания контактов при включении независимо от скорости перемещения рукоятки. Он содержит пружины и поворотную ось с изменением их положения в пространстве или систему «ломающихся» рычагов, обеспечивающую изменение положения осей рычагов в пространстве. Этот механизм обеспечивает передачу усилий на контакты и удержание их во включенном положении. Его работа тесно связана с механизмом свободного расцепления, который обеспечивает независимость расхождения контактов от скорости перемещения рукоятки при ручном отключении. Даже в случае удержания рукой рукоятки во включенном положении и срабатывания расцепителя (включение на КЗ) произойдет отключение автомата. Этот механизм состоит из рычагов и пружин с изменяющимся в пространстве расположением осей соединения, приводящим к их неустойчивому состоянию и отключению контактов под действием пружины. Механизм свободного расцепления приводится в действие от расцепителей.

*Расцепители* автоматических выключателей контролируют заданный параметр защищаемой цепи и, воздействуя на механизм расцепления, отключают выключатель при отклонении параметра от установленного значения. Расцепители автоматов обычно выполняются на базе электромеханических, тепловых и полупроводниковых реле, приспособленных к его конструкции.

*Вспомогательные слаботочные контакты* автоматических выключателей служат для переключения в цепях управления, блокировки и сигнализации. Положение контактов (размыкающее или замыкающее) меняется в зависимости от положения главных контактов автомата («Включено» или «Отключено»). Встречаются вспомогательные контакты, опережающие при включении главные контакты. Обычно вспомогательные контакты выполняются в виде отдельного блока, связанного с подвижной системой выключателя.

На рисунке 3.14 изображен поперечный разрез автоматического выключателя типа ВА51-25. Рассмотрим его с точки зрения названных выше элементов. Контактную систему образует неподвижный контакт 1 с подвижным контактом, закрепленным на поворотной ламели 2. Дугогасительную камеру образуют пластины и щеки дугогасительной решетки 12.

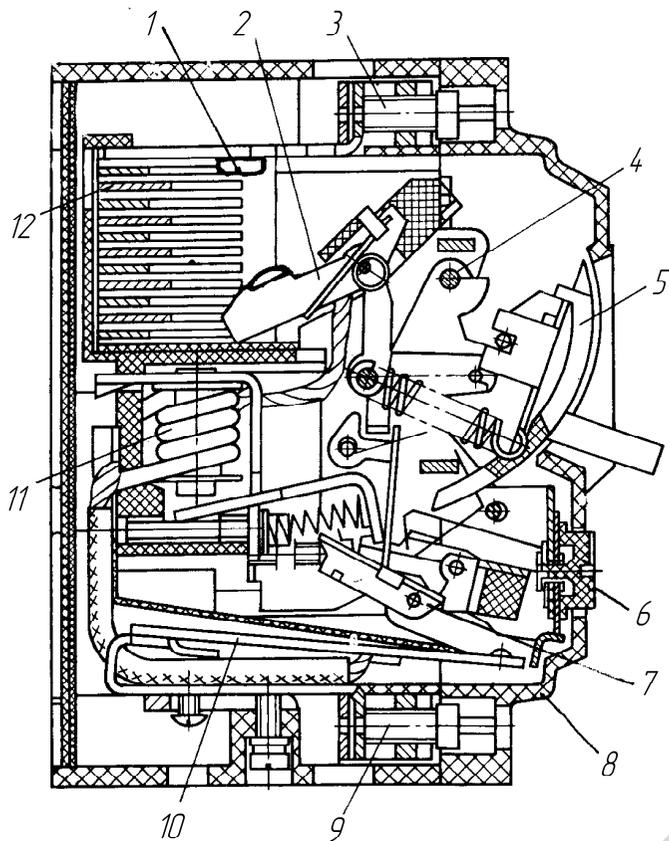


Рисунок 3.14 – Разрез по оси полюса автоматического выключателя ВА51-25 с комбинированным расцепителем:

1 – неподвижный контакт; 2 – ламель с подвижным контактом; 3, 9 – присоединительные зажимы; 4 – механизм свободного расцепления; 5 – рукоятка; 6 – механизм подстройки тока уставки теплового расцепителя; 7 – поворотная рейка; 8 – крышка корпуса; 10 – тепловой расцепитель; 11 – электромагнитный расцепитель; 12 – дугогасительная решетка

Привод автоматического выключателя ручной (рукоятка 5). Механизм передачи усилия от рукоятки 5 к подвижным контактам включает пружину и «ломающиеся» рычаги, связанные с ламелью 2. Механизм свободного расцепления 4 связан с поворотной рейкой 7, на которую воздействуют расцепители.

В автоматическом выключателе ВА51-25 имеются 2 расцепителя: тепловой 10 и электромагнитный 11 максимального тока.

Вспомогательных свободных контактов автоматической выключатель по рисунку 3.14 не содержит. Они обычно располагаются в отдельном корпусе, который крепится сбоку к корпусу автоматического выключателя.

### 3.6. Расцепители автоматических выключателей

Расцепители автоматических выключателей определяют их характеристики и функциональные возможности.

В автоматических выключателях встречаются следующие расцепители: 1) электромагнитный максимального тока; 2) электромагнитный максимального тока с гидравлическим замедлением срабатывания; 3) электронный; 4) тепловой; 5) комбинированный (максимального тока и тепловой); 6) минимального напряжения; 7) независимый; 8) электромагнитный максимального тока в нулевом проводе; 9) электромагнитный максимального тока для цепей управления.

Первые 5 типов расцепителей автоматических выключателей основные, остальные – дополнительные расцепители.

#### *Электромагнитный расцепитель максимального тока*

Предназначен для защиты проводников и электрооборудования от токов КЗ.

Конструкция его может быть различной, но всегда он представляет собой реле максимального тока, приспособленное к размерам автоматического выключателя. Расцепитель имеет катушку, состоящую из витков эмалированного провода. Сечение провода рассчитано на продолжительное протекание номинального тока уставки и на допустимый нагрев в режиме отключения токов КЗ. Расцепитель включается последовательно с нагрузкой.

Для одной конструкции и типоразмера расцепителя срабатывание его (притяжение якоря к сердечнику) происходит при определенной магнитодвижущей силе  $H$  (МДС):

$$H = I_{\text{ср.эл.м}} W = \text{const}, \quad (3.9)$$

где  $I_{\text{ср.эл.м}}$  – ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А;  
 $W$  – число витков катушки расцепителя.

Из формулы (3.9) следует, что с увеличением тока число витков катушки уменьшается. При больших токах катушка может иметь один виток в виде медной шины, при малых токах – много витков.

Подбор числа витков катушки расцепителя и диаметра провода осуществляется на заводе-изготовителе в зависимости от номинального тока расцепителя и кратности тока срабатывания максимального расцепителя. Дополнительная регулировка осуществляется натяжением пружины, возвращающей якорь в отключенное положение после срабатывания расцепителя.

Некоторые конструкции электромагнитных расцепителей показаны на рисунке 3.15.

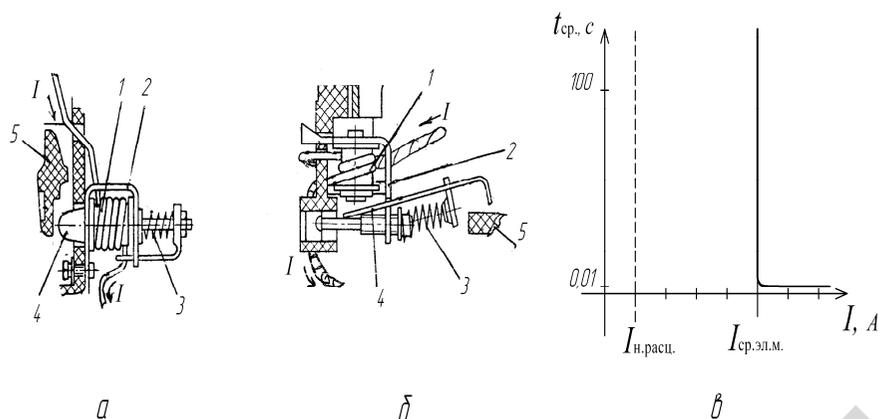


Рисунок 3.15 – Электромагнитные расцепители максимального тока автоматических выключателей AP50 (а), AE25 (б) и их защитные характеристики (в):  
1 – катушка; 2 – магнитопровод; 3 – пружина; 4 – якорь;  
5 – расцепляющее устройство

В автоматических выключателях AP50 применяется расцепитель соленоидного типа (рисунок 3.15, а). Якорь находится внутри катушки 1 соленоида. Катушка соленоида питается током нагрузки. Регулировочная пружина 3 позволяет настраивать расцепитель на заводе-изготовителе на требуемый ток. При движении якоря происходит воздействие на расцепляющее устройство 5.

На рисунке 3.15, б изображен расцепитель автоматического выключателя AE25. Электромагнитный расцепитель обеспечивает независимую характеристику срабатывания (токовую отсечку) (рисунок 3.15, в).

Ток срабатывания:

$$I_{\text{ср.эл.м}} = K_{\text{эм}} I_{\text{н.расц}}, \quad (3.10)$$

где  $K_{\text{эм}}$  – кратность тока срабатывания;  
 $I_{\text{н.расц}}$  – номинальный ток расцепителя, А.

Электромагнитные расцепители максимального тока должны иметь следующие характеристики, определяемые ГОСТ Р 50345-92: тип А –  $K_{\text{эм}}$  от 2 до 3; тип В –  $K_{\text{эм}}$  от 3 до 5; тип С –  $K_{\text{эм}}$  от 5 до 10; тип D –  $K_{\text{эм}}$  от 10 до 20. На рисунке 3.16 приведены характеристики электромагнитных расцепителей для переменного тока. Для постоянного тока значения  $K_{\text{эм}}$  умножаются на 1,41.

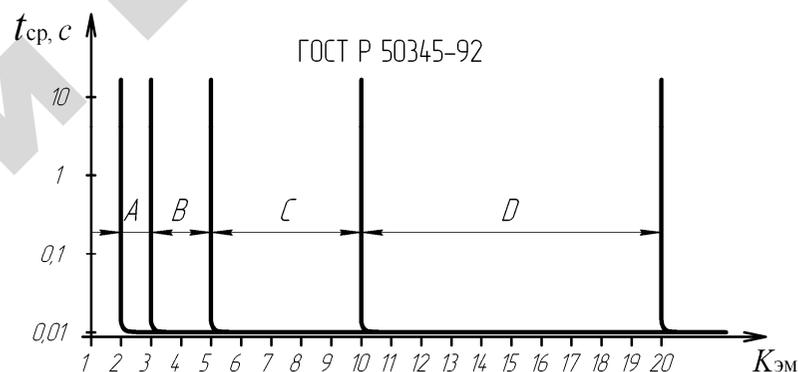


Рисунок 3.16 – Характеристики электромагнитных расцепителей максимального тока типов А, В, С, D при расчетной температуре 30 °С

Некоторые европейские модели автоматических выключателей имеют большее число типов расцепителей. Например, автоматические выключатели серии «Мульти-9» фирмы Merlin Gerin на токи от 1 до 100 А имеют следующие типы характеристик: В ( $K_{\text{эм}}$  от 3,2 до 4,8); С ( $K_{\text{эм}}$  от 7 до 10); D ( $K_{\text{эм}}$  от 10 до 14); К ( $K_{\text{эм}}$  от 14 до 20); Z ( $K_{\text{эм}}$  от 2,4 до 3,2); МА ( $K_{\text{эм}} = 12$ ).

В автоматических выключателях ВМ40 Курского электроаппаратного завода встречаются также типы расцепителей L ( $K_{\text{эм}}$  от 3,2 до 4,8) и G ( $K_{\text{эм}}$  от 6,4 до 9,6). В автоматических выключателях ВА61F29 Дивногорского завода низковольтной аппаратуры встречаются расцепители классов Z ( $K_{\text{эм}} = 4 \pm 20\%$ ), L ( $K_{\text{эм}} = 8 \pm 20\%$ ), K ( $K_{\text{эм}} = 12 \pm 20\%$ ).

### Электромагнитный расцепитель максимального тока с гидравлическим замедлением срабатывания

Для обеспечения зависимой от тока выдержки времени электромагнитный расцепитель выполняется с гидравлическим замедлителем срабатывания (рисунок 3.17, а).

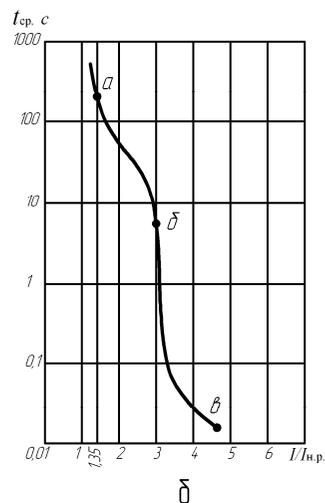
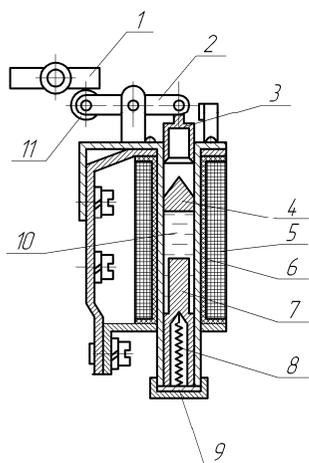


Рисунок 3.17 – Конструкция (а) и защитная характеристика (б)

электромагнитного расцепителя с гидравлическим замедлением срабатывания: 1 – отключающая рейка; 2 – рычаг; 3 – цилиндрический якорь; 4 – ферромагнитный ограничитель конусообразной формы; 5 – катушка; 6 – немагнитная цилиндрическая трубка; 7 – ферромагнитный плунжер; 8 – пружина; 9 – немагнитная крышка; 10 – кремнийорганическая жидкость; 11 – противовес; *аб* – участок защиты от перегрузки; *бв* – участок защиты от тока КЗ

Конструкция данного расцепителя следующая: электромагнит соленоидного типа имеет немагнитную цилиндрическую трубку 6, внутри которой находится ферромагнитный плунжер 7 и ферромагнитный ограничитель 4, представляющий собой конусообразный наконечник сердечника электромагнита. По катушке 5 протекает ток нагрузки. При токе большем, чем номинальный ток расцепителя, возвратная пружина 8 не может удержать плунжер 7 в нижнем положении и он смещается вверх постепенно, преодолевая силы сцепления вязкой кремнийорганической жидкости 10, находящейся в полости немагнитной цилиндрической трубки 6. Скорость перемещения плунжера зависит от тока катушки. Следова-

тельно, время перемещения плунжера к ограничителю 4 зависит от тока катушки. В верхнем положении плунжера цилиндрический якорь 3 с воронкообразными краями перемещается к ферромагнитному ограничителю 4. Через рычаг 2 и противовес 11 якорь воздействует на отключающую рейку 1 – автомат отключается. Возвратные пружины возвращают якорь и плунжер в начальное положение.

При токах КЗ цилиндрический якорь 3 перемещается к ферромагнитному ограничителю 4 с максимальной скоростью, не зависящей от положения плунжера. При этом приводится в действие отключающая рейка, и автомат отключается.

Времятоковая характеристика электромагнитного расцепителя с гидравлическим замедлением срабатывания изображена на рисунке 3.17, б.

Участок *аб* характеристики (рисунок 3.17, б) формируется за счет замедления перемещения плунжера (зависимая часть характеристики), а участок *бв* – за счет быстрого срабатывания якоря (независимая часть характеристики). В целом такая характеристика представляет собой плавную «падающую» линию и называется *ограниченно зависимой*. На участке *аб* расцепитель срабатывает от токов перегрузки, а на участке *бв* – от токов КЗ.

Времятоковая характеристика таких расцепителей существенно зависит от температуры окружающей среды. Поэтому на рисунке 3.27, б защитные характеристики автоматического выключателя АК-63МГ (с гидравлическим замедлением срабатывания) изображены в виде двух линий при температуре +15 °С и +35 °С с холодного состояния. В горячем состоянии время срабатывания уменьшается.

### Электронный расцепитель

Применяется для защиты электрических цепей от перегрузки и токов КЗ. Датчиками тока служат трансформаторы тока (для выключателей переменного тока), магнитные усилители (для выключателей постоянного тока) или элементы Холла в интегральном исполнении. Усилительные схемы и отдельные узлы сначала строились на транзисторах и тиристорах, теперь – на базе операционных усилителей, цифровых элементов и микропроцессоров. Выходной сигнал подается на независимый расцепитель автомата для его отключения.

Структурная схема электронного расцепителя на аналоговых элементах приведена на рисунке 3.18, а.

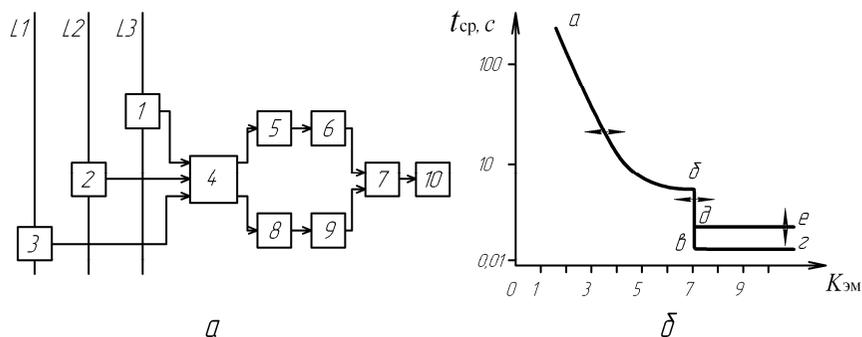


Рисунок 3.18 – Структурная схема электронного расцепителя (а) и его защитная характеристика (б):

1, 2, 3 – датчики тока; 4 – блок преобразования; 5, 8 – блоки контроля уровня сигнала; 6, 9 – блоки временной задержки; 7 – усилитель или компаратор; 10 – исполнительный орган

Датчики 1, 2 и 3 измеряют токи по трем фазам защищаемой установки. Блок 4 преобразовывает сигнал. Если сигнал от блока преобразования 4 соответствует току перегрузки, то включается блок контроля уровня сигнала 5, который запускает блок временной задержки 6. Чем больше величина сигнала на входе блока 5, тем меньше длится задержка времени блока 6. Получается зависимость от тока ветвь защитной характеристики (кривая *ab*) на рисунке 3.18, б.

При токе  $K_3$  сигнал с блока преобразования 4 достаточен для запуска блока контроля уровня сигнала 8, выполняющего функции отсечки и вырабатывающего сигнал на мгновенное срабатывание (линия *бв*) (рисунок 3.18, б). Этот сигнал поступает на блок 9, который создает постоянную небольшую задержку (линия *вг*) на срабатывание для отстройки от «исчезающего» КЗ или, по необходимости, регулируемую задержку (линия *де*) для селективной работы автомата с другими последовательно включенными в сеть автоматами. Усилитель или компаратор 7 включает исполнительный орган 10 (независимый расцепитель), отключающий автомат от сети.

Электронные расцепители имеют возможность регулировать номинальный ток расцепителя от  $0,5I_{ном}$  до  $1,2I_{ном}$  (перемещение линии *ab*, рисунок 3.18, б), ток отсечки от  $2I_{ном}$  до  $(9-11)I_{ном}$  (перемещение линии *бв*), а также время срабатывания автомата при КЗ (перемещение линии *де*).

Автоматические выключатели с электронным расцепителем дороже автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем. Они применяются при номинальных токах автоматов от 100 А и выше. На-

блюдается тенденция применения их при меньших токах. Механическая часть автоматов при использовании электронного расцепителя упрощается. Но главное их преимущество состоит в широких диапазонах регулирования токов и времени срабатывания, а также более тонкой и точной регулировке токов и времени срабатывания. Электронные расцепители удобны в эксплуатации, перспективны и могут обеспечивать дополнительные функции: индикацию токов нагрузки, связь по интерфейсу с компьютером верхнего уровня и т. д.

### Тепловой расцепитель

В автоматических выключателях тепловые расцепители предназначены для защиты электрической цепи от токов перегрузок. Они аналогичны по конструкции и принципу действия тепловым реле.

Наиболее часто тепловые расцепители используются совместно с электромагнитными расцепителями максимального тока, реже – отдельно. Номинальный ток тепловых расцепителей не превышает 200 А, при этом тепловые расцепители на большой ток имеют шунт.

Тепловые расцепители обеспечивают независимую от тока защитную характеристику (рисунок 3.19).

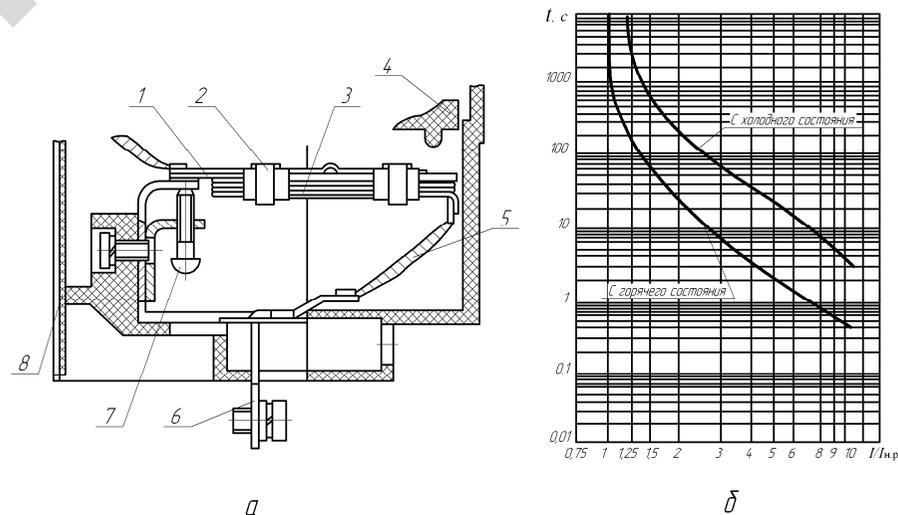


Рисунок 3.19 – Тепловой расцепитель автоматического выключателя АЕ25, не имеющий температурной компенсации (а), и его защитная характеристика при температуре 40 °С (б):

1 – биметаллическая пластинка; 2 – бандаж, крепящий нагреватели к биметаллической пластинке; 3 – нагреватели; 4 – отключающая рейка; 5 – гибкий токоподвод; 6 – присоединительная клемма; 7 – регулировочный винт; 8 – корпус

Обычно защитная характеристика теплового расцепителя задается в виде двух линий, соответствующих срабатыванию с холодного и горячего состояний. При отсутствии механизма температурной компенсации (у большинства выключателей) защитная характеристика тепловых расцепителей зависит от температуры окружающей среды.

### Комбинированный расцепитель

Комбинация теплового и электромагнитного расцепителей используется в большинстве автоматических выключателей. В этом случае расцепитель называется комбинированным.

На рисунке 3.20 приведена конструкция комбинированного расцепителя автоматического выключателя ВА51 на ток 200 А.

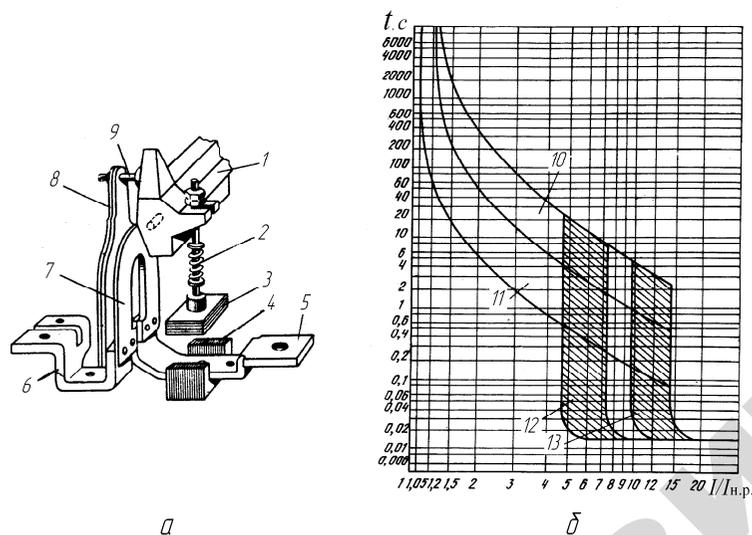


Рисунок 3.20 – Комбинированный (тепловой и электромагнитный) расцепитель автоматического выключателя ВА51 на ток 200 А (а)

и его времятоковые характеристики (б):

1 – отключающая рейка; 2 – возвратная пружина электромагнитного расцепителя; 3 – якорь; 4 – сердечник электромагнитного расцепителя; 5 – обмотка электромагнитного расцепителя; 6 – медная шина; 7 – шунт теплового расцепителя; 8 – биметаллическая пластина подковообразной формы; 9 – регулировочный винт теплового расцепителя; 10 – зона действия теплового расцепителя с холодного состояния; 11 – зона действия теплового расцепителя с горячего состояния; 12 – зона действия электромагнитного расцепителя на переменном токе; 13 – зона действия электромагнитного расцепителя на постоянном токе

Тепловой расцепитель образован биметаллической пластиной 8 подковообразной формы, которая у основания соединена с подковообразным шунтом 7. Таким образом, по биметаллической пластине проходит часть общего тока медной шины 6. Электромагнитный расцепитель образован сердечником 4, якорем 3 и возвратной пружиной 2. Обмотка 5 электромагнитного расцепителя состоит из одного витка (шины).

При токах перегрузки срабатывает тепловой расцепитель, а при токах КЗ – электромагнитный. Оба расцепителя воздействуют на отключающую рейку 1.

На рисунке 3.21 приведены времятоковые характеристики автоматических выключателей с комбинированным расцепителем, соответствующие международным стандартам.

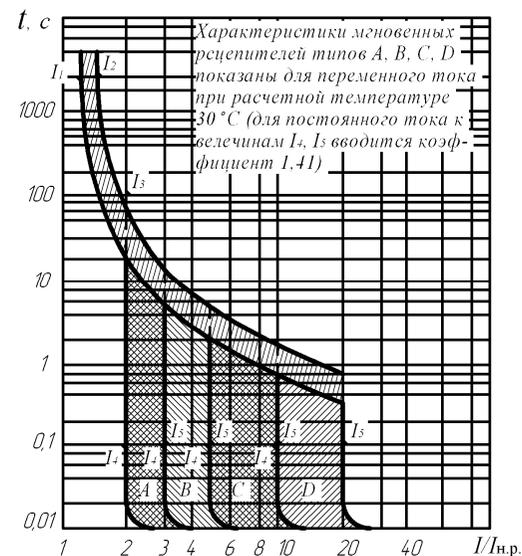


Рисунок 3.21 – Защитные характеристики тепловых расцепителей вместе с расцепителями максимального тока типов А, В, С, D автоматических выключателей серии 5S фирмы Siemens

В таблице 3.2 приведены режимы срабатывания расцепителей различных типов автоматических выключателей модульного исполнения серии 5S фирмы Siemens на токи до 125 А, соответствующие рисунку 3.21.

Таблица 3.2 – Режимы срабатывания расцепителей автоматических выключателей при температуре окружающей среды 30 °С

Тип мгновенных расцепителей	Тепловой расцепитель при токах испытания		Время срабатывания теплового расцепителя для токов вставок, ч		Электромагнитный расцепитель при токах испытания		
	малом $I_1$	большом $I_2$	меньше или равно 6,5 А	больше чем 6,5 А и меньше чем 125 А	удержания $I_4$	срабатывания, не более $I_5$	Время срабатывания, с
A	$1,13I_H$ –	– $1,45I_H$	$>1$ $<1$	$>2$ $<2$	$2I_H$ –	– $3I_H$	$\geq 0,1$ $< 0,1$
B	$1,13I_H$ –	– $1,45I_H$	$>1$ $<1$	$>2$ $<2$	$3I_H$ –	– $5I_H$	$\geq 0,1$ $< 0,1$
C	$1,13I_H$ –	– $1,45I_H$	$>1$ $<1$	$>2$ $<2$	$5I_H$ –	– $10I_H$	$\geq 0,1$ $< 0,1$
D	$1,13I_H$ –	– $1,45I_H$	$>1$ $<1$	$>2$ $<2$	$10I_H$ –	– $20I_H$	$\geq 0,1$ $< 0,1$

**Примечания:**

1. При других температурах окружающей среды токи испытания  $I_1$  и  $I_2$  изменяются примерно на 5 % на каждые 10 °С разности температур. При температурах меньше 30 °С токи возрастают, а при температурах больше 30 °С – уменьшаются.
2. Нормы срабатывания выключателей российских производителей должны соответствовать ГОСТ Р50345-92, ГОСТ Р50030-1-94 (IEC 947-2-89).

Из таблицы 3.2 следует, что пороговые токи тепловых расцепителей автоматов составляют не менее  $1,13I_{ном.уст.}$ . При меньших перегрузках тепловые расцепители автоматов не срабатывают. Этот показатель (пороговый ток срабатывания) у тепловых реле составляет величину  $1,05I_{ном.уст.}$ , поэтому тепловые реле более чувствительны к перегрузкам и рекомендуются для защиты электродвигателей от перегрузки, а тепловые расцепители автоматов – для защиты от перегрузки проводников электрической цепи (кабелей или проводов).

**Расцепитель минимального напряжения**

Расцепитель минимального напряжения служит для отключения автоматического выключателя при снижении питающего напряжения ниже определенного значения.

Расцепитель (рисунок 3.22) представляет собой электромагнитное реле напряжения, подключаемое к линейному напряжению контролируемой сети. Магнитная система расцепителя выполнена так, что МДС катушки при номинальном напряжении и при снижении напряжения до уставки достаточна для удержания якоря во включенном положении.

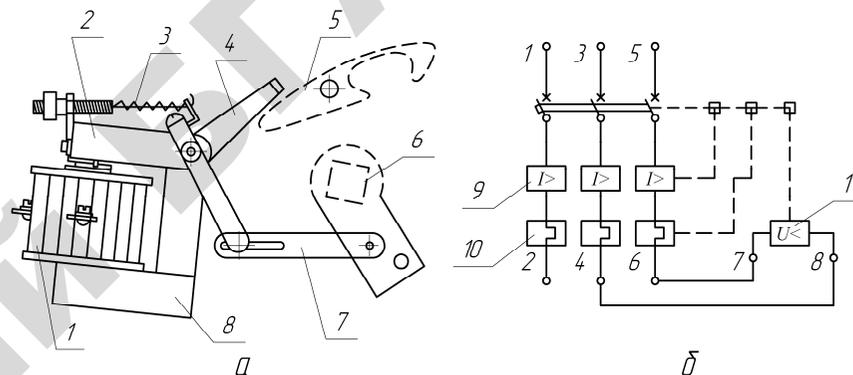


Рисунок 3.22 – Расцепитель минимального (нулевого) напряжения с предварительным замыканием якоря (а) и схема его включения (б):  
 1 – катушка; 2 – якорь; 3 – пружина; 4 – рычаг; 5 – отключающая планка;  
 6 – вал выключателя; 7 – планка с прорезью; 8 – сердечник электромагнита;  
 9 – электромагнитный расцепитель; 10 – тепловой расцепитель;  
 11 – расцепитель минимального напряжения

Якорь 2 прижимается к сердечнику 8 при повороте вала выключателя 6 (при включении) с помощью планки с прорезью 7 и пружины 3.

При напряжении ниже уставки расцепителя якорь 2 (рисунок 3.22, а) отпадает, и рычаг через отключающую планку 5 отключает автомат.

В данной конструкции можно включить автоматический выключатель при низком напряжении электрической сети. После этого расцепитель отключит автоматический выключатель. Получается, что включают и тут же отключают потребителя электрической энергии.

В современных конструкциях автоматических выключателей этот недостаток устранен. При повороте вала автоматического выключателя сначала включается опережающий блок-контакт 8 (рисунок 3.23, б), а потом главные контакты автоматического выключателя. Опережающий блок-контакт 8 подключает расцепи-

тель минимального напряжения в сеть раньше главных контактов. Если есть напряжение в сети и оно достаточно для притяжения якоря, то якорь 2 притянется. Если напряжения не достаточно для притяжения якоря 2 расцепителя, то он препятствует включению автоматического выключателя.

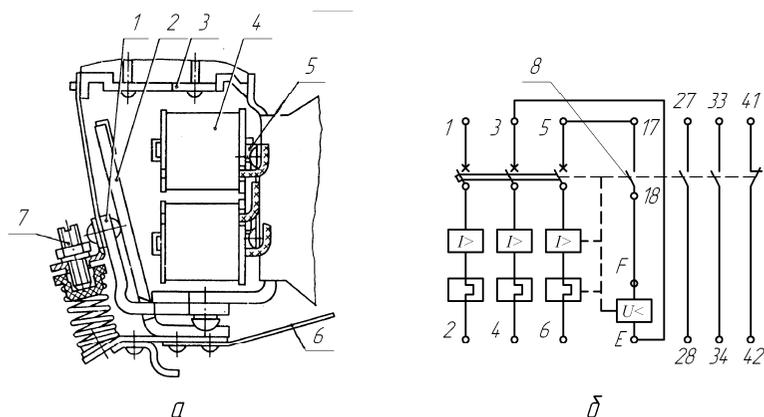


Рисунок 3.23 – Расцепитель минимального (нулевого) напряжения автоматического выключателя BA51 (а) и его схема включения с опережающими контактами (б): 1 – держатель; 2 – якорь; 3 – стойка; 4 – катушка; 5 – магнитопровод; 6 – рычаг; 7 – регулировочная пружина; 8 – опережающий блок-контакт

Обычно расцепитель минимального напряжения отключает выключатель при напряжении 70–35 % от номинального значения, не отключает при напряжении выше 70 % от номинального и не препятствует включению при напряжении 85 % от номинального значения и выше.

В автоматических выключателях фирмы Legrand [29] и других фирм встречаются расцепители минимального напряжения с задержкой 800 мс. Они предотвращают несвоевременное отключение выключателей при кратковременных колебаниях напряжения в сети.

### Независимый расцепитель

Независимый расцепитель автоматического выключателя предназначен для его дистанционного отключения. Он представляет собой небольшой электромагнит, якорь которого через шток 4 воздействует на расцепляющее устройство (на рисунке 3.24, а не показано) и отключает автомат.

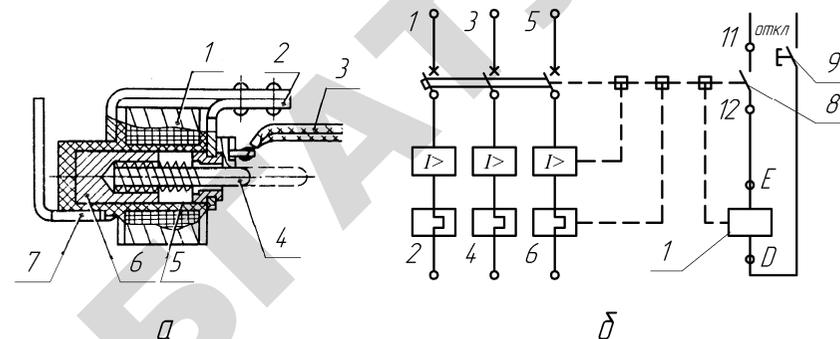


Рисунок 3.24 – Независимый расцепитель автоматического выключателя BA51 (а) и схема его включения (б): 1 – катушка; 2 – уголок; 3 – провода; 4 – шток; 5 – пружина; 6 – якорь; 7 – скоба; 8 – дополнительный блок-контакт автомата; 9 – кнопка дистанционного включения расцепителя

Независимый расцепитель включается в сеть через дополнительный блок-контакт 8 автомата. Как только автомат срабатывает, дополнительный блок-контакт 8 отключает цепь питания расцепителя, тем самым предотвращая протекание токов в катушке расцепителя после отключения выключателя. Катушка 1 электромагнита рассчитана на кратковременное включение. Номинальное напряжение расцепителя различное, от 24 до 380 В постоянного или переменного тока.

Независимый расцепитель встречается в большинстве автоматов. Он бывает встроенным внутрь автомата или пристраивается к его корпусу в виде отдельного блока.

### Электромагнитный расцепитель максимального тока в нулевом проводе

Электромагнитный расцепитель максимального тока в нулевом проводе предназначен для контроля тока в нулевом (защитном) проводе. Этот провод присоединяется к корпусу электрооборудования (например, электродвигателя). При однофазном КЗ на корпус по нулевому (защитному) проводнику потечет ток, и расцепитель тока в нулевом проводе сработает, автоматический выключатель отключится. Расцепитель настраивается на заводе-изготовителе на ток срабатывания примерно  $0,8I_{ном}$ . Этот ток меньше тока основных электромагнитных расцепителей максимального тока. Поскольку токи КЗ

в длинных линиях могут быть малые и соизмеримы с пусковыми токами двигателей, то этот расцепитель позволяет отключать однофазные малые токи КЗ. Пусковые токи на этот расцепитель не действуют, поскольку они протекают в фазных проводниках.

Конструктивно расцепитель максимального тока в нулевом проводе представляет собой устройство, аналогичное электромагнитным расцепителям максимального тока в фазах автомата. Например, в автоматическом выключателе АП502МЗТО используются два электромагнитных расцепителя максимального тока (2М), три тепловых расцепителя (3Т) и один расцепитель максимального тока в нулевом проводе (0), причем последний занимает место третьего расцепителя максимального тока.

#### **Электромагнитный расцепитель максимального тока для цепей управления**

Электромагнитный расцепитель максимального тока для цепей управления предназначен для защиты цепей управления в комплекте с защитой силовых цепей другими расцепителями автоматического выключателя. При КЗ в цепях управления он отключит автоматический выключатель, потеряет питание силовая часть установки и цепи управления. Такой расцепитель используется в автоматическом выключателе АП50БЗМЗТС. В нем имеются три расцепителя максимального тока, три тепловых расцепителя на токи до 60 А и один расцепитель для цепей управления или сигнализации с номинальным током 2,5 А.

### **3.7. Развитие и совершенствование автоматических выключателей<sup>1</sup>**

К первому поколению автоматических выключателей условно можно отнести следующие типы: АБ25; АЕ1000; АП50; АК63 и АК50; А63; А3100.

Автоматический установочный однополюсный выключатель АЕ1000 широко использовался в осветительных сетях. Номинальное напряжение – 380 В, ток 25 А. Имел комбинированный расцепитель (электромагнитный и тепловой), систему «ломающихся» рычагов для скачкообразной коммутации контактов, дугогасительную камеру, закрытые присоединительные зажимы.

<sup>1</sup> На примере российских производителей автоматических выключателей.

Автоматические выключатели АП50 применяются в электроустановках до сих пор в виде усовершенствованной модели АП50Б [8]. Отключаются от других автоматов простой конструкцией (рисунок 3.25), поэтому они дешевле других автоматов.

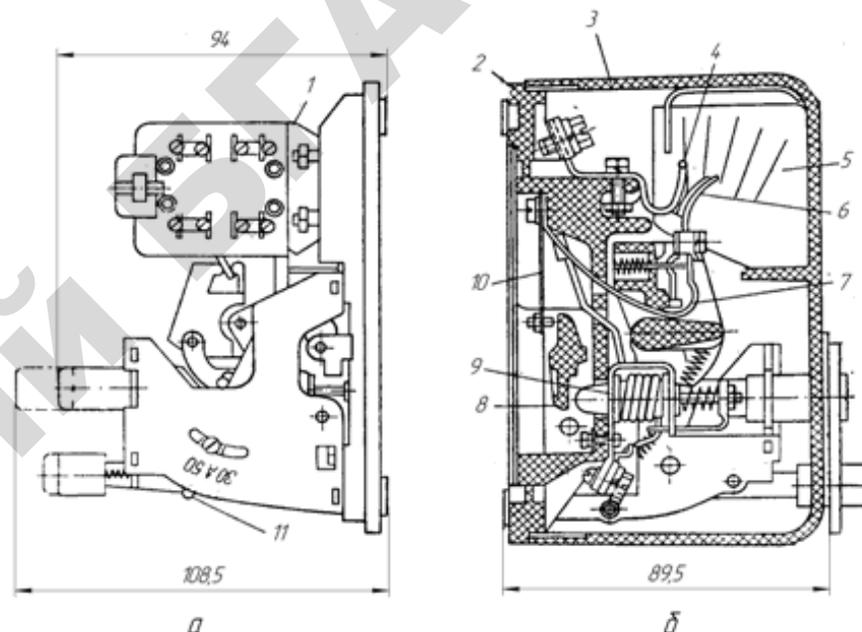


Рисунок 3.25 – Вид сбоку на автоматический выключатель АП50 со снятой крышкой во включенном положении (а) и его разрез в собранном виде по оси полюса (б):

- 1 – блок с дополнительными контактами; 2 – цоколь корпуса; 3 – крышка съемная;
- 4 – неподвижный контакт; 5 – дугогасительная решетка; 6 – подвижный контакт;
- 7 – гибкий проводник; 8 – отключающая рейка; 9 – электромагнитный расцепитель соленоидного типа; 10 – тепловой (биметаллический) расцепитель;
- 11 – рычаг настройки теплового расцепителя

Автоматические выключатели данной серии предназначены для сетей постоянного тока до 220 В и переменного тока до 500 В, с небольшой частотой включений (от 6 до 30 в сутки), в том числе пуска и защиты цепей электродвигателя. Номинальный ток автомата – 63 А, а номинальные токи теплового или электромагнитного расцепителя – от 1,6 до 63 В. Автоматы могут иметь тепловой, электромагнитный или комбинированный расцепители, причем электромагнитные расцепители могут иметь кратность тока срабатывания  $3,5I_{н.расц}$  или  $10I_{н.расц}$ . Автоматические выключатели

АП50 имеют дополнительные элементы: независимый расцепитель; расцепитель минимального напряжения; максимальный расцепитель в нулевом проводе или для цепей управления; свободные два или один переключающие контакты (или без них).

Времятоковые характеристики выключателей АП50Б изображены на рисунке 3.26.

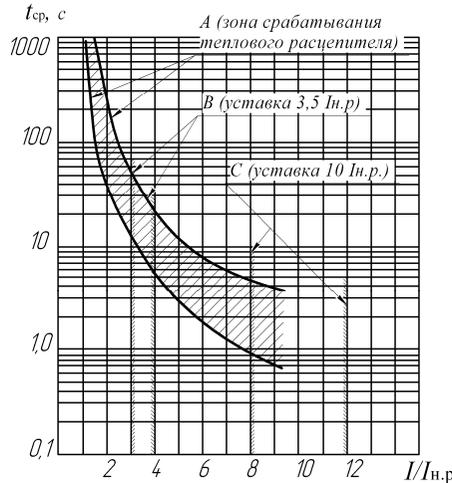


Рисунок 3.26 – Времятоковые характеристики автоматических выключателей АП50Б с тепловыми и электромагнитными расцепителями на токи 6,3; 10; 16; 25; 40; 50 А:

А – зона срабатывания тепловых расцепителей;

В – зона срабатывания электромагнитных расцепителей с уставкой  $3,5I_n$ ;

С – зона срабатывания электромагнитных расцепителей с уставкой  $10I_n$ .

Времятоковые характеристики автоматических выключателей АП50Б показывают, что тепловой расцепитель имеет пограничный ток не менее  $1,5I_{н.расц}$ , а это неприемлемо для защиты электродвигателя от перегрузки.

Простейший автоматический выключатель АБ25 имел только тепловой расцепитель в виде биметаллического элемента. Подвижный контакт крепился на одном V-образном рычаге, поэтому включение автомата происходило за два движения рукоятки: вначале рукоятка поворачивалась до упора назад (механизм взводился), а потом – вперед, в сторону включения (механизм включался). Применялся автоматический выключатель АБ25 в бытовых

установках; имел токи расцепителей 15, 20, 25 А и указатель срабатывания.

Автоматические выключатели серии АК63 и АК50 отличаются от других выключателей наличием двух пар контактов и дугогасительных камер на один полюс. Благодаря этому они имеют большую отключающую способность и надежность. Автоматы не содержат тепловой расцепитель. Зависимая от тока характеристика срабатывания формируется электромагнитным расцепителем с гидравлическим замедлением срабатывания (рисунок 3.27, б). Выпускались выключатели АК63 на ток до 63 А и автоматы АК50 на ток до 50 А. Их усовершенствованная модель АК50Б имеет номинальный ток 50 А и рассчитана на напряжение переменного тока до 380 В и постоянного тока до 320 В [8].

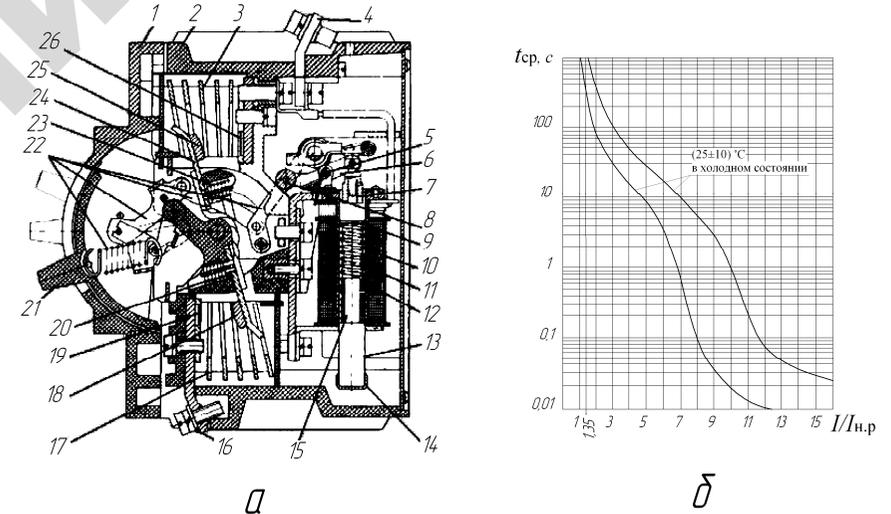


Рисунок 3.27 – Автоматический выключатель АК63-МГ с гидравлическим замедлением срабатывания (а) и его времятоковые характеристики (б):

1 – крышка; 2 – основание; 3, 17 – дугогасительная решетка; 4, 16 – зажимы для присоединения проводников; 5 – пружина; 6 – рычаг; 7 – якорь; 8 – противовес; 9 – ферромагнитная перегородка; 10 – пружина; 11 – полость, заполненная кремнийорганической жидкостью; 12 – катушка; 13 – немагнитный цилиндрический стакан; 14 – немагнитная крышка; 15 – стальной плунжер; 18, 25 – подвижный контакт; 19, 26 – неподвижный контакт; 20, 23 – пружина; 21 – рукоятка привода; 22 – механизм передачи усилия от привода к контактам

Расцепители автоматических выключателей АК63 и АК50 имеют кратность тока  $6I_{н.расц}$  и  $12I_{н.расц}$ , а шкала номинальных уставок – от 1 до 50 А при двух- или трехполюсном исполнении. Недостаток выключателей – открытые присоединительные зажимы. Они могут быть закрыты дополнительным специальным кожухом, единым для всего аппарата. При этом обеспечивается степень защиты ОМ, категория размещения 2 или 3.

*Однополюсные автоматические выключатели А63* выпускаются с электромагнитным расцепителем максимального тока на номинальный ток 40 А и с электромагнитным расцепителем с гидравлическим замедлением срабатывания на номинальный ток 25 А. Широко используются в цепях управления на переменном токе до 380 В и на постоянном токе до 110 В. Отличаются малыми кратностями тока отсечки электромагнитного расцепителя:  $K_{эм} = 1,3$ ;  $K_{эм} = 2$ .

Имеются так же кратности отсечек  $5I_{н.уст}$  и  $10I_{н.уст}$ . Выключатели с гидравлическим замедлителем срабатывания имеют кратность отсечки только  $10I_{н.уст}$ . Номинальные токи расцепителем от 0,6 до 40 А [8].

*Автоматические выключатели А3100* перекрывали диапазон больших токов (от 50 до 600 А), имели 1, 2 или 3 полюса, только тепловые, только электромагнитные или комбинированные расцепители. Номинальный ток расцепителей от 15 до 600 А. Применялись в распределительных устройствах переменного или постоянного тока. В автоматических выключателях А3100 могли быть установлены дополнительно контакты и независимый расцепитель.

**Ко второму поколению установочных автоматических выключателей** условно относятся следующие типы: АЕ2000; АЕ25; А3700; усовершенствованные автоматические выключатели АП50Б и АК50Б, описанные выше; резьбовые выключатели типа ПАР.

*Автоматические выключатели АЕ2000* были разработаны для защиты электрических цепей переменного тока от токов КЗ и перегрузки, в том числе асинхронных электродвигателей. Номинальные токи автоматов – от 16 до 160 А, токи расцепителей – от 0,3 до 160 А в сети 380 В. Автоматы АЕ2000 были призваны заменить автоматы первого поколения на ток до 160 А; отличались высокой износостойкостью (до 100 000 циклов «Вкл. - Откл.»).

Автоматы АЕ2000 выпускаются одно- и трехполюсные, со свободными контактами и без них, с дополнительным расцепителем минимального напряжения или независимым. Основные расцепители – электромагнитный максимального тока или комби-

нированный, с регулировкой тока теплового расцепителя  $(0,9-1,15)I_{н.расц}$  или без него, с температурой компенсации токового расцепителя или без нее. Кратность тока электромагнитного расцепителя:  $12I_{н.расц}$  для автоматов до 63 А;  $10I_{н.расц}$  для автоматов на 80 и 100 А;  $5I_{н.расц}$  для автоматов на 63, 80 и 100 А [8]. Позже эти автоматы были модернизированы и в габарите автоматического выключателя на 63 А выпускаются автоматы на 80 и 100 А (с буквой «М» в обозначении), а также автоматы без расцепителей (с буквой «Р» в обозначении). Для закрытия выводных зажимов автоматов используются две пластмассовые крышки [8].

*Автоматические выключатели АЕ25* одно- и двухполюсные. Могли использоваться в цепях переменного тока на напряжение до 380 В и постоянного тока однополюсные до 110 В и двухполюсные до 220 В при токах до 25 А (расцепители комбинированные от 0,6 до 25 А). Отличались высокой износостойкостью – до 100 000 циклов «Вкл. - Откл.». Дополнительных расцепителей они не имели, но свободные контакты (закрывающий или размыкающий) устанавливались. Расцепители – тепловой нерегулируемый без температурной компенсации и электромагнитный с отсечкой  $1,3I_{н.расц}$ ;  $5I_{н.расц}$ ;  $10I_{н.расц}$ . Недостаток конструкции – незакрытые присоединительные зажимы. Для электробезопасного обслуживания устанавливались дополнительные защитные крышки.

*Автоматические выключатели А3700* заменили серию А3100. Они отличаются повышенной отключающей способностью, кроме дугогасительной решетки дополнительно имеют искрогасители. Используются на подстанциях, в электрических сетях, в распределительных пунктах. Для защиты преобразователей используются токоограничивающие автоматы серии А3700Б.

Номинальные токи автоматов А3700 от 40 до 630 А в одном габарите, двух- и трехполюсные при постоянном напряжении до 440 В и переменном до 660 В при 50 и 60 Гц и до 380 В при частоте 400 Гц. Недостаток выключателей – большие габариты.

Автоматические выключатели А3700 имеют 20 исполнений, в том числе следующие: выдвижное исполнение (на большие токи) для быстрой замены автомата в распределительных устройствах; с буквой «Б» в обозначении – токоограничивающие; с буквой «С» – селективные на токи 160–830 А с электронным расцепителем; с буквой «Ф» – нетокоограничивающие с тепловым и электромагнитным расцепителями на ток тепловых расцепителей

от 16 до 250 А; с буквой «Н» – неавтоматическое исполнение (без расцепителей).

Автоматические выключатели А3700 могут исполняться с дополнительными узлами: вспомогательными контактами; независимым и нулевым расцепителями напряжения; электромагнитным приводом для дистанционного оперативного включения на расстоянии.

Электронный расцепитель автоматического выключателя А3700 имеет следующие уставки срабатывания:  $2I_{н.расц}$ ;  $3I_{н.расц}$ ;  $5I_{н.расц}$ ;  $7I_{н.расц}$ ;  $10I_{н.расц}$ ; по току перегрузки –  $1,25I_{н.расц}$ ; по времени срабатывания в зоне токов КЗ: 0,1 с; 0,25 с; 0,4 с; по времени срабатывания в зоне перегрузок  $(5-6)I_{н.расц}$ : от 4 до 16 с. Ток уставки срабатывания электромагнитного расцепителя указывается для каждой величины автомата (кратность не более 10, а теплового –  $1,15I_{н.расц}$ ). Ток уставки не регулируется. Подробные сведения об автоматах А3700 изложены в [33].

Особую группу автоматических выключателей образуют *резьбовые автоматические выключатели типа ПАР*, которые устанавливаются взамен предохранителей Е27. Такие автоматические выключатели используются в бытовых установках и имеют кнопку включения и отключения. Внутри корпуса расположены биметаллический тепловой и электромагнитный расцепители. Выпускаются на токи 6,3; 10 и 16 А. Кратность срабатывания электромагнитного расцепителя –  $(7-10)I_{н.расц}$ .

**К третьему поколению автоматических выключателей** условно относятся автоматические выключатели серии ВА. Они разработаны на токи от 0,3 до 4000 А для замены всех других серий автоматических выключателей. Серия ВА отличается от других серий меньшими габаритами и массой, большой коммутационной и отключающей способностью, многообразием модификаций и функциональных возможностей.

Распространены автоматические выключатели ВА5 следующих серий: ВА51 – нетокоограничивающие с электромагнитными и тепловыми расцепителями или только с электромагнитными расцепителями на токи расцепителя от 0,3 до 630 А; ВА52 – токоограничивающие, с расцепителями и токами, аналогичными серии ВА51; ВА53 – токоограничивающие неселективные с электронными или электромагнитными расцепителями на номинальный ток от 160 до 1600 А; ВА54 – токоограничивающие высокой коммутационной способности на ток от 160 до 1000 А; ВА55 – селективные с элект-

ронным расцепителем на ток от 160 до 1600 А; ВА56 – без максимальных расцепителей на ток от 400 до 1600 А; ВА57 – селективные с электронным расцепителем на ток от 2500 до 4000 А.

Во внутренних сетях сельскохозяйственных предприятий находят применение выключатели ВА51 с номинальным током до 250 А. Номинальные токи (определяющие его габарит) зашифрованы в обозначении автоматического выключателя (после разделительного дефиса): ВА51-25 – на ток 25 А; ВА51-29 – на 63 А; ВА51-30 – на 100 А; ВА51-32 – на 125 А; ВА51-33 – на 160 А; ВА51-35 – на 250 А. В обозначении выключателей с номинальным током 100 А и ниже вместо разделительного дефиса может быть буква «Г». Это означает, что выключатель специально изготовлен для защиты электродвигателей. Кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя такого автомата составляет  $10I_{н.расц}$ . Автоматические выключатели без буквы «Г» с номинальным током до 63 А имеют электромагнитные расцепители максимального тока с кратностью 7 или  $10I_{н.расц}$ , а с номинальным током 100 А – с кратностью 3; 7 и  $10I_{н.расц}$ . Электромагнитные расцепители срабатывают за время не более 0,04 с. Износостойкость автоматических выключателей ВА51 высокая, до 50 000 циклов «Вкл. - Откл.».

Тепловые расцепители автоматов ВА51 имеют регулировку тока срабатывания от  $0,8I_{н.расц}$  до  $1,0I_{н.расц}$ . Кратность токов срабатывания и несрабатывания автоматических выключателей ВА51-26 и ВА51Г26 приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Кратность токов срабатывания и несрабатывания тепловых расцепителей автоматов ВА51

Температура окружающего воздуха, °С	Кратности токов для автоматических выключателей			
	ВА51-26		ВА51Г-26	
	несрабатывание	срабатывание	несрабатывание	срабатывание
+55	0,93	1,2	0,93	1,06
+45	1,03	1,3	1,03	1,16
+40	1,05	1,35	1,05	1,2
-10	1,26	1,9	1,26	1,68
-60	1,47	2,4	1,47	2,16

Из таблицы 3.3 следует:

1) защитная характеристика тепловых реле расцепителей автоматов ВА51 зависит от температуры: чем больше температура, тем

при меньшей кратности тока сработает автомат. Такая зависимость благоприятна для защиты электрооборудования;

2) выключатели для защиты электродвигателей (с буквой «Г» в обозначении) имеют лучшие характеристики, потому что ток несрабатывания отличается от тока срабатывания на меньшую величину.

На рисунке 3.28 приведены времятоковые характеристики выключателей при разных температурах окружающей среды.

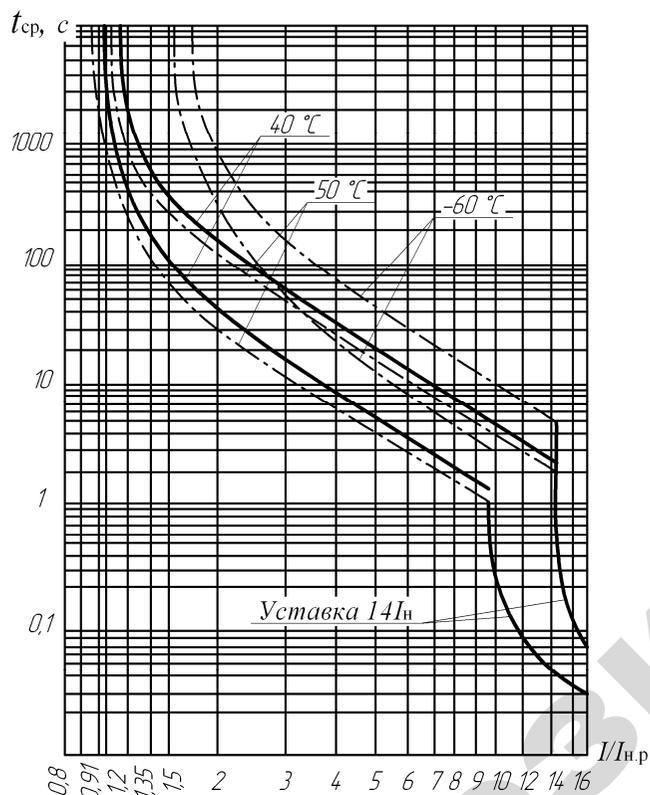


Рисунок 3.28 – Времятоковые характеристики выключателя ВА51Г26 при разных температурах окружающей среды

Из рисунка 3.28 следует, что время срабатывания тепловых расцепителей существенно зависит от окружающей температуры. Зависимость от температуры характерна для всех автоматических

выключателей без температурной компенсации теплового расцепителя.

Конструкция автоматического выключателя ВА51-25 рассмотрена на рисунке 3.14. Свободные контакты располагаются в отдельной оболочке, пристраиваемой сбоку к корпусу выключателя.

Автоматические выключатели ВА52 токоограничивающие (кроме ВА52-37 и ВА52-39). Они состоят из базового нетокоограничивающего выключателя серии ВА51 и специального блока токоограничения. Последний состоит из контактной системы, дугогасительной камеры и механизма фиксации контактов в отключенном положении.

Собственное время отключения автоматического выключателя ВА52 при токах КЗ, близких к предельным, менее 10 мс, полное время отключения не более 15 мс. Токоограничение здесь достигается за счет электродинамического отброса контактов.

Автоматические выключатели серии ВА13 отличаются тем, что предназначены для работы в сетях напряжением до 1140 В переменного тока частотой 50 или 60 Гц и до 440 В постоянного тока [8].

Автоматические выключатели серии ВА13 имеют электромагнитные расцепители максимального тока или электромагнитные расцепители с гидравлическим замедлением срабатывания. Выпускаются двух- и трехполюсные, на токи расцепителей от 0,6 до 63 А в двух габаритах: на 25 А – ВА13-25 (расцепители только электромагнитные на 3,15 А; 5 А; 16 А и 25 А при кратности тока срабатывания  $7I_{н.расц}$  и при напряжении до 1140 В); на 63 А – ВА13-29 на токи расцепителей от 0,6 до 63 А для постоянного тока (кратность тока отсечки  $6I_{н.расц}$ ) и переменного тока на 660 В при отсечке  $3I_{н.расц}$  и  $12I_{н.расц}$ . Особенности конструкции автомата следующие:

- 1) контактная система и дугогасительное устройство обеспечивают двойной разрыв электрической цепи в каждом полюсе;
- 2) выводы катушки независимого расцепителя выведены наружу;
- 3) присоединенные клеммы закрытые.

Автоматический выключатель серии ВА21 отличается высокой отключающей способностью. Она связана с двойным разрывом электрической цепи (подобно автоматическим выключателям АК63, АК50 и ВА13). Выключатели изготавливаются трех типов: ВА21-29 – со средней отключающей способностью (от 4 до 10 кА); ВА21-29В – с повышенной отключающей способностью (от 6 до 20 кА); ВА21-29Т – для городского электротранспорта (однополюсные в трехполюсном габарите). В автоматических выключателях ВА21-29Т за счет трехкратного

разрыва цепи постоянного тока обеспечивается отключающая способность 6 кА в сети 660 В постоянного тока.

Автоматические выключатели ВА21 выпускаются с электромагнитным расцепителем максимального тока или с электромагнитным расцепителем и гидравлически замедлением срабатывания. Шкала расцепителей стандартная от 0,6 до 63 А (для метрополитена – сокращенная: 0,8; 1,6; 2,5; 4,0; 5,0; 10; 16; 25; 40; 63 А). Автоматические выключатели ВА21 имеют свободные контакты и открытые присоединительные зажимы (недостаток их конструкции). Зажимы при необходимости закрываются крышками. Независимый расцепитель отсутствует, но может быть установлена блокировка от несанкционированного включения (путем навески висячего замка).

Автоматические выключатели ВА88 переключают диапазон больших токов (от 125 до 1600 А в шести габаритах). Число полюсов 3, 3+N, 4. Кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя  $10I_{н.расц.}$ . На номинальный ток 1600 А автоматический выключатель имеет регулируемый электронный расцепитель на базе микропроцессора. Изготавливаются для стационарной, втычной и выдвижной установки. Имеют независимый расцепитель, расцепитель минимального напряжения, дополнительные и аварийные контакты. Управление автоматического выключателя ВА88 может осуществляться с помощью ручного поворотного привода или дистанционно, с помощью электромагнитного привода. В таком приводе имеется электродвигатель, который через редуктор непосредственно воздействует на внешнюю рукоятку выключателя при поступлении команды включения или отключения от кнопок «Вкл.» и «Откл.». Привод устанавливается на переднюю панель выключателя. В более мощных выключателях на 250 А и более привод взводит пружинную систему в момент отключения выключателя, а затем запасенная энергия используется для последующего включения. Для отключения выключателя ВА88 используется независимый расцепитель [30].

**К четвертому поколению автоматических выключателей** условно относятся серии ВА14, ВА16, ВА22, ВА47, ВМ40, ВА61F29, ВА77. Их отличительные черты:

- 1) крепление на монтажной рейке (DIN-рейке);
- 2) модульность, т. е. двух-, трех- и четырехполюсные выключатели состоят из соответствующего числа одиночных однополюсных выключателей (модулей). Стандартная ширина модуля 18 мм.

Автоматические выключатели серии ВА14 предназначены для электрических цепей общего и бытового назначения переменного

тока до 380 В и постоянного тока до 110 В. Номинальный ток автоматов 32 А (ВА14-26), ток комбинированных расцепителей: 16; 20; 25; 32 А. Число полюсов: 1; 2; 3. Кратность тока срабатывания расцепителей составляет  $(4-6)I_{н.расц.}$  или  $(8-10)I_{н.расц.}$ . При токе расцепителей 32 А тепловой и электромагнитный расцепители включаются параллельно (обычно в выключателях они включаются последовательно). Предельно отключаемый ток КЗ – (1,5–6) кА. Вид с частичным разрезом однополюсного выключателя ВА14 показан на рисунке 3.29. Конструкция имеет следующие недостатки: открытые присоединительные зажимы; отсутствие свободных контактов и дополнительных расцепителей.

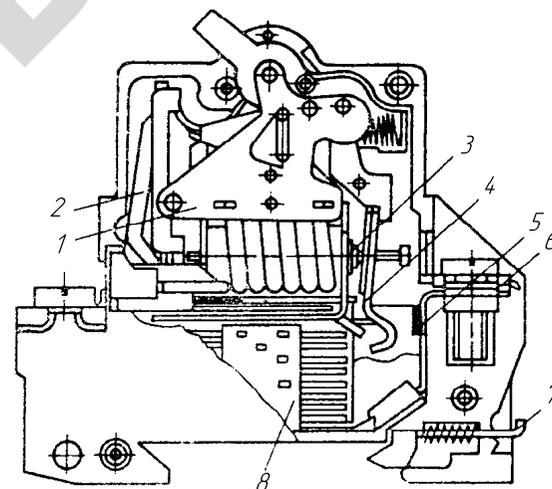


Рисунок 3.29 – Однополюсный автоматический выключатель ВА14:  
1 – механизм свободного расцепления; 2 – тепловой расцепитель;  
3 – электромагнитный расцепитель; 4 – подвижный контакт;  
5 – неподвижный контакт; 6 – выводной зажим;  
7 – рычаг открепления выключателя; 8 – дугогасительная решетка

Автоматические выключатели серии ВА16 предназначены для электрических осветительных цепей напряжением до 380 В переменного тока; выпускаются однополюсные с электромагнитным или комбинированным расцепителем. Номинальный ток автомата составляет 31,5 А (ВА16-26), расцепителей – от 6,3 до 31,5 А. Тепловой расцепитель срабатывает при токе  $(1,1-1,2)I_{н.расц.}$ , а кратности токов срабатывания электромагнитных расцепителей  $\sim 14I_{н.расц.}$ . Предельный отключаемый ток (0,9–3,1) кА (большее зна-

чение соответствует максимальному току расцепителя). Автоматические выключатели ВА16 имеют закрытые присоединительные зажимы.

*Автоматические выключатели серии ВА22-27* однополюсные. Имеют комбинированные расцепители на ток 10–40 А. Уставка тока срабатывания электромагнитного расцепителя  $(20-50)I_{н.расц.}$ , а теплового –  $1,45I_{н.расц.}$ . По этим показателям выключатели имеют некачественные характеристики. Предельная отключающая способность низкая – 1,15 кА.

Отличительная особенность конструкции модуля выключателя серии ВА22-27 – кнопочное включение и отключение (2 кнопки).

*Автоматические выключатели серии ВА47* выпускаются на напряжение ~230/400 В одно-, двух-, трех- и четырехполюсные в двух габаритах: ВА47-29 и ВА47-100 [31]. Имеют тепловые расцепители и электромагнитные типов *B, C, D* (ВА47-29) или только *C* и *D* (ВА47-100). Номинальные токи расцепителей от 1 до 63 А (ВА47-29) и от 16 до 100 А (ВА47-100). Модули автоматов ВА47-29 имеют стандартную ширину 18 мм, а в автоматах ВА47-100 – 27 мм. Наибольшая отключающая способность – 4,5 кА для ВА47-29 и 10–20 кА – для выключателей ВА47-100. Автоматические выключатели серии ВА47 имеют корпус из термостойкой ABS-пластмассы, указатель «Вкл. - Откл.», закрытые присоединительные зажимы с насечкой для фиксации внешних проводников, биметаллические пластины теплового расцепителя, дугогасительную камеру со стальными пластинами, посадочное место на DIN-рейку. Защитные характеристики выключателей приведены на рисунке 3.30.

*Автоматические выключатели серии ВМ40* предназначены для применения в цепях с напряжением до 400 В переменного тока [7]. Выпускаются на число полюсов: 1; 2; 3; 4. Имеют комбинированные расцепители на токи от 2 до 63 А. Используются электромагнитные расцепители типа *L*  $(4 \pm 20\%)I_{н.уст.}$  или типа *G*  $(8 \pm 20\%)I_{н.уст.}$ ; типа *B* ( $K_{эм}$  от 3 до 5) или типа *C* ( $K_{эм}$  от 5 до 10). Предельная отключающая способность выключателей – 6 кА на ток расцепителей до 32 А и 4 кА на ток расцепителей 40, 50 и 63 А, а номинальная рабочая отключающая способность составляет 75 % от предельной. Выключатели работоспособны при температурах от –60 до +40 °С.

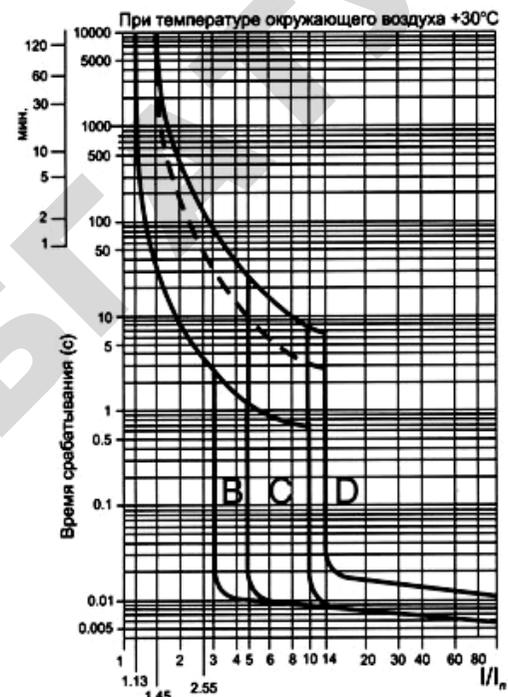


Рисунок 3.30 – Временноточные характеристики модульных автоматических выключателей ВА47

Особенность внутреннего устройства – в 2- и 4-полюсных выключателях могут устанавливаться расцепители в N-полюсе.

*Автоматические выключатели ВА61F29* [32] модульного типа с креплением на монтажной рейке предназначены для промышленного и бытового применения. Они имеют тепловой и электромагнитный расцепители. Последний изготавливается для промышленного применения с расцепителями типов *Z*  $(4 \pm 20\%)I_{н.расц.}$ ; *L*  $(8 \pm 20\%)I_{н.расц.}$ ; *K*  $(12 \pm 20\%)I_{н.расц.}$  и для бытового назначения с расцепителями типов *B*  $(3-5)I_{н.расц.}$ ; *C*  $(5-10)I_{н.расц.}$ ; *D*  $(10-20)I_{н.расц.}$  (рисунок 3.31).

Наибольшая рабочая и предельная отключающая способность выключателей на токи 0,5–8,0 А составляет 1,5 кА, а для выключателей на токи 10–63 А – 3 кА. Коммутационная износостойкость – 4000 циклов «Вкл. - Откл.». Могут комплектоваться отдельными

модулями: независимым расцепителем; устройством защитного отключения УЗО-ДМ; переходными шинами и рейками; оболочкой IP30 и IP54. Выпускаются на 1–4 полюса, причем один полюс может быть для нейтрального провода без расцепителей. В сетях постоянного тока могут включаться на напряжение 110 В.

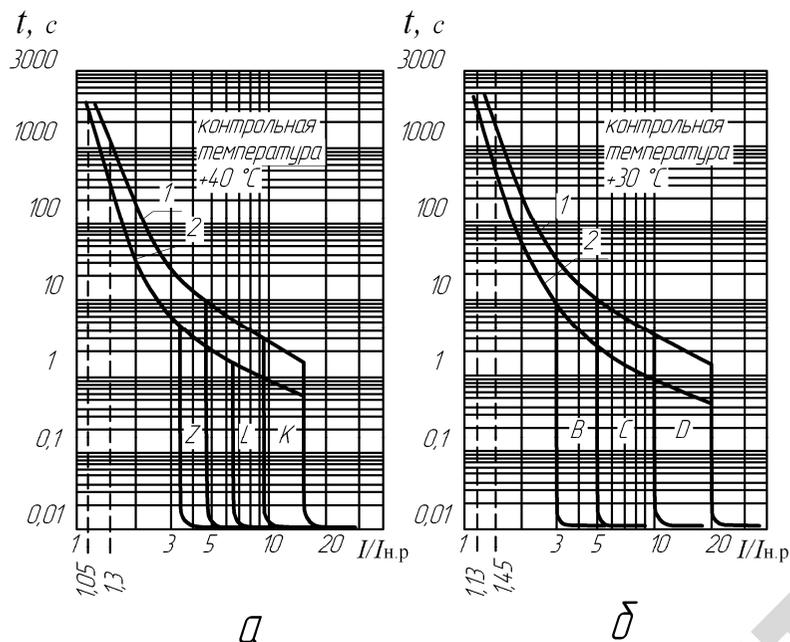


Рисунок 3.31 – Времятоковые характеристики модульного автоматического выключателя BA61F29 с расцепителями типов Z, L, K промышленного назначения (а) и B, C, D бытового назначения (б): 1 – с холодного состояния; 2 – с горячего состояния

Автоматические выключатели BA77-29 на токи от 1 до 63 А и BA77-31 на токи от 16 до 100 А имеют модульное исполнение и крепятся на DIN-рейку. Имеют тепловой и электромагнитный расцепители типов B и C для BA77-29 и типов C и D для BA77-31. Автоматический выключатель BA77-31 имеет растянутую по оси тока характеристику типа D с током срабатывания до  $50I_{н.уст}$  из холодного состояния, что неблагоприятно сказывается на его надежности. Автоматические выключатели имеют число полюсов от 1 до 4. Номинальная отключающая способность – 4,5 кА. Электрическая

износостойкость – не менее 4 000 циклов «Вкл. - Откл.», диапазон рабочих температур от  $-45$  до  $+55$  °С, климатическое исполнение УХЛЗ. Максимальная потеря мощности на один полюс: до 40 А – не более 3 Вт, на токи 50 и 63 А – не более 7 Вт, на токи 80–100 А – не более 10 Вт.

В автоматических выключателях четвертого поколения нашел воплощение прогрессивный принцип модульности электрических аппаратов, а также удобный способ монтажа выключателя на монтажной рейке.

Дальнейшее совершенствование автоматических выключателей происходит в двух следующих основных направлениях:

- 1) повышении надежности и срока службы;
- 2) расширении функциональных возможностей.

Первое направление связано с увеличением предельно отключаемых при КЗ токов и износостойкости выключателей. Чем больше предельно отключаемый при КЗ ток, тем надежнее автоматический выключатель. У многих рассмотренных выше автоматических выключателей предельный отключаемый при КЗ ток не превышает 1–1,5 кА при номинальных токах выключателей до 63 А. У ведущих европейских производителей автоматических выключателей (Siemens, Moeller, Legrand, Merlin Gerin) этот показатель составляет 3–4,5 кА в однофазной сети и 6–10 кА в трехфазной сети 380 В.

Для срока службы автоматических выключателей очень важен показатель износостойкости. Он определяет допустимое число циклов «Вкл. - Откл.» при номинальной нагрузке за срок службы. Различают механическую и электрическую износостойкость, при этом механическая износостойкость обычно больше электрической. Чем выше износостойкость выключателя, тем лучше. В приведенных выше модульных выключателях BM40 электрическая износостойкость малая, составляет 1 500 циклов «Вкл. - Откл.». Механическая износостойкость также недостаточна – 8 500 циклов «Вкл. - Откл.». У модульных автоматических выключателей BA47-29 электрическая износостойкость больше – 6 000 циклов «Вкл. - Откл.», а механическая износостойкость соответствует лучшим зарубежным автоматическим выключателям (20 000 циклов «Вкл. - Откл.»). В автоматических выключателях старшего поколения AE2000 и AE25 механическая износостойкость составляла

100 000 циклов «Вкл. - Откл.», а у ВА51-26 – 50 000 циклов «Вкл. - Откл.». Иногда она определяется в режиме отключения токов КЗ (по номинальной рабочей отключающей способности). В этом случае износостойкость автоматических выключателей составляет 200–500 циклов «Вкл. - Откл.».

Функциональные возможности автоматических выключателей увеличиваются при установке дополнительного расцепителя минимального напряжения, независимого расцепителя или расцепителя в нулевом проводе. Особенно эффективно вместо комбинированного расцепителя иметь электронный расцепитель. Его преимущества описаны выше. При этом появляется возможность измерения и индикации тока и других параметров нагрузки, а также передачи данных о токе, мощности и других параметрах по линии связи к устройствам верхнего уровня.

Расширение функциональных возможностей достигается при установке свободных и опережающих контактов, при сигнализации положения контактов выключателя и сигнализации факта его срабатывания, при сигнализации наличия напряжения на вводных зажимах выключателя, при наличии счетчика числа включений, при наличии блокировки навесным замком.

Расширение функциональных возможностей достигается так же совмещением в одном аппарате автоматического выключателя и устройства защитного отключения, реагирующего на дифференциальный ток утечки, или совмещением в одном аппарате автоматического выключателя и предохранителей.

Снабжение автоматического выключателя моторным приводом обеспечивает его дистанционное включение. В приводах с редкими пусками в режиме *S1* такой выключатель может принять на себя дополнительную функцию контактора и обеспечивать дистанционное включение и отключение нагрузки.

### **3.8. Параметры и характеристики автоматических выключателей**

Автоматический выключатель характеризуется следующими основными параметрами: 1) номинальным рабочим напряжением; 2) номинальным током; 3) номинальным током расцепителя;

4) кратностью тока срабатывания электромагнитного расцепителя максимального тока или типом характеристики электромагнитного расцепителя максимального тока; 5) номинальной или предельной отключающей способностью; 6) износостойкостью.

К дополнительным параметрам, уточняющим его конструкцию или способы монтажа, относятся: 1) число полюсов; 2) степень защиты; 3) способ крепления; 4) рекомендуемое сечение присоединительных проводников; 5) рабочее положение в пространстве; 6) температура окружающей среды и другие.

*Номинальное рабочее напряжение* – напряжение, на которое рассчитана изоляция выключателя в процессе работы и при отключении КЗ. Как правило, это рабочее напряжение больше или равно напряжению сети, в которой должен работать автоматический выключатель.

*Номинальный ток автоматического выключателя* – наибольший ток теплового или электромагнитного расцепителя, который устанавливается в данном корпусе выключателя и на который рассчитаны присоединительные клеммы и другие токопроводящие части выключателя. Этот ток не приводит к перегреву частей выключателя выше допустимой температуры при продолжительном режиме работы.

*Номинальный ток расцепителя автоматического выключателя* – наибольший ток катушки электромагнитного расцепителя или наибольший ток нагревателя теплового расцепителя, при котором они могут работать продолжительно, не перегреваясь выше допустимой или расчетной температуры. В одном и том же корпусе автоматического выключателя могут быть установлены расцепители на разные токи. Наибольший номинальный ток расцепителя соответствует номинальному току автоматического выключателя. Например, автоматический выключатель ВА47-29 имеет следующие номинальные токи комбинированных расцепителей: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 А. Номинальный ток автоматического выключателя ВА47-29 равен 63 А.

При номинальном токе тепловой и электромагнитный расцепители не срабатывают. Их ток срабатывания превышает номинальный. Отношение тока срабатывания к номинальному току расцепителя называется *кратностью тока срабатывания*. Она указывается в паспорте выключателя. Вместо тока может указываться тип характеристики электромагнитного (или комбинированного) расцепителя (см. п. 3.6).

*Предельная отключающая способность* автоматического выключателя характеризуется наибольшим отключаемым током КЗ, больше которого целостность выключателя не гарантируется.

*Номинальная рабочая отключающая способность* характеризуется наибольшим током КЗ, который может быть отключен автоматическим выключателем многократно (расчетное число раз) без повреждений аппарата. Номинальная рабочая отключающая способность меньше предельной отключающей способности. Она зависит от напряжения сети, в которой работает автоматический выключатель. С увеличением напряжения номинальная рабочая и предельная отключающая способности уменьшаются.

Износостойкость автоматического выключателя рассмотрена в п. 3.4.

Для сравнения автоматических выключателей иногда используются следующие параметры: 1) электродинамическая стойкость; 2) термическая стойкость; 3) собственное время отключения; 4) полное время отключения.

*Электродинамическая стойкость* характеризуется амплитудой ударного тока КЗ, который способен пропускать выключатель без остаточных деформаций деталей или электродинамического отброса контактов, приводящего к их привариванию или выгоранию. Если значение электродинамической стойкости в каталоге не приводится, то это означает, что стойкость выключателя определяется его предельной отключающей способностью. Для некоторых автоматических выключателей указывают максимальный ток, который он может пропускать без повреждения в течение 1 с.

*Термическая стойкость* характеризуется допустимым значением интеграла Джоуля  $\int_0^t i^2 dt$ , определяющим количество тепла, которое может быть выделено в выключателе за время отключения тока КЗ. Эта величина измеряется в  $A^2 \cdot c$ . Если термическая стойкость в каталоге отсутствует, то это означает, что выключатель является термически стойким при всех временах отключения, определяемых его защитной характеристикой. Термическая стойкость используется при выборе автоматического выключателя для защиты полупроводниковых силовых преобразователей от токов КЗ. Термическая стойкость автоматического выключателя должна быть меньше термической стойкости силового полупроводникового прибора при ожидаемом токе КЗ.

*Полное время отключения* автоматических выключателей включает время срабатывания расцепителей, время действия механизма выключателя, время расхождения силовых контактов и время гашения дуги. Полное время отключения автоматических выключателей используется для проверки селективности защиты. В режиме КЗ оно составляет обычно 0,01–0,02 с и зависит от тока КЗ.

*Собственное время отключения* автоматического выключателя включает время срабатывания расцепителя и механизма выключателя (до начала расхождения силовых контактов). Это время используется при выборе выключателей по предельной коммутационной способности. Оно составляет обычно 0,005–0,01 с и зависит от величины тока КЗ.

Подобно плавким предохранителям, автоматические воздушные выключатели имеют три основные характеристики:

- 1) времятоковую  $t_{cp} = f(I)$ ;
- 2) характеристику токоограничения  $I_{prop} = f(I_{ож})$ ;
- 3) характеристику термической стойкости (пропускаемой энергии)  $\int i^2 dt = f(I_{ож})$ .

На рисунках 3.26–3.28, 3.30, 3.31 приведены времятоковые характеристики российских автоматических выключателей АП50Б, АК63-МГ, ВА51Г26, ВА47 и ВА61F29. Верхние кривые на этих рисунках соответствуют срабатыванию с холодного состояния расцепителей, а нижние – с горячего состояния расцепителей. Из указанных рисунков видно, что тепловой расцепитель в лучшем случае реагирует на ток  $1,05I_{н.расц}$  с горячего состояния и на ток  $1,3I_{н.расц}$  с холодного состояния, в худших – на токи  $1,13I_{н.расц}$  и  $1,45I_{н.расц}$ .

Чем на меньший ток реагирует тепловой расцепитель, тем лучшую характеристику защиты имеет автоматический выключатель.

В качестве примера на рисунке 3.32 показаны характеристики токоограничения для автоматических выключателей ВА88 при напряжении 400 В.

Из рисунка 3.32 следует, что при токах до 20 кА автоматические выключатели ВА88 с номинальным током расцепителя 125 А не имеют токоограничения, потому что пропускаемый ток ( $I_{пр}$ ) равен ожидаемому ( $I_{ож}$ ). На том же графике представлены кривые токоограничения автоматического выключателя Rekord компании GE Power Controls на токи 125 и 250 А типов DL и D [33]. Они проходят ниже соответствующих кривых автоматического выключателя ВА88, следовательно, автоматические выключатели Rekord имеют лучшее токоограничение (в 2 и более раза). Чем больший наклон к оси ожидаемых токов имеет характеристика токоограничения, тем лучше автоматический выключатель.

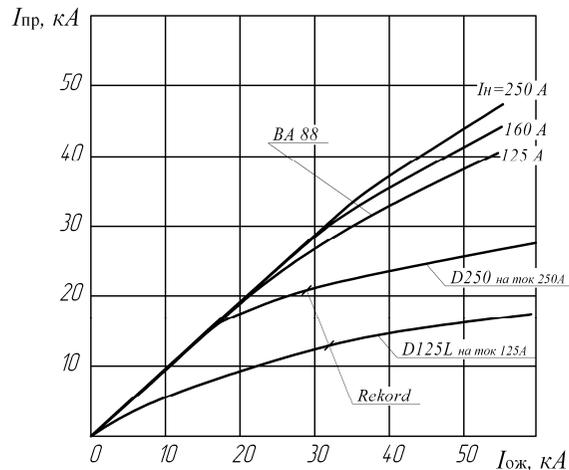


Рисунок 3.32 – Характеристики токоограничения автоматических выключателей BA 88 на ток 125–800 А и Rekord типов DL и D на токи 125 и 250 А

Кривые коэффициента пропускания энергии (интеграла Джоуля  $\int I^2 dt$ ) автоматического выключателя BA88-35 изображены на рисунке 3.33.

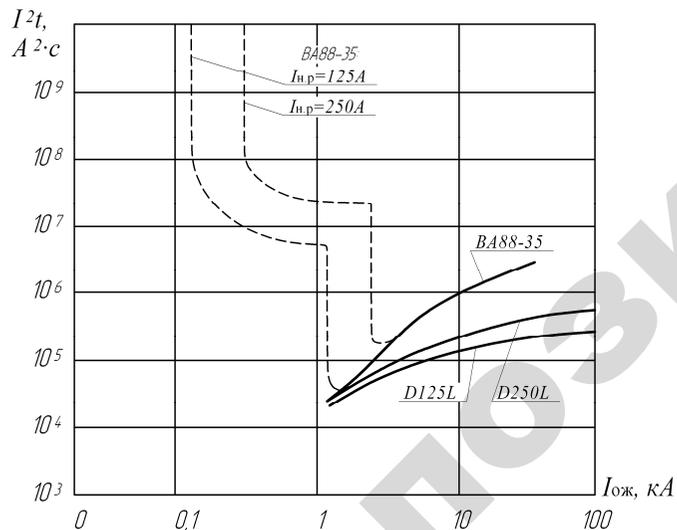


Рисунок 3.33 – Кривые коэффициента пропускания энергии (интеграла Джоуля) автоматических выключателей BA88-35 и Rekord типов D125L и D205L на токи 125 и 250 А

В интервале пусковых токов асинхронных электродвигателей (до 1,5 кА) каждому расцепителю на ток 125–250 А соответствует своя кривая пропускания энергии. В зоне токов КЗ (>1,5 кА) для выключателей BA88 одного габарита приводится одна кривая, поднимающаяся круто вверх [31]. Для широко известных автоматических выключателей Rekord компании GE Power Controls типов D125L и D250L [33] на те же токи кривая пропускания энергии Джоуля проходит ниже. Следовательно, автоматические выключатели типа Rekord D125L и D250L более чувствительны и пригодны для защиты электрооборудования от токов КЗ, чем автоматические выключатели типа BA88. Это обстоятельство особенно важно для защиты полупроводниковых приборов. Чем больший наклон к оси ожидаемых токов имеет характеристика интеграла Джоуля, тем лучше автоматический выключатель.

### 3.9. Выбор автоматических выключателей

Автоматические выключатели выбираются с учетом многих показателей, зашифрованных в их условных обозначениях.

Для любых серий автоматических выключателей основными показателями являются: 1) номинальное напряжение автоматического выключателя; 2) номинальный ток автоматического выключателя; 3) тип основных расцепителей; 4) номинальный ток расцепителей или напряжение их катушек; 5) число полюсов.

Дополнительными параметрами являются наличие дополнительных расцепителей, контактов, элементов сигнализации, число включений в час, условие монтажа, степень защиты автоматического выключателя и т. д.

Выбранный тип автоматического выключателя должен удовлетворять требованиям по основным и дополнительным показателям, а также проверке по условиям надежного отключения тока КЗ и условиям селективности с другими аппаратами защиты.

1. Номинальное напряжение автоматического выключателя должно быть не ниже напряжения сети:

$$U_{н.авт} \geq U_{сети} \quad (3.11)$$

2. Номинальный ток автоматического выключателя должен быть больше или равен номинальному  $I_{н.уст}$  или рабочему (расчетному)  $I_{раб.уст}$  току электроустановки

$$I_{н.авт} \geq I_{н.уст} \quad \text{или} \quad I_{н.авт} \geq I_{раб.уст}. \quad (3.12)$$

3. При выборе основных расцепителей руководствуются их функциональным назначением.

Автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями максимального тока имеют основное функциональное назначение – защиту от токов КЗ в электрической цепи. Следовательно, такой расцепитель выбирается при защите цепей от КЗ. Почти все автоматические выключатели имеют такой расцепитель, но чаще всего он входит в состав комбинированного расцепителя.

Автоматические выключатели с тепловыми расцепителями имеют основное функциональное назначение – защита электрических цепей от перегрузки.

Комбинированный расцепитель состоит из электромагнитного и теплового расцепителей и предназначен для защиты цепей от КЗ и перегрузок. По этой причине он наиболее часто используется в электрических установках. Стоимость его примерно одинаковая с автоматическим выключателем, имеющим только электромагнитный расцепитель, а функции защиты две (защита от токов КЗ и защита от токов перегрузки).

Кроме функционального назначения, некоторые серии автоматических выключателей имеют специальное назначение. Например, автоматические выключатели серии ВА16 предназначены для электрических осветительных сетей; серии ВА14 – для электрических сетей общего и бытового назначения; ВА21-29Т – для городского электротранспорта; ВА51Г, ВА61F29 – для защиты цепей асинхронных электродвигателей и т. д. Поэтому при выборе серии выключателя обязательно уточняют его назначение и отдают предпочтение выключателям, специально созданным для конкретного применения.

4. Номинальный ток расцепителя выбирается с учетом вида расцепителя. Если автоматический выключатель содержит только тепловой нерегулируемый расцепитель, то

$$I_{н.расц} \geq I_{раб.уст}, \quad (3.13)$$

где  $I_{раб.уст}$  – рабочий ток электроустановки в продолжительном режиме работы, А; если он не известен, то берут номинальный ток установки.

Знак «>» в формуле (3.13) означает, что выбирается ближайший ток расцепителя. При этом следует помнить, что завышение тока расцепителя ухудшает защитные свойства выключателя для данной установки. Наилучший случай, когда  $I_{н.расц} = I_{раб.уст}$ .

В модульных автоматических выключателях тепловой расцепитель не регулируется и входит в состав комбинированного расцепителя. Для модульных автоматических выключателей номинальный ток расцепителей задается при температуре тепловых расцепителей +30 °С для одного полюса. При выборе номинального тока теплового расцепителя в составе комбинированного расцепителя учитывается число полюсов (модулей, размещенных рядом) и ожидаемая температура в месте установки автоматических выключателей (не выше +50 °С).

Номинальный ток теплового расцепителя модульного автоматического выключателя выбирается по условию:

$$I_{н.расц,30\text{ °С}} \geq \frac{I_{раб}}{K_N K_t}, \quad (3.14)$$

где  $I_{н.расц,30\text{ °С}}$  – номинальный ток теплового расцепителя (указанный на маркировке) при температуре настройки +30 °С, А;

$I_{раб}$  – рабочий (расчетный эквивалентный или номинальный) ток цепи, А;

$K_N$  – коэффициент, зависящий от числа полюсов. Например, для ВА47-29 (рисунок 3.34, а)  $K_N = 1$  при 1 полюсе;  $K_N = 0,875$  при 2 полюсах;  $K_N = 0,83$  при 3 полюсах;  $K_N = 0,81$  при 4 полюсах;

$K_t$  – коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды. Например, для ВА47-29 (рисунок 3.34, б) при +50 °С  $K_t = 0,97$ ; при +40 °С  $K_t = 0,99$ ; при +10 °С  $K_t = 1,04$ ; при –10 °С  $K_t = 1,1$ .

По выражению (3.14) определяется ближайший больший ток теплового расцепителя из стандартного ряда номинальных токов выбранной серии автоматических выключателей или его типоразмер.

Если тепловой расцепитель регулируемый и входит в состав комбинированного расцепителя, то имеется возможность подрегулировать его уставку в пределах некоторого диапазона. Например,

для автоматического выключателя АЕ2000 регулировка тока теплового расцепителя осуществляется в диапазоне  $(0,9-1,15)I_{н.расц.}$ , а для автоматических выключателей ВА51 – в диапазоне  $(0,8-1)I_{н.расц.}$ . Следовательно, для автоматических выключателей АЕ2000 должно выполняться условие:

$$I_{н.расц} \geq I_{раб.уст} / (0,9-1,15), \quad (3.15)$$

а для ВА51 и других выключателей серии ВА5:

$$I_{н.расц} \geq I_{раб.уст} / (0,8-1). \quad (3.16)$$

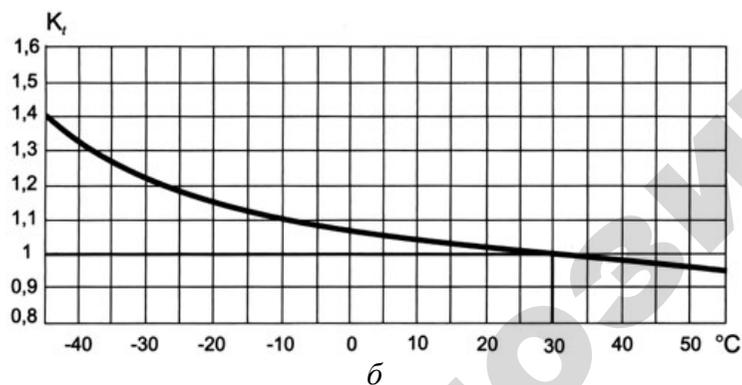
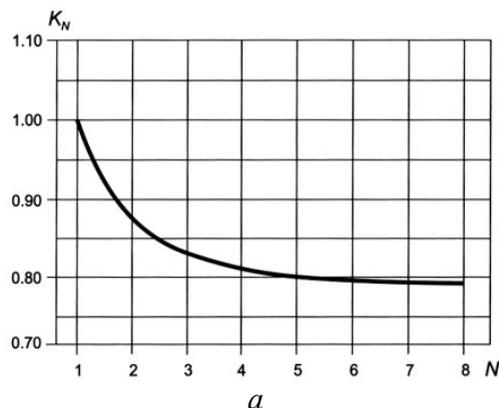


Рисунок 3.34 – Коэффициент нагрузочной способности, учитывающий число параллельно размещенных автоматических выключателей ВА47-29М ( $a$ ) и коэффициент нагрузочной способности, учитывающий температуру окружающей среды для ВА47-29М ( $b$ )

Обычно тепловые расцепители автоматических выключателей используются для защиты не электрооборудования установки, например, электрических двигателей, а для защиты кабеля от перегрузки. В этом случае пользуются условием (3.13).

Электромагнитные расцепители максимального тока нерегулируемые. Для них необходимо определить кратность тока срабатывания  $K_{эм}$  электромагнитного расцепителя или выбрать класс электромагнитного расцепителя в зависимости от величины ожидаемых пусковых токов в цепи. Рекомендуемая область применения различных классов электромагнитных расцепителей приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Рекомендации по выбору типа электромагнитного расцепителя максимального тока

Тип	Кратность тока срабатывания $K_{эм}$	Рекомендации по использованию
<i>A</i>	от 2 до 3	Применяются в электроустановках с большой протяженностью электропроводок, а также для защиты полупроводниковых устройств
<i>B</i>	от 3 до 5	Применяются для защиты электроприемников в жилых зданиях
<i>C</i>	от 5 до 10	Применяются для защиты электроприемников с небольшими пусковыми токами, например, с лампами ДРЛ, ДнАТ и т. д.
<i>D</i>	от 10 до 20	Применяются для защиты электроприемников с большими пусковыми токами, например, асинхронных электродвигателей с КЗ ротором, трансформаторов

Требуемую кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя максимального тока определяют путем расчета с учетом максимальных или пусковых токов в сети. Например, для одиночного асинхронного электродвигателя с КЗ ротором кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя должна составлять:

$$K_{эм.расц} \geq K_n K_i, \quad (3.17)$$

где  $K_i$  – кратность пускового тока электродвигателя (по данным каталога);  $K_n$  – коэффициент надежности отстройки от пускового тока. Вблизи трансформаторной подстанции  $K_n \geq 1,5-1,8$ , потому что учитывается наличие апериодической составляющей в пусковом токе и повышенный уровень напряжения в сети. Во внутренних

сетях зданий и сооружений аperiodическая составляющая пускового тока отсутствует, в сети наблюдается снижение напряжения при пуске и уменьшение пускового тока, поэтому  $K_H \geq 1,25$ .

Поскольку тип характеристики современных расцепителей максимального тока задается в виде области с минимальным и максимальным значениями кратности тока срабатывания (см. рисунок 3.21), то необходимо, чтобы выбранный по уравнению (3.17) коэффициент был меньше минимального значения  $K_{эм.мин}$  у выбранного типа расцепителя (рисунок 3.35), т. е.

$$K_{эм.мин} \geq K_{эм.расч.} \quad (3.18)$$

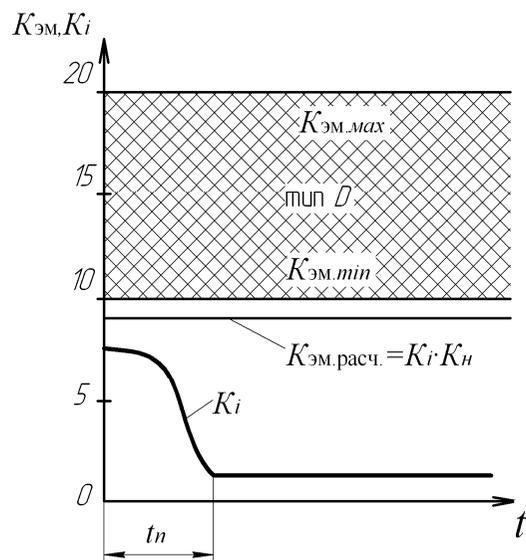


Рисунок 3.35 – Соотношение кратности пускового тока  $K_i$ , расчетного значения кратности тока электромагнитного расцепителя  $K_{эм.расч}$  и области кратностей тока электромагнитного расцепителя типа  $D$

Для асинхронного электродвигателя с КЗ ротором по условию (3.18) подходят электромагнитные расцепители типа  $K$  или  $D$ .

Для асинхронного электродвигателя с фазным ротором, всегда включаемого в сеть при добавочных сопротивлениях в цепи ротора, пусковой ток не превышает значения  $(2,5-3)I_n$ , поэтому подходит электромагнитный расцепитель типа  $C$ .

Для электрической цепи с лампами ДРЛ или подобным электрооборудованием, имеющим небольшую кратность пусковых или максимальных бросков тока ( $K_i$  до 2,5) так же подходит электромагнитный расцепитель типа  $C$ .

При выборе типа электромагнитного расцепителя руководствуются таблицей 3.4.

5. Число полюсов автоматического выключателя выбирается с учетом следующих соображений: для однофазной сети переменного тока выбирается однополюсный выключатель, если проводники  $N$  и  $PE$  объединены, и 1+N-полюсный выключатель, если нулевой провод  $N$  отделен от  $PE$ -проводника (рисунок 3.36).

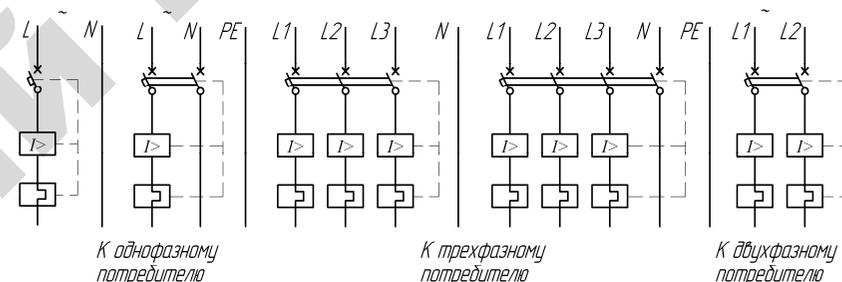


Рисунок 3.36 – Принципиальные электрические схемы включения автоматических выключателей с комбинированным расцепителем в сеть переменного тока

Для двухфазной сети переменного тока или сети постоянного тока выбираются двухфазные автоматические выключатели (рисунок 3.36).

Для трехфазной сети переменного тока при отсутствии однофазных потребителей применяются трехполюсные автоматические выключатели и 3+N-полюсные выключатели, если в трехфазной сети есть однофазные потребители и проводники  $N$  и  $PE$  разделены (рисунок 3.36).

При выборе числа полюсов необходимо руководствоваться следующими соображениями: во внутренних сетях предприятий используются ранее разделенные  $PE$ - и  $N$ -проводники, поэтому трехфазные НКУ получают питание пятижильным кабелем (система заземлений  $TN-S$ ). В этой системе заземлений однофазные потребители получают питание трехжильным кабелем, а защищаются двухполюсными автоматическими выключателями.

Трехфазные несимметричные потребители в системе  $TN-S$  получают питание пятижильным кабелем, а защищаются четырехполюсными автоматическими выключателями.

Трехфазные симметричные потребители (например, асинхронные электродвигатели) могут получить питание четырехжильным кабелем и защищаться трехполюсными автоматическими выключателями, однако в этом случае для цепей управления на 220 В требуется отдельный двухполюсный автоматический выключатель.

В цепях постоянного тока схемы подключения автоматических выключателей показаны на рисунке 3.37.

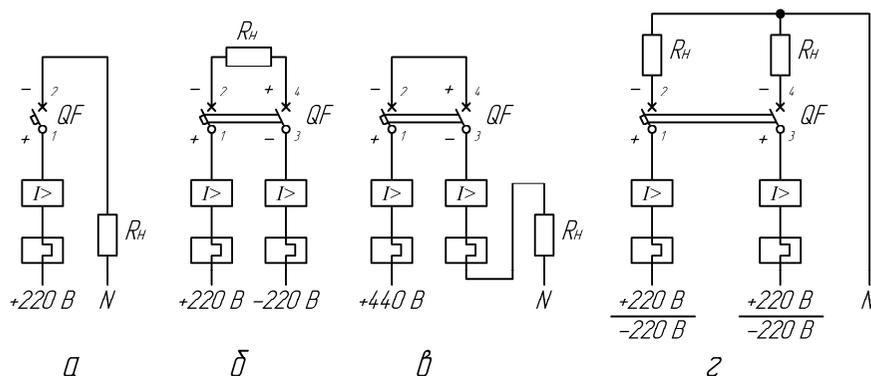


Рисунок 3.37 – Принципиальные электрические схемы включения автоматических выключателей постоянного тока:

*a* – однополюсного в сеть 220 В; *б* – двухполюсного в сеть 440 В между полюсами; *в* – двухполюсного в сеть 440 В между полюсом и нулевым проводом; *г* – двухполюсного в сеть 220 В между одноименными зажимами (плюс и минус) и нулевым проводом

Схема 3.37, *a* используется при  $U_{н.авт} = 220$  В и напряжении между клеммами и нулевым проводом 220 В.

Схема 3.37, *б* используется при  $U_{н.авт} = 220/440$  В, причем между клеммой выключателя 440 В. Нагрузка включается на напряжение 440 В.

Схема 3.37, *в* используется при  $U_{н.авт} = 220/440$  В, когда напряжение между клеммами выключателя и нулевым проводом составляет 440 В. Нагрузка включается на напряжение 440 В.

Схема 3.37, *г* используется при  $U_{н.авт} = 220$  В, когда напряжение между клеммами выключателя составляет 440 В, а между клеммами выключателя и нулевым проводом – 220 В, и на это напряжение включается нагрузка.

Для автоматических выключателей постоянного тока ошибочное подключение полюсов приведет к выходу автоматического выключателя из строя. Поэтому подключение сети выполняют по инструкции завода-изготовителя. Недопустимо заменять двухполюсный автоматический выключатель двумя однополюсными. Эти требования вытекают из более сложного характера гашения дуги постоянного тока. Выпускаются специальные серии автоматических выключателей постоянного тока, например, серия ЕТІМАТ DC на токи от 0,5 до 32 А. Их отключающая способность 6 кА; имеют тепловые и электромагнитные расцепители типа *B* или *C*, диапазон рабочих температур от  $-25$  до  $+60$  °С, время срабатывания при КЗ 2,5 мс.

*б. Степень защиты автоматического выключателя* от воздействия окружающей среды и от соприкосновения людей с токоведущими частями выбирается исходя из условий его работы. При монтаже его вне шкафа управления степень защиты оболочки должна быть IP54; при монтаже внутри шкафа управления – IP00 зажимов и IP30 оболочки или IP20 зажимов и IP30 – оболочки выключателя.

*7. Климатическое исполнение и категория размещения* также выбираются в зависимости от условий работы выключателя в соответствии с ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70.

### 3.10. Проверка автоматического выключателя при выборе

Если основные и дополнительные параметры автоматического выключателя определены и выбран его тип, то производится несколько проверок соответствия его условиям работы в сети.

Проверка выбранного автоматического выключателя производится по следующим параметрам:

1) по несрабатыванию от пусковых токов (например, от пусковых токов электродвигателя) по формуле (3.17) или по формуле

$$I_{н.расц.30} K_{эм.мин} \geq K_{отс} I_{н.дв} k_i, \quad (3.19)$$

где  $K_{эм.мин}$  – минимальная кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя выбранного класса; например, при выборе расцепителя класса *D*  $K_{эм.мин} = 10$ ;

$K_{отс}$  – коэффициент надежности отстройки от пускового тока, зависящий от уровня напряжения в точке подключения относительно номи-

нального напряжения, от наличия апериодической составляющей в пусковом токе, от возможного разброса тока срабатывания расцепителей автоматического выключателя. Рекомендуется применять для модульных выключателей  $K_{отс} = 1,25-1,45$ , где 1,25 относится к внутренним сетям предприятий, а 1,45 – к подключению автоматических выключателей на вводе в здание;

$I_{н.дв}$  – номинальный ток двигателя, А;  
 $k_i$  – кратность пускового тока.

Условию (3.19) соответствует рисунок 3.35.

2) по условию надежного отключения наибольшего тока КЗ:

$$I_{пр.откл} > I_{КЗ}^{(3)}, \quad (3.20)$$

где  $I_{пр.откл}$  – предельный допустимый ток КЗ, отключаемый автоматическим выключателем без повреждения, указывается в технических данных, кА;

$I_{КЗ}^{(3)}$  – ожидаемый ток трехфазного КЗ, кА;

3) по чувствительности к однофазному току КЗ:

$$\frac{I_{КЗ}^{(1)}}{I_{н.расц.30^\circ C} K_{эм.мах}} \geq 1,45, \quad (3.21)$$

где  $I_{КЗ}^{(1)}$  – ожидаемый ток однофазного КЗ, кА;

$K_{эм.мах}$  – максимальная кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя выбранного класса. Например, для класса D  $K_{эм.мах}$  равна 14 или 20 (см. конкретные характеристики автоматических выключателей);

4) по условию соответствия номинального тока комбинированного расцепителя допустимому длительному току проводников защищаемой электрической цепи:

$$I_{н.расц.30^\circ C} \leq I_{доп.дл}, \quad (3.22)$$

где  $I_{доп.дл}$  – допустимый длительный ток проводника, А;

5) по условию селективности:

$$t_{ср.QF2} > t_{ср.QF1}, \quad (3.23)$$

$$I_{н.расц.QF2} K_{эм.мах2} > I_{н.расц.QF1} K_{эм.мах1},$$

где  $t_{ср.QF2}$  и  $t_{ср.QF1}$  – время срабатывания автоматического выключателя, дальше и ближе расположенного к точке КЗ, с;

$I_{н.расц.QF2}$  и  $I_{н.расц.QF1}$  – номинальные токи расцепителей автоматических выключателей, расположенных дальше и ближе к точке КЗ, А;

$K_{эм.мах2}$  и  $K_{эм.мах1}$  – максимальные кратности токов срабатывания автоматических выключателей, расположенных дальше и ближе к точке КЗ, о.е.

Рассмотрим условие (3.23) более подробно. На рисунке 3.38 условно показана электрическая сеть от вводно-распределительного устройства (ВРУ) до электродвигателя (М). На участке  $L_1$  ток КЗ уменьшается от  $I_{КЗ(2)}^{(1)}$  до  $I_{КЗ(1)}^{(1)}$ , и этот участок должен защищать автоматический выключатель  $QF1$ . На участке  $L_2$  ток изменяется от  $I_{КЗ(3)}^{(1)}$  до  $I_{КЗ(2)}^{(1)}$ , этот участок должен защищать автоматический выключатель  $QF2$ . На участке  $L_3$  ток изменяется от  $I_{КЗ(4)}^{(1)}$  до  $I_{КЗ(3)}^{(1)}$ , этот участок должен защищать автоматический выключатель  $QF3$ .

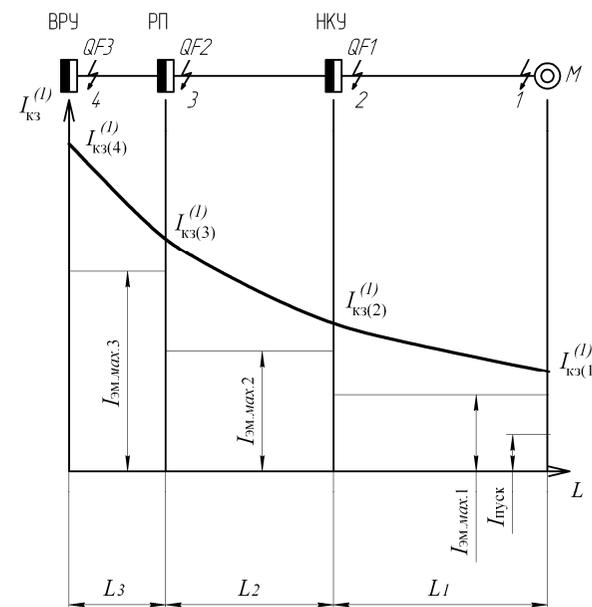


Рисунок 3.38 – Изменение однофазных токов КЗ и уставок срабатывания электромагнитных расцепителей максимального тока

Если предположить, что на каждом участке защита от токов КЗ осуществляется автоматическими выключателями с расцепителями максимального тока (с токовой отсечкой без выдержки времени), то условие селективности по току сводится к условию вида

$$I_{\text{ср.}QF3} > I_{\text{ср.}QF2} > I_{\text{ср.}QF1} \quad \text{или} \quad I_{\text{эм.макс3}} > I_{\text{эм.макс2}} > I_{\text{эм.макс1}}, \quad (3.24)$$

где  $I_{\text{эм.макс}} = I_{\text{н.расц}} K_{\text{эм.макс}}$ .

Выбор автоматических выключателей должен быть выполнен по условию (3.21) надежного отключения наименьшего однофазного тока КЗ на участке. По формуле (3.21):

$$\begin{aligned} I_{\text{эм.макс1}} &\geq \frac{I_{\text{КЗ(1)}}^{(1)}}{1,45}, \\ I_{\text{эм.макс2}} &\geq \frac{I_{\text{КЗ(2)}}^{(1)}}{1,45}, \\ I_{\text{эм.макс3}} &\geq \frac{I_{\text{КЗ(3)}}^{(1)}}{1,45}, \end{aligned} \quad (3.25)$$

где  $I_{\text{эм.макс}} = I_{\text{н.расц}} K_{\text{эм.макс}}$ . Селективность по току предполагает, что соотношение между токами срабатывания электромагнитных расцепителей составляет не менее 1,5.

На рисунке 3.38 условно изображены токи срабатывания электромагнитных расцепителей, определенные по формуле (3.25).

Из рисунка 3.38 видно, что ток  $I_{\text{эм.макс2}}$  может быть меньше токов КЗ на участке  $L_1$ , а ток  $I_{\text{эм.макс3}}$  может быть меньше токов КЗ на участке  $L_2$ . Это значит, что автомат  $QF2$  может сработать от токов КЗ на участке  $L_1$ , а автомат  $QF3$  – от токов КЗ на участке  $L_2$ .

Селективность работы автоматических выключателей  $QF1$ – $QF3$  в этом случае может быть нарушена. Следовательно, условие  $I_{\text{ср.}QF3} > I_{\text{ср.}QF2} > I_{\text{ср.}QF1}$  недостаточно для селективной работы автоматических выключателей  $QF1$ – $QF3$ . В результате обеспечивается только частичная селективность.

Дополнительное условие селективности по времени имеет вид

$$t_{\text{ср.}QF3} > t_{\text{ср.}QF2} > t_{\text{ср.}QF1}, \quad (3.26)$$

где  $t_{\text{ср}}$  – время срабатывания автоматического выключателя, с.

Обеспечить условие (3.26) автоматическими выключателями, имеющими только максимальные расцепители тока (с токовой отсечкой без выдержки времени) не возможно. Необходимо использовать во ВРУ и РП селективные автоматические выключатели типа АЗ700 или ВА55. Например, выключатели ВА55 имеют ступень селективности 0,1; 0,2; 0,3 с. Неселективные автоматические выключатели АЕ2000 или ВА51 имеют время срабатывания от 40 до 20 мс (с увеличением тока КЗ время срабатывания уменьшается) и не обеспечивают селективность.

Проверка на селективность может быть выполнена с использованием карты селективности, т. е. графического представления время-токовых характеристик рассматриваемых автоматических выключателей на одном рисунке. Применительно к рисунку 3.38, при использовании выключателя  $QF1$  с токовой отсечкой, а селективных выключателей  $QF2$  и  $QF3$  со ступенью селективности  $\Delta t = 0,1$  с, карта селективности имеет вид рисунка 3.39. На этом рисунке не показан возможный разброс характеристик автоматических выключателей.

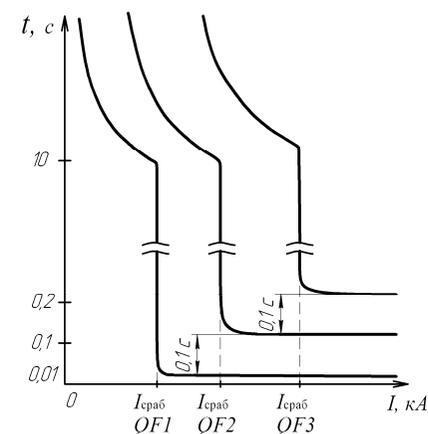


Рисунок 3.39 – Карта селективности к данному рисунку 3.38 при использовании селективных автоматических выключателей  $QF2$  и  $QF3$  со ступенью селективности  $\Delta t = 0,1$  с

Соотношение между временными задержками на срабатывание селективных автоматических выключателей должно быть более 1,5, а величина временной задержки – не менее 0,1 с.

Для обеспечения селективности защиты от токов КЗ известно другое решение – использование в РП и в ВРУ предохранителей. Они имеют зависимую от тока характеристику срабатывания и поэтому проще обеспечивают селективность.

В ГОСТ Р50030.2-94 приведены сведения, определяющие координату характеристик автоматических выключателей и плавких предохранителей, включенных в одну цепь.

Рассмотрим случай, когда в НКУ установлен автоматический выключатель, а в РП – плавкий предохранитель. При правильной координации защитных устройств предполагается, что при любых значениях сверхтока, вплоть до предельно отключаемых токов автоматического выключателя, отключение в цепи КЗ на участке  $L_1$  производится только автоматическим выключателем (рисунок 3.40, а).

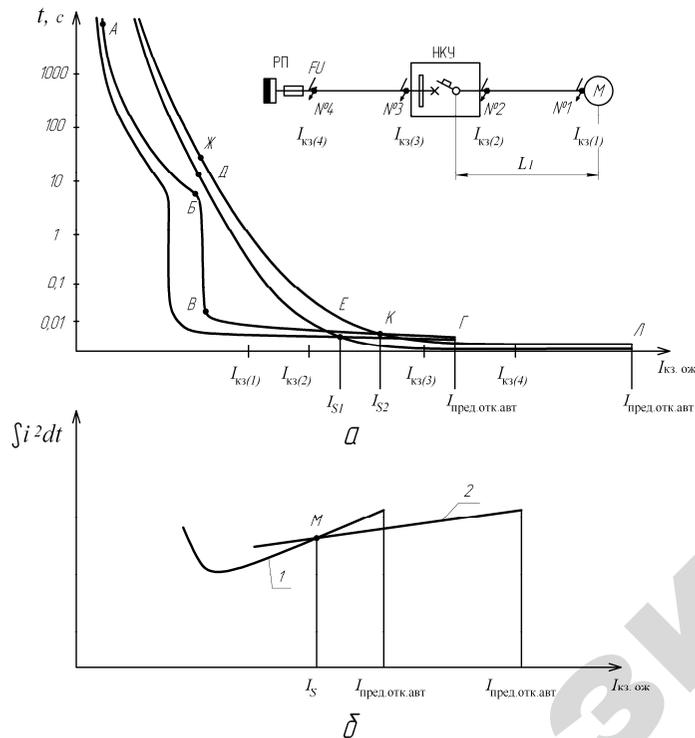


Рисунок 3.40 – Координация автоматического выключателя и плавкого предохранителя по времятоковым характеристикам (а) и по интегралу Джоуля (б): АБВГ – времятоковая характеристика автоматического выключателя; ДЕ и ЖКЛ – времятоковые характеристики плавкой вставки предохранителя;  $I_{s1}$  – предельный ток селективности при горячей вставке предохранителя;  $I_{s2}$  – предельный ток селективности при холодной плавкой вставке предохранителя (ток координации);  $I_{пред.откл.авт.}$ ,  $I_{пред.откл.пред.}$  – предельные отключаемые токи КЗ автоматическим выключателем и плавким предохранителем;  $I_{КЗ.ож.}$  – ожидаемый ток КЗ; 1 – интеграл Джоуля автоматического выключателя; 2 – интеграл Джоуля плавкого предохранителя

Для практической реализации этого требования необходимо сравнить не только времятоковые характеристики этих устройств защиты в области токов КЗ, но и характеристики интеграла Джоуля в области токов КЗ. При этом не следует забывать о предельно отключаемых токах КЗ этими аппаратами.

Например, на рисунке 3.40, а изображены защитные характеристики автоматического выключателя с комбинированным расцепителем и плавкого предохранителя. Область токов КЗ для автоматического выключателя – это линия В–Г, причем точка Г соответствует предельно отключаемому току автоматического выключателя  $I_{пред.откл.авт.}$ . Область токов КЗ для плавкого предохранителя – нижняя часть времятоковой характеристики: участок Д–Е (горячее состояние предохранителя) и участок Ж–К (холодное состояние предохранителя). Предельно отключаемый ток плавкого предохранителя  $I_{пред.откл.пред.}$  соответствует точке Л. Точки Д и Ж должны лежать выше точки В. Точка Е показывает предельный ток селективности  $I_{s1}$  при горячем состоянии предохранителя, а точка К – предельный ток селективности  $I_{s2}$  при холодном состоянии предохранителя. При меньших токах КЗ обеспечивается срабатывание автоматического выключателя раньше, чем плавкого предохранителя. Токи КЗ  $I_{КЗ1}$  и  $I_{КЗ2}$  должны быть меньше тока селективности  $I_{s1}$ . Только в этом случае при токах КЗ на участке  $L_1$  сработает автоматический выключатель раньше, чем плавкий предохранитель.

Для координации характеристик плавкого предохранителя и автоматического выключателя требуется, чтобы предельный ток селективности был меньше предельно отключаемого тока автоматического выключателя, а токи КЗ на участке, защищаемом автоматическим выключателем, были меньше предельного тока селективности.

Однако этого условия недостаточно. Для подтверждения условия первоочередного срабатывания автоматического выключателя требуется провести координацию характеристик интеграла Джоуля плавкого предохранителя и автоматического выключателя.

На рисунке 3.40, б представлены интегралы Джоуля автоматического выключателя (кривая 1) и плавкого предохранителя (прямая 2). Пересечение этих характеристик дает точку М, которой соответствует ток  $I_s$ . Если до значения тока  $I_s$  характеристика интеграла Джоуля автоматического выключателя была ниже характеристики интеграла Джоуля плавкого предохранителя, то координация удалась – первым сработает автоматический выключатель. Кроме этого, должно выполняться условие  $I_s \leq I_{пред.откл.авт.}$ .

Проверка условий координации по интегралу Джоуля является более точной и убедительной, чем по времятоковым характеристикам.

После выбора и проверки основных параметров автоматических выключателей записывают их условное обозначение в виде цифр и букв. Причем номинальные токи (и другие параметры) зашифрованы таким образом, чтобы соответствовать шифровке этих параметров в других электрических аппаратах (разъединителей, предохранителей и т. д.).

Структура условного обозначения автоматических выключателей ВА51 следующая:

$$BA51X_1X_2X_3 - X_4X_5X_6X_7X_8X_9X_{10}X_{11}X_{12}X_{13}X_{14},$$

где ВА51 – серия;

$X_1$  – наличие буквы «Г» означает, что автоматический выключатель предназначен для защиты асинхронных электродвигателей; отсутствие буквы «Г» – для защиты электрических сетей;

$X_2X_3$  – условное обозначение номинального тока (если 25, то номинальный ток 25 А; если 26, то 32 А; если 27, то 40 А; если 28, то 63 А; если 29, то 100 А; если 31, то 125 А; если 33, то 160 А; если 35, то 250 А; если 37, то 400 А);

$X_4$  – число полюсов (3 – три полюса с расцепителями; 8 – два полюса с расцепителями в трехполюсном исполнении выключателя);

$X_5$  – исполнение расцепителей тока (2 – расцепитель в зоне токов короткого замыкания; 4 – расцепитель в зоне токов перегрузки и короткого замыкания);

$X_6X_7$  – наличие расцепителей и свободных контактов (00 – без дополнительных расцепителей и свободных контактов; 11 – наличие свободных контактов; 18 – наличие независимого расцепителя и свободных контактов; 24 – наличие расцепителя минимального напряжения и свободных контактов);

$X_8$  – вид привода и способ установки выключателя (1 – ручной привод, стационарное исполнение; 3 – электромагнитный привод, стационарное исполнение; 5 – ручной дистанционный привод, выдвижное исполнение; 7 – электромагнитный привод, выдвижное исполнение);

$X_9$  – дополнительные механизмы (0 – отсутствуют; 4 – устройство для запираания выключателя в отключенном состоянии; 5 – ручной дистанционный привод для оперирования через дверь распределительного устройства; 6 – устройство для

блокировки положения «Отключено» выключателя стационарного исполнения с ручным приводом);

$X_{10}$  – наличие или отсутствие регулировки номинального тока теплового расцепителя (Р – с регулировкой; 0 – без регулировки);

$X_{11}X_{12}$  – степень защиты от воздействия окружающей среды и от соприкосновения с токоведущими частями выключателя (00 – IP00 зажимов и IP30 оболочки выключателя; 20 – IP20 зажимов и IP30 оболочки выключателя; 54 – IP54 выключателей в оболочке);

$X_{13}X_{14}$  – климатическое исполнение (УХЛ, Т) и категория размещения (2, 3) по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70.

Структура условного обозначения автоматических выключателей ВА47 следующая:

$$BA47-X_1X_2-X_3X_4X_5X_6X_7X_8-X_9X_{10},$$

где ВА47 – серия;

$X_1X_2$  – условное число, обозначающее номинальный ток автоматического выключателя. Если указано число 29, то номинальный ток автоматического выключателя составит 63 А; числу 100 соответствует ток 100 А;

$X_3$  – число полюсов (1, 2, 3, 4);

$X_4$  – условное обозначение типа электромагнитного расцепителя (B, C, D);

$X_5X_6$  – номинальный ток расцепителей (для ВА47-29: 0,5; 1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 А; для ВА47-100: 10; 16; 25; 32; 35; 40; 50; 63; 80; 100 А);

$X_7X_8$  – исполнение (УХЛ3);

$X_9X_{10}$  – ТУ на изготовление (ТУ 2000 АГИЕ. 641235.003).

Структура условного обозначения автоматических выключателей ВА61 следующая:

$$BA61X_029-X_1X_2X_3X_4X_5-X_6X_7X_9X_9,$$

где ВА61 – серия;

$X_0$  – условное обозначение типа расцепителей: F – комбинированный расцепитель; H – электромагнитный расцепитель;

29 – условное число, обозначающее, что номинальный ток автоматического выключателя составляет 63 А;

$X_1$  – число полюсов с расцепителями (1, 2, 3, 4);

$X_2$  – условное обозначение типа электромагнитного расцепителя (Z, L, K);

$X_3X_4$  – номинальный ток расцепителей: 0,5; 0,8; 1; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 А;

$X_5 - NA$  – наличие нейтрального полюса;

$X_6 - PH$  – независимый расцепитель;

$X_7$  – род тока независимого расцепителя:  $\sim$  переменный;  $-$  постоянный;

$X_9, X_9$  – номинальное напряжение независимого расцепителя: 24, 110, 220 В постоянного тока; 24, 127, 220, 380 В переменного тока.

Например, если выбирается автоматический выключатель промышленного назначения с трехполюсными расцепителями комбинированного типа  $K$ , на номинальный ток 12,5 А, с нейтральным полюсом, с независимым расцепителем на 220 В переменного тока, исполнение УХЛЗ, то обозначение будет следующее: «ВА61F29-3K12,5NA-PH~220В, исполнение ИУКЖ 641. 232.015ТУ».

### 3.11. Эксплуатация автоматических выключателей

Эксплуатация автоматических выключателей заключается в проведении технических уходов и текущих ремонтов. В конце технического ремонта производится наладка автоматического выключателя (испытание).

Объем и общая технология технического ухода за автоматическими выключателями всех типов излагается подробно в [34] и [24].

Испытание расцепителей автоматических выключателей производится на специальных стендах, обеспечивающих необходимые токи испытаний. На рисунке 3.41 представлена принципиальная электрическая схема одного из возможных вариантов стенда.

На стенде используется автотрансформатор  $TV1$  (РН0-250-10, мощность 2,5 кВА, 40 А), выход которого подключен к понижающему разделительному трансформатору  $TV2$  (ОСМ1 – 1,0). Выход трансформатора  $TV2$  включен через универсальный трансформатор тока  $TA$  (УТТ-1) на две параллельные цепи. Трансформатор тока  $TA$  имеет зажимы для выбора требуемого диапазона токов: 15; 50; 150; 600 А. Диапазон токов выставляется с помощью переключки «а-б». В цепи «наладка» включен вспомогательный автоматический выключатель  $QF2$ , не способный срабатывать при токах испытания. В цепи «испытание» включены последовательно выключатель-разъединитель  $QS$  (ВН-32, 100А) и испытуемый автоматический выключатель  $QF3$ . Автоматический выключатель  $QF1$  (ВМ-40,  $I_n = 32$  А, тип расцепителя  $D$ ) включает стенд в однофазную сеть 220 В.

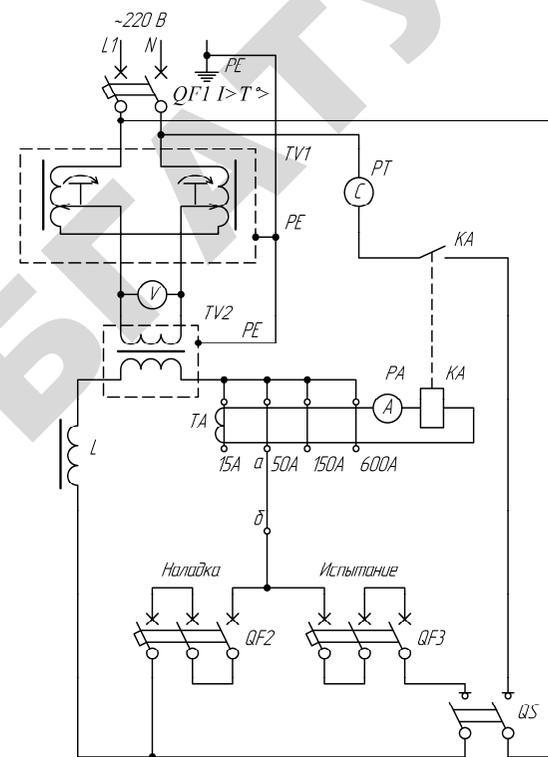


Рисунок 3.41 – Принципиальная электрическая схема стенда для проверки автоматических выключателей с комбинированными расцепителями на ток до 40 А

На стенде следует использовать амперметр  $PA$  с хорошими демпфирующими свойствами. Вольтметр  $PV$  используется для определения уровня выходного напряжения. Для автоматического включения и отключения секундомера  $PT$  служит реле тока  $KA$  (типа РТ-40).

На стенде можно производить проверку тепловых расцепителей с номинальным током до 40 А при трехкратной перегрузке и с электромагнитным расцепителем до 40 А при 15-кратной перегрузке.

Наладку стенда производят следующим образом: включают  $QF2$  (трансформатор тока  $TA$  вначале используется с ответвлением 15 А), увеличивают напряжение на  $QF2$  и измеряют ток. Так делают несколько раз, пока ток не станет равным 15 А. Строят зависимость  $I_{15} = f(U)$ . Затем аналогично повторяют опыты на пределе измере-

Испытание	Обозначение расцепителя и его токовая уставка	Испытательный ток	Начальное состояние	Пределы времени расцепления и не расцепления	Результаты	Примечание
<i>d</i>	$L(4I_{н.расц})$	$3,2 I_{н.расц}$	Холодное	В течение 0,2 с	Без расцепления	Ток создается путем замыкания вспомогательного выключателя
<i>e</i>	$L(4I_{н.расц})$	$4,8 I_{н.расц}$	Холодное	В течение 0,2 с	Расцепление	–

При проверке электромагнитных расцепителей автоматических выключателей с комбинированными расцепителями может оказаться, что тепловой расцепитель срабатывает раньше, чем электромагнитный расцепитель. Чтобы убедиться в том, что сработал электромагнитный расцепитель, сразу после отключения снова включают автоматический выключатель. Если он включается, то сработал электромагнитный расцепитель, а если не включается, то сработал тепловой расцепитель. Ему необходимо некоторое время для остывания нагревательного элемента и возвращение в исходное состояние.

### 3.12. Контрольные вопросы и задания

1. В чем отличие установочных автоматических выключателей от специальных?
2. Чем отличаются токоограничивающие автоматические выключатели от селективных?
3. Перечислите требования к автоматическим выключателям.
4. Каким образом можно изменить ток срабатывания электромагнитного расцепителя?
5. Назовите положительные и отрицательные свойства электрической дуги или искры.
6. Объясните статическую и динамическую характеристики дуги.
7. Объясните условие гашения дуги постоянного тока.
8. Объясните условие гашения дуги переменного тока.

ний тока 50, 150, 600 А. Таким образом, получают четыре характеристики на разных пределах токов. Этими характеристиками пользуются для предварительной установки требуемого тока.

При испытаниях включают *QF3*. Разъединитель *QS* отключен. Включают *QF2*. Автотрансформатор *TV1* выводят на режим требуемого тока испытаний. Отключают *QF2* и включают *QS*. Включаются токовое реле *KA* и секундомер *PT*. Рукоятками *TV1* быстро подгоняют ток к требуемому значению. При срабатывании расцепителя автоматического выключателя *QF3* ток во вторичной цепи прерывается, отключаются реле *KA* и секундомер *PT*.

В отличие от других стендов предварительная установка некоторого тока через *QF2* позволяет избежать бросков тока через амперметр *PA* и колебаний стрелки амперметра. Этому способствует также наличие индуктивности *L* в цепи испытаний.

Расцепители автоматического выключателя сначала испытываются пофазно, а потом при последовательном соединении.

При пофазной проверке сначала испытывается тепловой расцепитель. Кратность тока перегрузки выбирают по защитной характеристике автоматического выключателя (обычно  $1,3I_{н.р}$  и  $2,6I_{н.р}$ ). Затем увеличивают перегрузку до значения тока отсечки и проверяют срабатывание электромагнитного расцепителя.

В качестве примера в таблице 3.5 приведены параметры заводских испытаний расцепителей автоматических выключателей ВМ-40.

Таблица 3.5 – Параметры испытания расцепителей типов *L* автоматического выключателя ВМ40

Испытание	Обозначение расцепителя и его токовая уставка	Испытательный ток	Начальное состояние	Пределы времени расцепления и нерасцепления	Результаты	Примечание
<i>a</i>	$L(4I_{н.расц})$	$1,05I_{н.расц}$	Холодное	$t \geq 1ч$	Без расцепления	–
<i>b</i>	$L(4I_{н.расц})$	$1,3 I_{н.расц}$	Немедленно после испытания «а»	$< 1ч$	Расцепление	Непрерывное нарастание тока в течение 5 с
<i>c</i>	$L(4I_{н.расц})$	$2,6 I_{н.расц}$	Холодное	$1 < t \leq 60$ (при $I_{н.расц} \leq 32 А$ ) $1 < t \leq 120$ (при $I_{н.расц} > 32 А$ )	Расцепление	–

9. Объясните устройство дугогасительной решетки и принцип ее действия.

10. Чем отличается эрозия контактов от дугового износа контактов?

11. Какие материалы стойки к износу?

12. От чего зависит время вибрации контактов?

13. Объясните действие электродинамических сил для усиления нажатия контактов в автоматических выключателях?

14. Объясните действие электродинамических сил для токоограничения в автоматических выключателях.

15. Назовите основные элементы автоматического выключателя и поясните их назначение.

16. Назовите основные и дополнительные расцепители автоматических выключателей.

17. Какие кратности токов имеют электромагнитные расцепители автоматических выключателей с характеристиками *A*, *B*, *C* и *D*?

18. Как действуют электромагнитные расцепители с гидравлическим замедлением срабатывания?

19. Объясните принцип действия электронного расцепителя и укажите его преимущества.

20. Объясните принцип действия теплового расцепителя и его характеристики.

21. Объясните принцип действия расцепителя минимального напряжения и схемы его включения.

22. Объясните назначение и устройство независимого расцепителя.

23. Объясните назначение и устройство расцепителя тока в нулевом проводе.

24. Какие отличительные черты имеют автоматические выключатели четвертого поколения?

25. Объясните отличие номинального тока автоматического выключателя от номинального тока расцепителя.

26. Объясните понятие «предельная отключающая способность» автоматического выключателя.

27. Объясните понятие «термическая стойкость» автоматического выключателя.

28. Объясните понятие «полное время отключения» автоматического выключателя.

29. Перечислите основные показатели, по которым выбирают автоматические выключатели.

30. По каким параметрам проверяются автоматические выключатели?

31. Где рекомендуется использовать автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями типов *A*, *B*, *C*, *D*?

32. Выберите автоматический выключатель для защиты силовых цепей асинхронного электродвигателя 4А100L4У3 от токов КЗ:  $P_n = 4,0$  кВт; коэффициент загрузки  $K_z = 0,8$ ;  $\cos\varphi_n = 0,84$ ; номинальный КПД  $\eta_n = 84$  %; кратность пускового тока  $K_i = 7,5$ . Кабель, питающий электродвигатель от низковольтного комплектного устройства НКУ, имеет длину 6 м. Автоматический выключатель устанавливается в НКУ. От ВРУ до НКУ проложен кабель АВВГ ( $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>) длиной 12 м. Токи короткого замыкания на вводе в ВРУ составляют  $I_{кз}^{(3)} = 3,25$  кА при  $\cos\varphi_{кз}^{(3)} = 0,96$ ,  $I_{кз}^{(1)} = 1,1$  кА. Время пуска электродвигателя <1 с.

33. Выберите автоматический выключатель, предназначенный для защиты от сверхтоков кабеля, питающего электродвигатель мощностью 7,5 кВт. Параметры электродвигателя:  $P_n = 7,5$  кВт,  $\cos\varphi_n = 0,86$ ,  $\eta_n = 87,5$  %,  $k_i = 7,5$ . Двигатель включается напрямую в сеть 380 В. Ожидается температура внутри НКУ не более 40 °С.

34. Выберите автоматический выключатель модульного типа, предназначенный для защиты от сверхтоков кабеля, питающего электродвигатель мощностью 37 кВт. Параметры электродвигателя при схеме «треугольник»:  $I_n = 69,49$  А;  $k_i = 6,5$ . Двигатель включается в сеть 380 В путем переключения схемы «звезда» на схему «треугольник». Ожидается температура в НКУ не более 50 °С.

## Глава 4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

### 4.1. Общие сведения о перенапряжениях

По международному стандарту [35] *перенапряжением в электротехническом устройстве* называется напряжение между двумя точками электротехнического устройства, значение которого превышает наибольшее рабочее значение напряжения. Перенапряжения опасны тем, что могут привести к электрическому пробое изоляции и возникновению тока КЗ.

Перенапряжения делятся на 2 группы: 1) импульсные; 2) временные.

*Импульсное перенапряжение* – это резкое увеличение напряжения в точке электрической сети, вслед за которым напряжение восстанавливается до первоначального или близкого к нему уровня. Импульсные перенапряжения длятся кратковременно, до 0,005 с (5 мс).

На рисунке 4.1 изображен пример импульсного перенапряжения. Импульс перенапряжения характеризуется амплитудой  $U_{и.а}$  и продолжительностью его действия  $\Delta t_{и0,5}$  при напряжении  $0,5U_{и.а}$ .

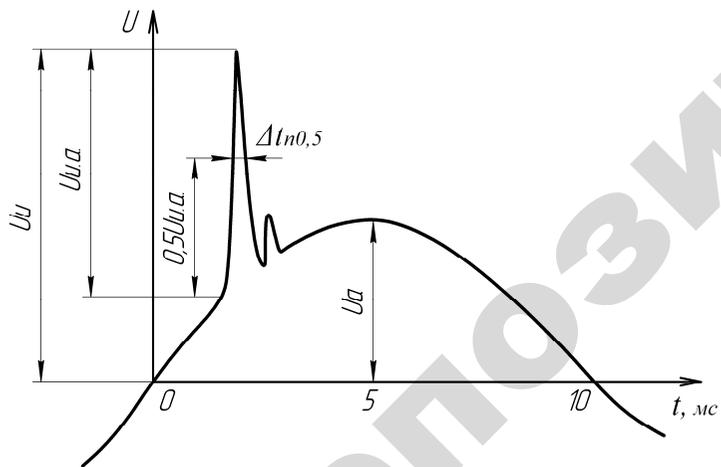


Рисунок 4.1 – Импульсное перенапряжение и его параметры

*Временное перенапряжение* – повышение напряжения в электрической сети выше 110 % номинального напряжения продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутации или коротких замыканиях.

На рисунке 4.2 приведена графическая зависимость изменения мгновенных значений напряжения сети частотой 50 Гц при временных перенапряжениях продолжительностью примерно 44 мс. Временное перенапряжение характеризуется продолжительностью перенапряжения  $t_{п}$  и кратностью перенапряжения:

$$K_{пн} = \frac{U_{\max.a}}{U_{\text{ном.а}}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{\max.a}$  – амплитуда перенапряжения, В;

$U_{\text{ном.а}}$  – амплитуда номинального напряжения, В.

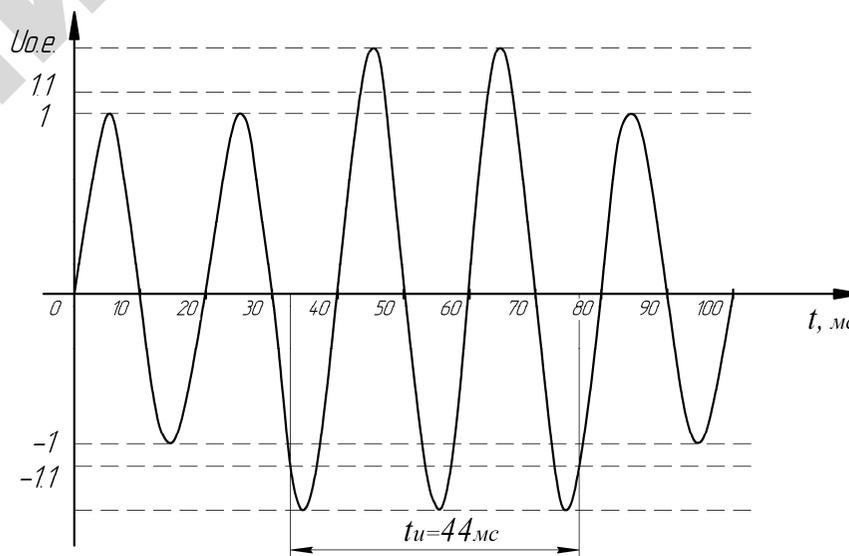


Рисунок 4.2 – Временное перенапряжение и его параметры

Наибольшую опасность для электроустановок представляют импульсные перенапряжения.

Перенапряжения делятся на внешние и внутренние, в зависимости от места, где они возникают (по отношению к электроустановке).

Внешние перенапряжения чаще всего возникают от действия высоковольтного атмосферного разряда во внешних цепях (по отношению к электроустановке). Этот разряд оказывает прямое или не прямое воздействие.

*Прямое воздействие* возникает при прямом ударе молнии в электроустановку. При этом возникают большие (десяти или сотни кА) кратковременные токи и перенапряжения на проводящих элементах электроустановки. Защита от прямого удара молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Она выполняется по нормам, приведенным в [36], [37].

*Непрямое воздействие* молнии встречается наиболее часто. Оно проявляется в следующих случаях:

1) при ударе молнии в линии электропередачи, от которой получает питание электроустановка. Вследствие этого перенапряжение достигает нескольких десятков тысяч вольт, а значение тока – нескольких тысяч ампер. Грозовой разряд носит характер бегущей волны с большой крутизной и временем возрастания от нуля до максимума за 1–8 мкс и длительностью до 350 мкс. Перенапряжения по линии электропередач переносятся к потребителям;

2) при ударе молнии внутри облака или между облаками, в деревья или другие предметы. Вследствие электромагнитного излучения индуцируются перенапряжения в проводах наружных и внутренних цепей;

3) при ударе молнии в землю вблизи заземления или заземляющего контура. Возникает скачок напряжения на заземляющем проводнике, проникающий в электроустановку через ее заземление.

В сетях напряжением 0,4 кВ могут быть грозвые импульсные напряжения величиной до 10 кВ в воздушной линии питания и до 6 кВ – во внутренней проводке зданий и сооружений [38]. Следует также отметить, что вероятность появления молнии с амплитудой 65 кА составляет примерно 8 %, а с амплитудой 100 кА – 2 %.

*Внешние коммутационные импульсы перенапряжения* могут появляться в результате:

– переключений в мощных системах энергоснабжения, например, при коммутациях конденсаторных батарей;

– переключений в системах электроснабжения в непосредственной близости от электроустановок зданий или изменений нагрузки в электрических распределительных системах;

– резонансных колебаний напряжения в электрических сетях, обусловленных работой таких переключающих приборов, как тиристоры;

– повреждений в системах, например, при коротких замыканиях на землю и дуговых разрядах в электрических установках.

В сети напряжением 0,4 кВ могут быть коммутационные импульсные напряжения с амплитудой до 4,5 кВ. Грозвые и коммутационные импульсные напряжения возникают как в воздушных, так и в кабельных линиях питания.

*Внутренние перенапряжения* возникают внутри электроустановок при коммутации емкостей, индуктивностей (трансформаторов, дросселей), тиристоров из-за наличия в них накопленного заряда неосновных носителей, при мгновенных изменениях тока в цепи и т. д.

Выполнять основную изоляцию электрооборудования на уровне перенапряжения экономически невыгодно. Ее надо защищать от возникающих перенапряжений. Для этого служат средства защиты от перенапряжений, ограничивающие перенапряжения до допустимых для изоляции значений.

Известно, что с увеличением подводимого к изоляции электрооборудования напряжения допустимое время нахождения изоляции под этим напряжением уменьшается (кривая 2 на рисунке 4.3) [16]. Средство защиты от перенапряжения должно иметь защитную характеристику, подобную кривой 3, лежащую ниже кривой 2. При возникновении перенапряжения (кривая 1) средство защиты от перенапряжения должно «пробиваться» раньше, чем изоляция защищаемого электрооборудования. После «пробоя» защищаемая сеть оказывается заземленной через внутреннее сопротивление  $R_{вн}$  средства защиты от перенапряжения и сопротивление заземляющего устройства  $R_3$ . Эти сопротивления ограничивают импульс тока разряда  $I_p$  и на них возникает падение напряжения, которое называется *остающимся напряжением* (кривая 4 на рисунке 4.3).

Остающееся напряжение определяется выражением

$$U_{ост} = I_p (R_{вн} + R_3), \quad (4.2)$$

где  $I_p$  – импульс тока разряда, А;

$R_{вн}, R_3$  – внутреннее сопротивление средства защиты от перенапряжения и сопротивление заземляющего устройства, Ом.

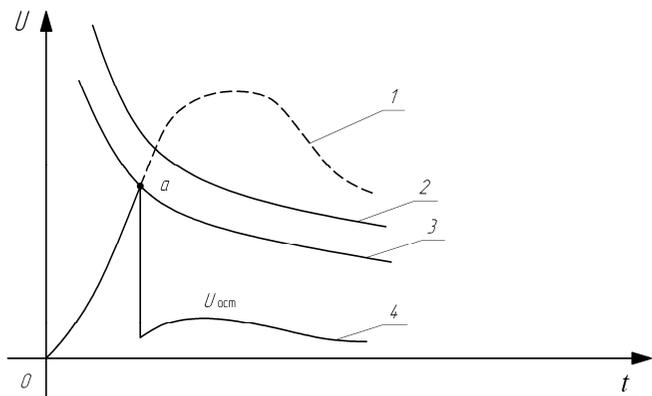


Рисунок 4.3 – Согласование допустимого времени нахождения изоляции электрооборудования под импульсным напряжением и защитной характеристики средства защиты от импульсных перенапряжений:

1 – импульс перенапряжения; 2 – характеристика  $U=f(t)$  изоляции электрооборудования; 3 – характеристика  $U=f(t)$  средства защиты от импульсных перенапряжений; 4 – остающееся напряжение

Чем меньше  $R_{вн}$  и  $R_z$ , тем эффективнее ограничиваются перенапряжения и лучшими свойствами обладает средство защиты от перенапряжения.

После прохождения импульса тока возможно возникновение тока КЗ частотой сети на землю. Например, в сетевых разрядниках искровой промежуток после пропускания импульса тока  $I_p$  оказывается ионизированным и легко пробивается номинальным фазным напряжением. Возникает ток частотой 50 Гц, который называется *сопровождающим*. Он может изменяться в широких пределах. Чтобы избежать срабатывания релейной защиты и отключения электрооборудования, разрядник должен отключать сопровождающий ток за наименьшее время (не более 0,01 с).

К устройствам защиты от перенапряжения предъявляются следующие требования:

- 1) вольт-секундная характеристика должна располагаться ниже аналогичной характеристики защищаемого электрооборудования;
- 2) остающееся напряжение не должно превышать значений, которые опасны для изоляции электрооборудования;
- 3) сопровождающий ток частотой 50 Гц должен отсутствовать или отключаться за минимальное время;
- 4) большое число срабатываний без технического обслуживания;
- 5) малая масса и размеры.

## 4.2. Средства защиты электрической воздушной сети 0,4 кВ от импульсных перенапряжений

Первое поколение средств защиты от импульсных перенапряжений электрических воздушных сетей 0,4 кВ – искровые разрядники. Второе поколение – вентильные разрядники, третье поколение – ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН).

Примером искрового разрядника простейшего типа является предохранитель пробивной ПП-А/3 Кашинского завода низковольтной аппаратуры (Россия). Он предназначен для воздушных сетей до 1 кВ, 50–60 Гц. В сетях напряжением 220/230 В пробивное напряжение разрядника составляет 351–600 В; в сетях 380/400 В – 701–1000 В; в сетях 660/690 В – 110–1600 В. Разрядник рассчитан на прохождение после пробоя сопровождающего максимального тока 200 А в течении 10 мин.

Пробивной предохранитель ПП-А/3 состоит из двух основных частей: головки 1 и основания 2, соединенных вместе посредством гильз, имеющих резьбу (рисунок 4.4).

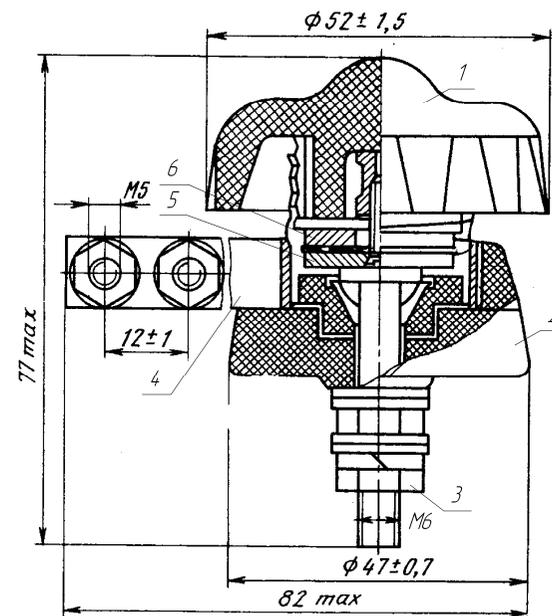


Рисунок 4.4 – Конструкция и габариты искрового разрядника (пробивного предохранителя) ПП-А/3:

1 – головка; 2 – основание; 3, 4 – контактные выводы; 5, 6 – электроды

Основание пробивного предохранителя имеет два выступающих контактных вывода 3 и 4. Один из контактов выполнен в виде скобы 4, приваренной к гильзе. Скоба с гильзой установлены в фарфоровом основании и закреплены в нем с помощью пластмассовой колодки и болта М6 с гайками. Выступающий конец скобы и латунный болт М6 служат для подключения предохранителя в цепь. Головка 1 предохранителя снабжена двумя электродами 5 и 6 (разрядными шайбами). Электрод 5 при ввинчивании головки в основание образует контактное соединение с болтом М6. Между электродами 5 и 6 располагается слюдяная прокладка с четырьмя отверстиями по окружности. Прокладка служит для осуществления точного искрового промежутка, обеспечивающего заданную разрядную характеристику. В отверстиях прокладки происходит пробой по воздушному промежутку. Электроды совместно с прокладкой прочно затянуты винтом, который закреплен в резьбе втулки, размещенной в центре головки предохранителя.

В более сложных разрядниках применяют герметичную керамическую оболочку, заполненную инертным газом, внутри которой размещены электроды из специальных материалов.

Недостатки искровых разрядников открытой конструкции – влияние окружающей среды на пробивное напряжение и низкая способность восстанавливать изоляцию искрового промежутка после пробоя. Вследствие этого возникает сопровождающий ток КЗ частотой сети.

На смену искровым пришли *вентильные разрядники*. Они обязательно имеют искровой промежуток и нелинейный резистор (варистор), включенные последовательно. Искровой промежуток обеспечивает изоляционные свойства разряднику, а нелинейный резистор – ограничение импульса тока и напряжения. Ограничение перенапряжений происходит потому, что варистор имеет следующее свойство: чем выше напряжение, прикладываемое к нему, тем ниже его сопротивление. Это дает возможность при импульсе перенапряжения и пробивании искрового промежутка пропускать большой импульс тока, а при снижении напряжения импульса – восстанавливать сопротивление и свои изоляционные свойства.

*Резисторы, изменяющие сопротивление от напряжения, получили название варисторы*. В вентильных разрядниках используются варисторы карбидокремниевые (из вилита). Основу вилита составляют зерна карбида  $SiC$  с небольшим удельным сопротивлением, около  $10^{-2}$  Ом·м. На поверхности карборундовых зерен создается

пленка оксида кремния  $SiO_2$  толщиной  $10^{-7}$  м, сопротивление которой зависит от приложенного к ней напряжения. При небольших напряжениях удельное сопротивление пленки составляет  $10^4$ – $10^6$  Ом·м. При увеличении приложенного напряжения сопротивление пленки резко уменьшается. С помощью жидкого стекла или других связующих веществ (глины, смолы) зерна карборунда прочно спекаются между собой при температуре около  $1700$  °С. Для защиты от увлажнения (вилит очень гигроскопичен) поверхность дисков покрывается изолирующей обмазкой. Торцевые поверхности дисков металлизуются и являются контактными площадками.

При прохождении через диск импульса тока большой величины, но малой длительности (десятки микросекунд) вилитовые диски не успевают нагреваться до высокой температуры. Но при прохождении даже небольших токов промышленной частоты более 10 мс температура дисков может превысить допустимую температуру и разрядник теряет свои свойства. Для дисков диаметром 100 мм предельная амплитуда составляет 10 кА при длительности импульса 40 мкс и 150 А при длительности прямоугольного импульса 2000 мкс. Такие токи диск без повреждения пропускает 20–30 раз.

Искровые промежутки вентильных разрядников образуются между двумя и более латунными электродами, установленными выступами навстречу друг другу. Латунные электроды имеют форму тарелок с отогнутыми краями. Между такими электродами по краям устанавливаются круглые миканитовые прокладки. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха значительно меньше диэлектрической проницаемости входящей в состав миканита слюды, то в приэлектродном объеме воздуха возникают высокие градиенты электрического поля, приводящие к его начальной ионизации. Образуемые электроны при перенапряжениях вызывают разряд в центре искрового промежутка. После разряда между электродами может возникнуть ток промышленной частоты, называемый сопровождающим током.

Экспериментально установлено, что одиночный искровой промежуток может отключить сопровождающий переменный ток с амплитудой 80–100 А при действующем значении напряжения 1,0–1,5 кВ за 10 мс [16].

В сельских сетях 0,4 кВ используются вентильные разрядники РВН-0,5 (Россия), ГЗа-0,66/2,5 (Польша) и другие. На рисунке 4.5 показано устройство разрядника ГЗа-0,66/2,5.

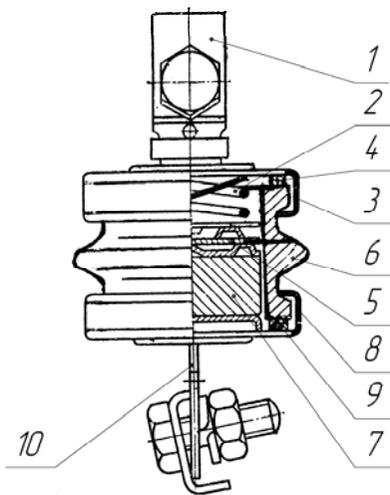


Рисунок 4.5 – Устройство вентильного разрядника ГЗа-0,66/2,5:

1 – зажим для сетевого провода; 2 – пружина; 3, 8 – верхняя и нижняя крышки; 4, 9 – прокладки из герметизирующей резины; 5 – одинарный искровой промежуток; 6 – фарфоровый корпус; 7 – нелинейный резистор; 10 – зажим заземления

Вентильный разрядник имеет зажим 1 для сетевого провода, одинарный искровой промежуток 5 и нелинейный резистор 7 в виде диска, выполненный из материала, близкого по составу к вилиту. Одинарный искровой промежуток 5 прижат к нелинейному резистору 7 пружиной 2 и находится внутри фарфорового корпуса 6. Для герметизации всех этих частей сверху и снизу установлены крышки 3 и 8 и прокладки из герметизирующей резины 4 и 9 из специальной резины. К крышкам прикреплены зажимы заземления 1 и 10.

Вентильные разрядники способны пропускать токи до 10–14 кА (при длине фронта импульса 10 мкс). Напряжение, возникающее на зажимах вентильного разрядника, при указанных условиях, определяется выражением

$$\Delta U = n A I^\alpha, \quad (4.3)$$

где  $n$  – число дисков разрядника с нелинейным сопротивлением;  
 $A$  – постоянный коэффициент, В/А;  
 $\alpha$  – показатель нелинейности,  $\alpha = 0,13-0,2$ .

Недостаток вентильных разрядников состоит в наличии искровых промежутков (в связи с этим пробивное напряжение не ниже 0,5 кВ), а также в ограниченной пропускной способности. Например, вентильные разрядники в сети 0,4 кВ имеют пропускную способность 2,5 кА при импульсе перенапряжения с характеристикой 8/20 мкс. При этом остающееся напряжение на выводах разрядника составляет 2,5–2,9 кВ. Такое остающееся напряжение приемлемо только для внешних электрических сетей.

*Ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН)* по всем показателям превосходят вентильные разрядники. Они представляют собой варисторы, изготовленные из окиси цинка ( $ZnO$ ) с добавлением оксидов других материалов с целью стабилизации их свойств. Варисторы имеют высокий коэффициент нелинейности  $\alpha = 0,04$  (против 0,13–0,2 у вилита). Благодаря этому в большей степени снижаются перенапряжения на варисторе. При номинальном напряжении через варистор протекает очень малый ток (доли мА) в связи с большим сопротивлением варистора. При перенапряжениях сопротивление падает в  $10^6$  раз. Сопровождающий ток, протекающий после пропускания импульса тока (срабатывания варистора), составляет миллиамперы. Следовательно, невелика мощность, выделенная в варисторе. Это позволяет отказаться от последовательного включения с ними искровых промежутков, ограничивающих сопровождающий ток.

Изготавливаются варисторы путем прессования из порошка  $ZnO$  с добавками и последующего спекания в виде дисков разных диаметров. Чем больше размер диска, тем на большее значение импульсного тока он рассчитан. Если диски устанавливать друг на друга, то повышается номинальное напряжение варистора. Нелинейная проводимость в варисторе обусловлена наличием потенциальных барьеров между соприкасающимися зернами. При малых напряжениях потенциальные барьеры препятствуют перемещению зарядов. При увеличении напряжения возрастает электрическое поле между зернами, и потенциальные барьеры пробиваются, следовательно, проводимость варисторов увеличивается.

Вольт-амперная характеристика ОПН на базе оксидно-цинкового варистора приведена на рисунке 4.6. Вольт-амперная характеристика оксидно-цинкового варистора имеет две ветви: положительную и отрицательную. Ветви совершенно симметричны. Вольт-амперная характеристика оксидно-цинкового варистора более нелинейная, чем варистора из карбида кремния, применяемого

в вентильных разрядниках. Благодаря этому они включаются под рабочее напряжение сети без искровых промежутков. Варисторы из  $ZnO$  реагируют на каждое изменение напряжения на своих зажимах, в то время как вентильные разрядники – только после пробоя искрового промежутка.

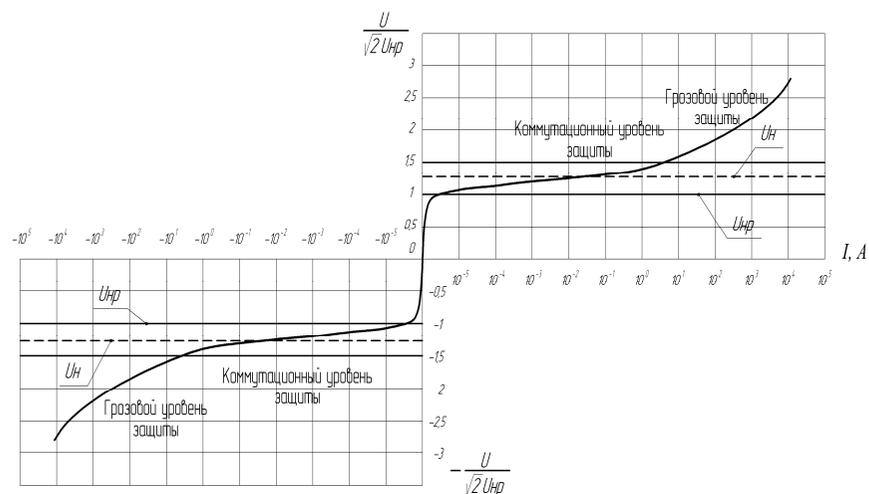


Рисунок 4.6 – Вольт-амперная характеристика ограничителей нелинейных перенапряжений типа GXO:

$U_{нр}$  – наибольшее рабочее длительное напряжение;

$U_n$  – номинальное напряжение

По сравнению с вентильными разрядниками варисторы из  $ZnO$  имеют следующие преимущества:

- 1) глубокий уровень ограничения всех видов волн перенапряжения;
- 2) отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения;
- 3) стабильность характеристик в широком диапазоне температур и устойчивость к старению;
- 4) способность к рассеиванию больших энергий (импульсный ток до 100 кА);
- 5) прямое подключение к защищаемой сети без искровых промежутков;
- 6) простота конструкции;
- 7) малые габариты и вес, стойкость к атмосферным загрязнениям и к вибрации.

Благодаря указанным преимуществам ОПН широко применяются в воздушных линиях электропередач, вытесняя искровые и вентильные разрядники. В Беларуси используются ОПН, производимые в Польше (фирма ZWAR), в России (ПТО «Фарфор», АО «Феникс», ЗАО «ЗЭ-ТО»), на Украине («Таврида Электрик») и в других странах.

На рисунке 4.7 изображен ограничитель перенапряжения типа GXO (Польша) [39].

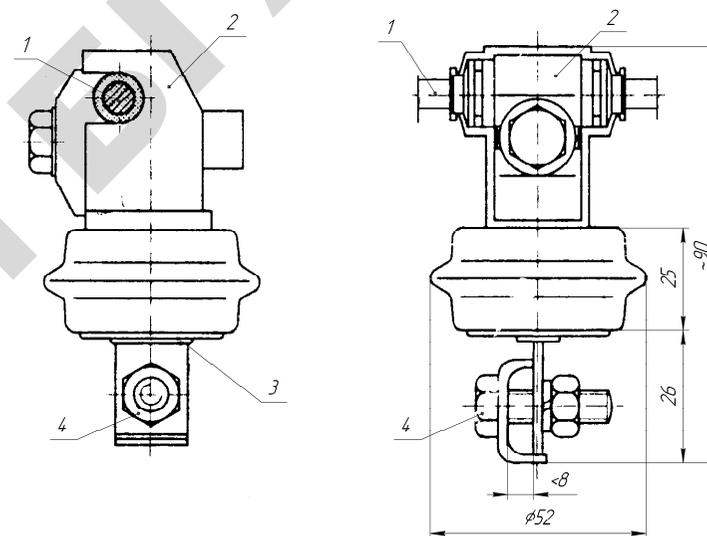


Рисунок 4.7 – Ограничитель перенапряжений типа GXO с линейным изолированным зажимом, пробивающим изоляцию изолированного провода линии:

1 – изолированный провод линии; 2 – линейный изолированный зажим; 3 – термический разъединитель; 4 – зажим заземления (болт  $M8 \times 25$ )

Он содержит линейный изолированный зажим 2, пробивающий изоляцию изолированного провода сечением  $1,5\text{--}50\text{ мм}^2$ , зажим заземления 4 (болт  $M8 \times 25$ ) и термический разъединитель 3. Термический разъединитель 3 предназначен для визуальной сигнализации повреждения ограничителя. Ток КЗ, протекающий через поврежденный варистор, вызывает его нагрев и отпаивание линейного изолированного зажима 2, который отбрасывается вместе с заземляющим проводом от ограничителя посредством пружины, размещенной в корпусе из синтетической смолы. Их основные параметры и технические данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры и технические данные ограничителей перенапряжения GXO (Польша, фирма ZWAR)

Тип ограничителя	Напряжение долговременной работы, $U_c$ , В	Номинальное напряжение ограничителя, $U_o$ , В	Остающееся напряжение (В) при пиковом значении тока разряда							
			50 А	100 А	200 А	540 А	2,5 кА	5 кА	10 кА	5 кА
			8/20 мкс	8/20 мкс	8/20 мкс	8/20 мкс	8/20 мкс	8/20 мкс	8/20 мкс	1/5 мкс
GXO-0,28/5	280	350	680	700	740	780	1040	1150	1290	1320
GXO-0,5/5	500	625	1215	1250	1320	1390	1845	2050	2300	2350
GXO-0,66/5	660	825	1600	1650	1740	1830	2430	2700	3030	3090

**Примечания:**  
 1. Номинальный ток разряда при импульсе 8/20 мкс – 5 кА.  
 2. Предельный разрядный ток при импульсе 4/10 мкс – 40 кА.  
 3. Прочность (на долговременные токовые удары прямоугольной формы с продолжительностью 2000 мкс) – 150 кА.  
 4. Способность к поглощению энергии – 1,5 кДж.  
 5. Расшифровка обозначения GXO –  $X_1/5$ :  
 GXO – тип ограничителя перенапряжения до 1 кВ;  
 $X_1$  – напряжение долговременной работы, В;  
 5 – номинальный разрядный ток, кА.

При другом варианте установки ограничителя перенапряжений типа GXO, например, на заземленном кронштейне, может произойти отбрасывание всего ограничителя от закрепленного зажима.

Ограничители перенапряжения GXO выпускаются также без термического разъединителя, с линейным изолированным зажимом 2 (рисунок 4.7) для голых проводов воздушной линии. В третьем исполнении вместо линейного зажима используются провода сечением 16 мм<sup>2</sup> и длиной около 600 мм. Ограничители перенапряжения типа GXO пригодны для наружной и внутренней установки.

Ограничитель перенапряжения типа ОПН-Н/TEL предназначен для сетей 380 и 660 В [40]. Варистор заключен между контактными фланцами и помещен в корпус из полимерного материала. Корпус обеспечивает заданную механическую прочность и герметичность готового изделия.

Для крепления ограничителя перенапряжения к фазному проводу и заземлению на фланцах предусмотрены отверстия М10. Ограничитель перенапряжений имеет малые габариты и вес. Он может

крепиться в любом положении в пространстве болтами (шпильками). Ограничитель перенапряжения типа ОПН-Н/TEL имеет номинальный разрядный ток 10 кА при импульсе 8/20 мкс, максимальный ток 100 кА при грозовом импульсе 4/10 мкс, ток 450 А при импульсе 2000 мкс, наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение 400 В (ОПН-Н/TEL 0,4/0,4 УХЛ2) и 450 В (ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2).

Для электрических сетей 0,4 кВ и трансформаторных подстанций взамен вентильных разрядников типа РВН-0,5МНУ1 предназначены ограничители перенапряжения ОПН-П1 ЗАО «ЗЭТО» (г. Великие Луки, Россия) [41]. Они расшифровываются как ограничители перенапряжений нелинейные с полимерной (пластмассовой) изоляцией (рисунок 4.8).

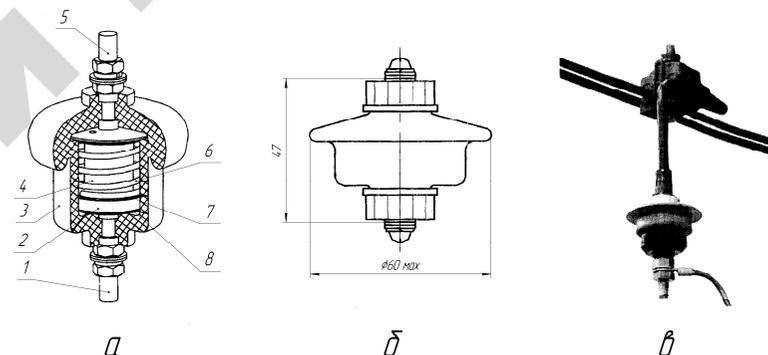


Рисунок 4.8 – Конструкция ОПН-П1-0,38УХЛ1 первой модели (а), общий вид ОПН-П1-0,38УХЛ1 второй модели (б), вариант крепления ОПН на проводниках воздушной линии (в): 1, 5 – выводы; 2 – варистор; 3 – корпус; 4 – ленточный проводник; 6 – пружина; 7, 8 – контактная шайба

Внутри пластмассового корпуса 3 находится варистор 2. К контактной шайбе 8 подводится вывод 1, а к шайбе 7 через ленточный проводник 4 – вывод 5. Варистор прижат пружинкой 6.

На рисунке 4.8, б показана вторая модель ограничителя перенапряжения ОПН-П1. Она отличается от первой модели меньшими габаритами.

Важное значение в системе грозозащиты воздушной линии 0,4 кВ имеют *грозозащитные заземления*. Грозозащитные заземления на ВЛ – 0,4 кВ для условий Беларуси (число грозовых часов в году не более 40) должны выполняться через 100–120 м и иметь сопротивление не более 30 Ом.

Грозозащитные заземления должны выполняться:

– на опорах с ответвлениями к вводам в помещения, в которых может быть сосредоточено большое количество людей (школы, ясли, больницы и т. п.), или в помещения, представляющих большую хозяйственную ценность (животноводческие помещения, склады, мастерские и т. п.);

– на конечных опорах линий, имеющих ответвления к вводам;

– за 50 м до конца линии, на предпоследней опоре;

– на опорах в створе пересечения с воздушными линиями более высокого напряжения.

Ввод в здание воздушных линий электропередачи напряжением до 1 кВ, сетей телефона, радио, сигнализации должен осуществляться кабелями с металлической броней или оболочкой или кабелями, проложенными в металлических трубах. В местах перехода воздушной линии 0,4 кВ в кабель металлические броня и оболочка кабеля, а также кронштейны изоляторов воздушной линии этой и ближайшей опоры должны быть присоединены к заземлителю.

Кроме того, в местах перехода воздушной линии 0,4 кВ в кабель между каждой жилой кабеля и заземленными элементами должны быть установлены вентильные разрядники низкого напряжения или ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН) [37]. Вариант защиты электроприемников здания от прямых ударов молнии и внешних импульсных перенапряжений изображен на рисунке 4.9.

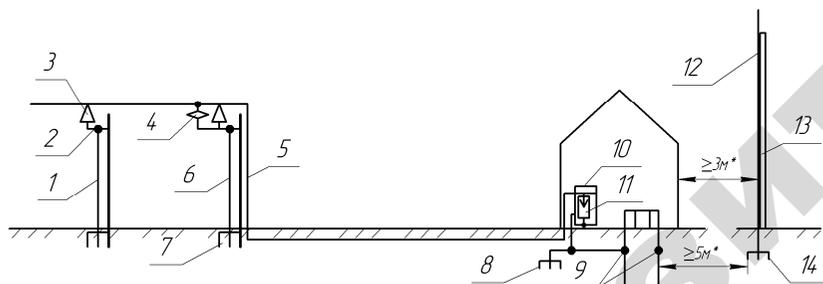


Рисунок 4.9 – Вариант защиты электроприемников здания от прямых ударов молнии и внешних импульсных перенапряжений:

1, 6, 12 – токоотводы; 2 – крюк изолятора (кронштейн); 3 – изолятор; 4 – ОПН (ограничитель перенапряжений нелинейный); 5 – кабель с защитной оболочкой или в трубе длиной  $\geq 50$  м; 7, 14 – заземлитель грозозащиты; 8 – заземлитель искусственный на вводе в здание; 9 – заземлитель естественный (трубопровод воды и т. д.); 10 – вводно-распределительное устройство здания; 11 – УЗИП; 13 – опора молниеотвода

\*Только для категории I молниезащиты (для других категорий молниезащиты расстояния не нормируются, а заземлитель 11 соединяется с заземлителями 9 и 8) [37]

Для исключения заноса высокого потенциала в защищаемое здание по подземным металлическим конструкциям (в том числе по электрическим кабелям любого назначения) заземлитель защиты от прямых ударов молнии в этом варианте должен быть максимально удален от них (не ближе 5 м). Металлические оболочки кабелей и трубы коммуникации должны быть соединены с железобетонным фундаментом здания или с искусственным заземлителем [37].

При устройстве молниезащиты на здании заземлитель грозозащиты соединяется с искусственным заземлителем ввода.

В [11] указано, что при воздушном вводе в жилье, в общественных и другие здания должны устанавливаться ограничители импульсных перенапряжений. В связи с внедрением электронных счетчиков установка их актуальна.

#### 4.3. Средства защиты электроустановок зданий и сооружений от импульсных перенапряжений

Средства защиты электроустановок зданий от импульсных перенапряжений – разрядники различных типов и оксидно-цинковые варисторы. Согласно ГОСТ Р 51992-2002 (МЭК 61643-1-98) средства защиты от импульсных перенапряжений получили название УЗИП (устройства защиты от импульсных перенапряжений).

По определению ГОСТ Р 51992-2002 *устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП)* – это устройство, которое предназначено для ограничения переходных перенапряжений и для отвода импульсов тока. Это устройство содержит, по крайней мере, один нелинейный элемент [42].

Различают УЗИП коммутирующего, ограничивающего и комбинированного типов.

*УЗИП коммутирующего типа* в отсутствие перенапряжения сохраняет высокое полное сопротивление, но может мгновенно изменять его на низкое сопротивление в ответ на скачок напряжения. К ним относятся воздушные и газовые разрядники (рисунок 4.10, а, б, в). Их часто называют молниеразрядниками или разрядниками грозовой защиты.

*УЗИП ограничивающего типа* в отсутствие перенапряжения сохраняет высокое полное сопротивление, но постепенно снижает его с возрастанием волны тока и напряжения. К ним относятся

варисторы и диодные разрядники. Такие УЗИП иногда называются ограничителями напряжения [42].

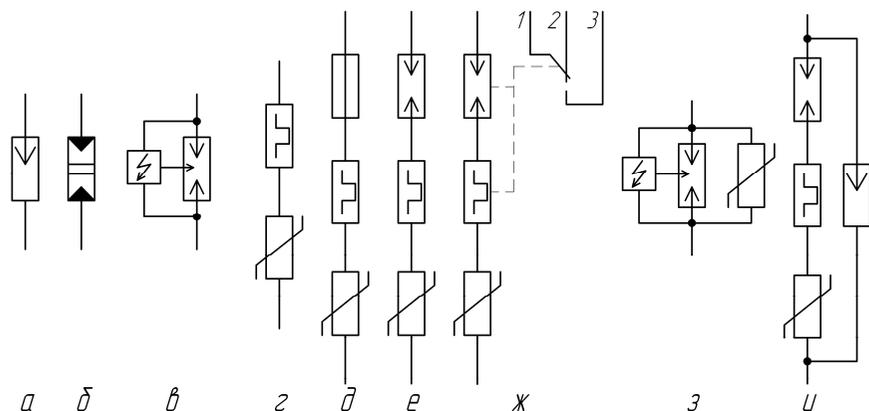


Рисунок 4.10 – Условное обозначение УЗИП:

*а* – разрядник грозовой защиты; *б* – искровой разрядник суммарного тока для установки между нулевым защитным проводником (N) и защитным проводником (PE); *в* – управляемый искровой разрядник; *г* – варистор с тепловым разделителем; *д* – варистор с тепловым и динамическим разделителями; *е* – вентильный разрядник с тепловым разделителем; *ж* – то же, но с контактами сигнализации; *з* – комбинированный из двух блоков УЗИП (управляемый искровой разрядник и параллельно включенный варисторный блок); *и* – комбинированный из двух блоков УЗИП (вентильный разрядник и параллельно включенный искровой разрядник)

УЗИП комбинированного типа содержит элементы как коммутирующего, так и ограничивающего типов (рисунок 4.10, *ж*). Такие УЗИП могут коммутировать и ограничивать напряжение, а также выполнять обе функции; их действие зависит от характеристик подаваемого напряжения. Встречаются УЗИП, составленные из двух отдельных блоков (рисунок 4.10, *з*).

УЗИП типа искрового разрядника имеет простую конструкцию. В термостойком (обычно керамическом) корпусе закреплены специальные электроды, образующие искровой воздушный промежуток. Электроды имеют специальную форму, способствующую выходу ионизированных газов в одну сторону.

Основной недостаток такой конструкции состоит в том, что при пробивании воздушного промежутка может возникнуть режим КЗ в питающей сети и сопровождающий ток. Конструкция

искрового разрядника должна способствовать быстрому прерыванию этого тока. В корпусе разрядника должны быть отверстия для выхода ионизированного газа. Сопровождающий ток может вызвать срабатывание элементов релейной защиты и отключение установки или линии.

Более совершенны искровые разрядники, имеющие закрытый керамический корпус, заполненный инертным газом. В более сложных и наукоемких УЗИП коммутирующего типа искровой промежуток может быть разделен на несколько участков. Например, в искровых разрядниках Lightning Gontroller фирмы OBO BETTERMANN (Германия) искровой промежуток разделен на девять участков, образованных девятью высокопрочными графитовыми пластинами. Термостойкие фторопластовые шайбы обеспечивают строго определенную длину каждого из участков. Точная фиксация элементов искрового промежутка обеспечивается системой механического крепления ножевых контактов, изготовленных из цинкового литья. Такой разрядник называется *управляемым разрядником*. Применяется управление дугой разрядного тока. Восемь из девяти искровых промежутков имеют контакт с платой управления, чем и обеспечивается строго определенное импульсное напряжение срабатывания, меньшее или равное 2 кВ.

Одно из преимуществ такого разрядника состоит в том, что их корпус полностью закрыт и не имеет выхлопных отверстий. Этим предотвращается выброс раскаленных газов, имеющий место в обычных воздушных разрядниках.

Второе преимущество управляемого разрядника состоит в высокой удельной мощности и способности гасить сопровождающий ток до 25 кА. Эта особенность позволяет устанавливать их без дополнительного внешнего предохранителя в распределительных щитах на вводе в здание [43].

Немецкая компания DEHN+SOHNE разработала трехэлектродный искровой разрядник [44]. Этот разрядник отличается высоким максимальным импульсным током (100 кА при импульсе 10/350 мкс) и низким напряжением уровня защиты ( $U_p = 1,5$  кВ). Это позволяет включать электрооборудование, чувствительное к напряжениям, непосредственно после разрядника без необходимости дополнительных ступеней защиты. В основе быстрого действия разрядника лежит радиальное и осевое воздействие на электрическую дугу, возникающую при пробое воздушного проме-

жутка. При этом происходит ограничение сопровождающего тока за время существенно меньшее, чем время срабатывания предохранителя во входной цепи. Таким образом, можно эффективно ограничивать токи до 50 кА. При этом не происходит перегорание плавкой вставки 20 А предохранителя. Такие разрядники используются для защиты от импульсных перенапряжений электронных счетчиков электроэнергии на вводах в жилые здания.

Известны также более простые управляемые разрядники: открытые (имеющие дополнительные дугогасительные пластины в корпусе) и закрытые (герметичные). Напряжение срабатывания их может быть существенно понижено с помощью подачи управляющего импульса зажигания от электронной схемы (триггера). Таким образом, получается высокая импульсная пропускная способность разрядника при одновременном достижении низкого уровня остаточного напряжения или напряжения срабатывания.

С применением управляемых грозозащитных разрядников появилась возможность непосредственного параллельного включения искрового управляемого разрядника и варистора. Такие изделия получили название *комбинированных УЗИП*. В комбинированных разрядниках автоматически контролируется напряжение на варисторе (во время разряда) до его остающегося напряжения. Если оно превышает некоторый уровень <900 В (или <1500 В, или <2500 В), то электронная схема зажигает разряд в искровом разряднике, который включается параллельно варистору. Теперь грозовой ток течет через варистор и искровой разрядник, отчего варистор разгружается от тока и служит дольше.

УЗИП на базе грозоразрядников выпускаются многими производителями с индикатором функционирования. Этот индикатор сигнализирует о готовности электронной схемы зажигания и является дополнительным элементом контроля работы разрядника.

Встречаются в УЗИП системы сигнализации выхода их из строя на базе переключающих контактов, блока звуковой или световой сигнализации.

*УЗИП варисторного типа* изготавливаются на базе оксидно-цинковых варисторов (см. описание в п. 4.2). Их выпускают более 20 производителей Западной Европы и России. Среди них известные фирмы Германии (DEHN, OBO BETTERMANN, PHOENIX CONTACT), Словении (EZETEK), России (ИЭК).

В России компанией «ИЭК» выпускаются ограничители напряжения силовые (ОПС1) классов 1(B), 2(C) и 3(D) для внутренних установок зданий и сооружений на базе оксидно-цинкового варистора со сменными модулями защиты и визуальным механическим указателем степени «износа» варистора [9]. Технические данные УЗИП типа ОПС1 приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики ОПС1

Технические характеристики	ОПС1 В(I)	ОПС1 С(II)	ОПС1 D(III)
Номинальное рабочее напряжение (наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение), В	400	400	230
Максимальное напряжение, В	440	440	250
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	30	20	5
Максимальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	60	40	10
Уровень напряжения защиты, не более, кВ	2,0	1,8	1,0
Классификационное напряжение, В	700	650	530
Время реакции, не более, нс	25	25	25
Количество полюсов	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4	1, 2
Условия эксплуатации	УХЛ 4	УХЛ 4	УХЛ 4
Сечение присоединяемых проводов, мм <sup>2</sup>	25	25	25

Варисторные ограничители перенапряжений типа ОПС1 имеют модульное исполнение. Конструктивно состоят из основания (корпуса) с присоединительными зажимами и пластины с резьбовым отверстием для присоединения заземляющего проводника. Средняя часть корпуса имеет прямоугольный вырез, в который по направляющим вставляется варисторный сменный модуль. Модуль имеет боковые пластинчатые выводы, входящие в контакт с внутренней частью присоединительных зажимов. Внутри корпуса модуля расположен варистор и простейший механизм указателя степени «износа» варистора.

Металлооксидный варистор, применяемый в модуле, содержит 90 % окиси цинка, смешанной с керамической основой, и до 10 % добавок для получения специальных запирающих свойств. Он обладает свойством практически мгновенно снижать свое сопротивление в тысячи раз при появлении на его выводах напряжения, превышающего предельно допустимую величину. Благодаря размерам и массе варистор способен при грозовом разряде рассеять значительную энергию.

Электрические схемы включения ОПС1 изображены на рисунке 4.11, а внешний вид и конструкция ОПС1 – на рисунке 4.12.

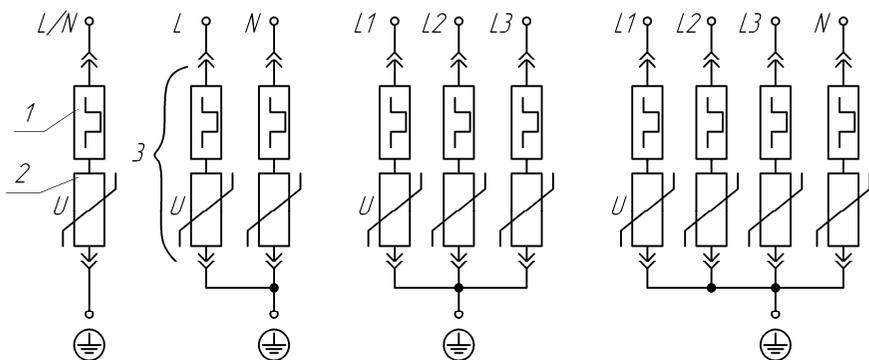


Рисунок 4.11 – Электрические схемы УЗИП типа ОПС1:  
1 – встроенное тепловое инерционное устройство расцепления;  
2 – варистор; 3 – сменный защитный модуль

ОПС1 имеют следующие особенности и преимущества:

- модульное исполнение со стандартными размерами и установкой на DIN-рейку;
- встроенное тепловое инерционное устройство расцепления для защиты от перегрева варисторного элемента;
- сменный защитный элемент (варисторный модуль);
- визуальный указатель «износа» сменного защитного элемента;
- насечки на контактных зажимах предотвращают перегрев и оплавление проводов за счет более плотного и большего по площади контакта. При этом снижается переходное сопротивление контакта и, как следствие, потери и нагрев соединения. Кроме того, увеличивается механическая устойчивость соединения.

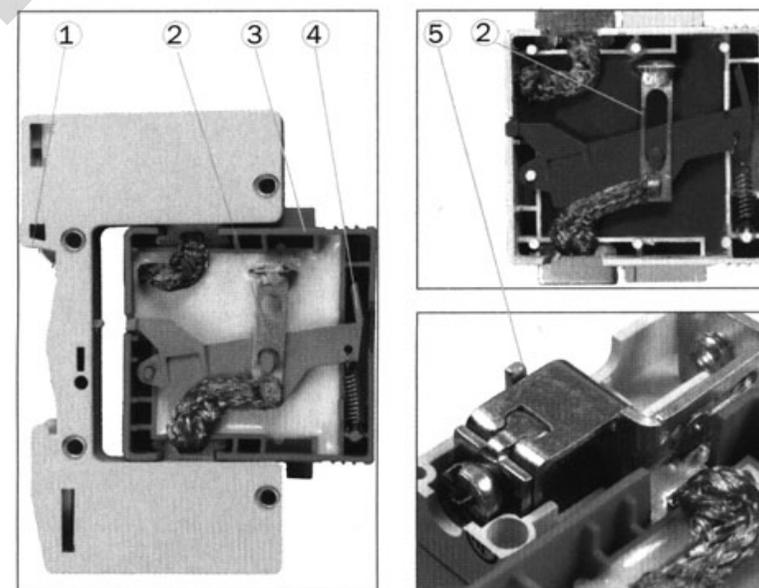
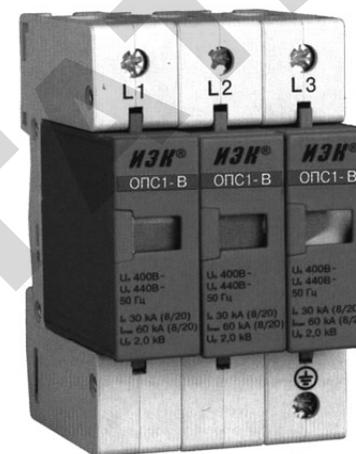


Рисунок 4.12 – Ограничитель импульсных перенапряжений ОПС1:  
1 – модульное исполнение; 2 – встроенный предохранитель;  
3 – сменный защитный элемент; 4 – указатель «износа» защитного элемента;  
5 – насечки на контактных зажимах

#### 4.4. Стойкость изоляции электрооборудования к импульсным перенапряжениям и классы УЗИП

ГОСТ Р 50571.19 вводит понятие импульсного выдерживаемого напряжения, требуемого для оборудования. *Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение* – импульсное выдерживаемое напряжение, установленное изготовителем для оборудования или его части, которое характеризует указанную способность его изоляции к сопротивлению от перенапряжений [45].

Электрооборудование по способности его изоляции выдерживать периодически возникающее импульсное напряжение во время грозовых или коммутационных перенапряжений разделяют на четыре категории перенапряжений (категории импульсных выдерживаемых напряжений).

*Оборудование категории I* – специальное оборудование, которое, будучи присоединено к существующим электроустановкам зданий, нуждается в дополнительных устройствах защиты от импульсных перенапряжений. Эти УЗИП могут быть встроены в оборудование категории I или расположены между этим оборудованием и остальной частью электроустановки. Пример такого оборудования – персональные компьютеры, которые подключены к питающей сети через удлинители со встроенными УЗИП.

*Оборудование категории II* – оборудование, которое присоединяется к существующим электроустановкам зданий посредством штепсельных розеток и других аналогичных соединителей. Примеры такого оборудования – бытовые электроприборы, радиоэлектронные приборы, переносной инструмент.

*Оборудование категории III* – оборудование, установленное внутри зданий, которое составляет часть конкретной электроустановки здания и доступно для обычных лиц и необученного персонала. Примеры такого оборудования – распределительные пункты, щиты, силовые кабели, выключатели и розетки, электроплиты, стационарно подключенные электродвигатели.

*Оборудование категории IV* – оборудование, установленное вблизи от электроустановок зданий (внутри или снаружи) перед главным распределительным щитом, которым может быть вводно-распределительное устройство для многоэтажных или производственных зданий, или квартирный щиток для индивидуальных зданий. Примеры такого оборудования – электрические счетчики, первичные аппараты защиты от сверхтоков, УЗИП, размещенные

во вводных устройствах и доступные только квалифицированному персоналу.

Категории перенапряжений характеризуют различную степень пригодности электрооборудования с точки зрения его длительной эксплуатации и допустимого риска отказов при импульсных перенапряжениях. В таблице 4.3 приведено номинальное импульсное выдерживаемое напряжение, установленное для различных категорий перенапряжений для трехфазных систем напряжением 380/220 В.

Таблица 4.3 – Номинальные импульсные выдерживаемые напряжения для различных категорий стойкости к перенапряжениям

Параметры	Значения			
	IV	III	II	I
Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение, кВ	6,0	4,0	2,5	1,5

Принцип зонной защиты от воздействия молнии состоит в следующем: пространство, в котором расположены электрические и электронные системы, должно быть разделено на зоны различной степени защиты. Зоны характеризуются существенным изменением электромагнитных параметров на границах зон. В общем случае чем выше номер зоны, тем меньше значения параметров электромагнитных полей, токов и напряжений в пространстве зоны [36].

*Зона 0* – зона, где каждый объект подвержен прямому удару молнии, и поэтому через него может протекать полный ток молнии. В этой области электромагнитное поле имеет максимальное значение.

*Зона 0<sub>E</sub>* – зона, где объекты не подвержены прямому удару молнии, но электромагнитное поле не ослаблено и также имеет максимальное значение. Зона 0<sub>E</sub> находится под защитным действием молниеотвода.

*Зона 1* – зона, где объекты не подвержены прямому удару молнии, и ток во всех проводящих элементах внутри зоны меньше, чем в зоне 0<sub>E</sub>; в этой зоне электромагнитное поле может быть ослаблено экранированием.

*Прочие зоны* – эти зоны устанавливаются, если требуется дальнейшее уменьшение тока или ослабление электромагнитного поля; требования к параметрам зон определяются в соответствии с требованиями к защите различных зон объекта.

Общие принципы разделения защищаемого пространства на зоны молниезащиты показаны на рисунке 4.13.

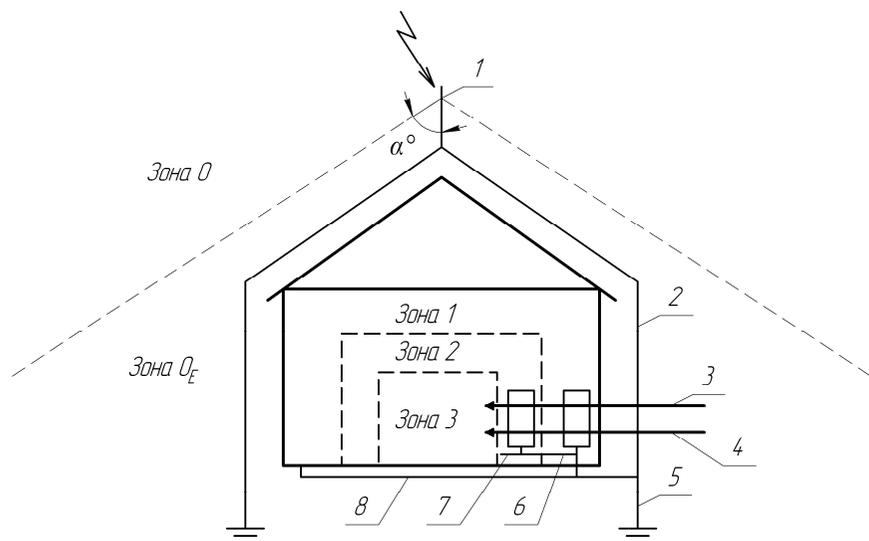


Рисунок 4.13 – Пример разделения защищаемого объекта на несколько зон:  
1 – молниеприемник; 2 – токоотвод; 3 – кабель электропитания; 4 – телекоммуникационный кабель; 5 – заземлитель; 6 – главная заземляющая шина; 7 – шина уравнивания потенциалов; 8 – проводники системы уравнивания потенциалов

УЗИП, в зависимости от места установки и способности пропускать через себя различные импульсные токи, делятся на классы I, II, III (или B, C, D).

Защитные устройства класса I устанавливаются на вводе в здание (во вводном щите, ГРЩ или же специальном боксе) после плавких предохранителей (на границе Зоны 0 и Зоны 1).

Защитные устройства класса II устанавливаются во вторичных распределительных щитах. Например, в этажных или других щитах, в НКУ (низковольтных комплектных устройствах). Желательно размещать их до групповых плавких предохранителей или автоматических выключателей. Точка размещения этого класса устройств может находиться на границе Зоны 1 и Зоны 2. Возможно размещение этих устройств в Зоне 1 вместе с устройствами класса I.

Назначение УЗИП разных классов изложено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Назначение УЗИП различных классов

Класс УЗИП*	Назначение УЗИП
I (B)	Предназначены для защиты от прямых ударов молнии в систему молниезащиты здания (объекта) или воздушную линию электропередач (ЛЭП). Устанавливаются на вводе в здание во вводно-распределительном устройстве (ВРУ) или главном распределительном щите (ГРЩ). Нормируются импульсным током $I_{imp}$ с формой волны 10/350 мкс
II (C)	Предназначены для защиты токораспределительной сети объекта от коммутационных помех или как вторая ступень защиты при ударе молнии. Устанавливаются в распределительные щиты. Нормируются импульсным током с формой волны 8/20 мкс
III (D)	Предназначены для защиты потребителей от остаточных бросков напряжений, защиты от дифференциальных (несимметричных) перенапряжений (например, между фазой и нулевым рабочим проводником в системе TN-S), фильтрации высокочастотных помех. Устанавливаются непосредственно возле потребителя. Могут иметь самую разнообразную конструкцию (в виде розеток, сетевых вилок, отдельных модулей для установки на DIN-рейку или навесным монтажом). Нормируются импульсным током с формой волны 8/20 мкс
*Буквенные обозначения класса устройств не рекомендуется применять.	

Защитные устройства класса III могут устанавливаться в НКУ или непосредственно возле потребителя (защитная Зона 3). При расстояниях более 10–15 метров от места установки УЗИП до потребителя желательно установить дополнительно УЗИП класса III в непосредственной близости от защищаемого оборудования, чтобы гарантированно устранить возможные наводки на указанных длинах кабеля [38].

Существует взаимосвязь между зонами молниезащиты, классами защитных устройств и категориями стойкости изоляции оборудования к импульсным перенапряжениям (рисунок 4.14).

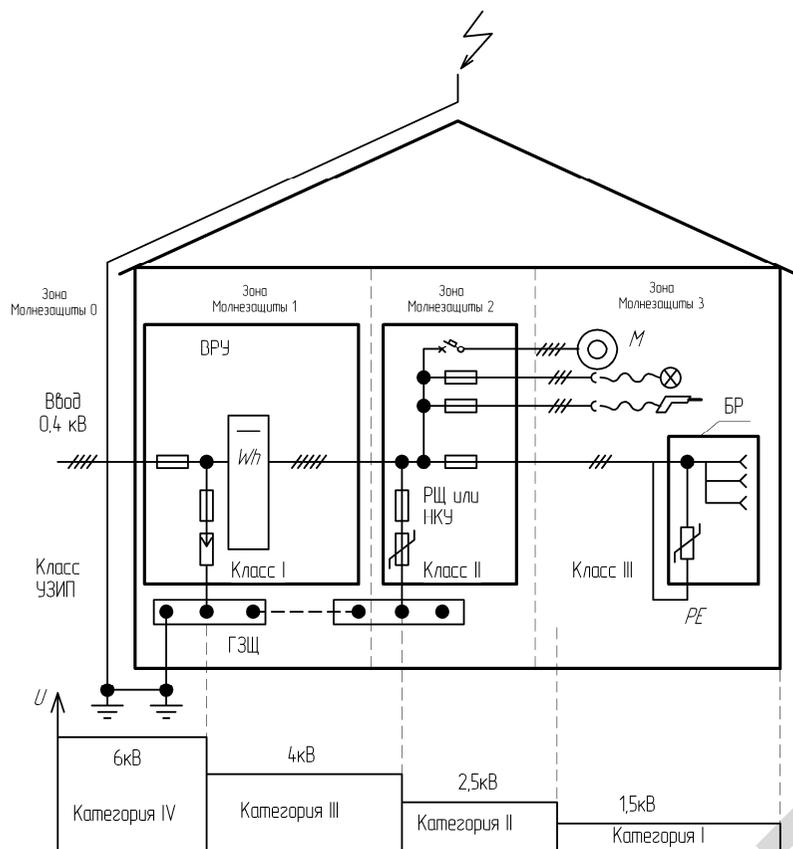


Рисунок 4.14 – Взаимосвязь между зонами молниезащиты, классами защитных устройств и категориями стойкости изоляции к перенапряжениям:  
 ВРУ – вводно-распределительное устройство; РЩ – распределительный щит;  
 НКУ – низковольтное комплектное устройство;  
 БР – блок розеток с встроенным УЗИП

#### 4.5. Основные параметры и характеристики УЗИП

УЗИП характеризуются параметрами, которые указывают заводы-изготовители в их паспорте. Ниже приведены эти параметры.

**Номинальное рабочее напряжение  $U_n$**  – это номинальное действующее напряжение сети, для работы в которой предназначено устройство.

**Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение (максимальное рабочее напряжение) защитного устройства  $U_c$**  – это наибольшее действующее значение напряжения переменного или постоянного тока, которое может длительно (в течении всего срока службы) приложено к выводам защитного устройства.

**Номинальный импульсный разрядный ток  $I_n$**  – пиковое значение испытательного импульса тока формы 8/20 мкс, проходящего через защитное устройство. Ток данной величины защитное устройство может выдерживать многократно. Используется для испытания УЗИП класса II. При воздействии данного импульса определяется уровень защиты устройства. По этому параметру также производится координация других характеристик УЗИП, а также норм и методов его испытаний. На рисунке 4.15 изображен импульс тока формой 8/20 мкс.

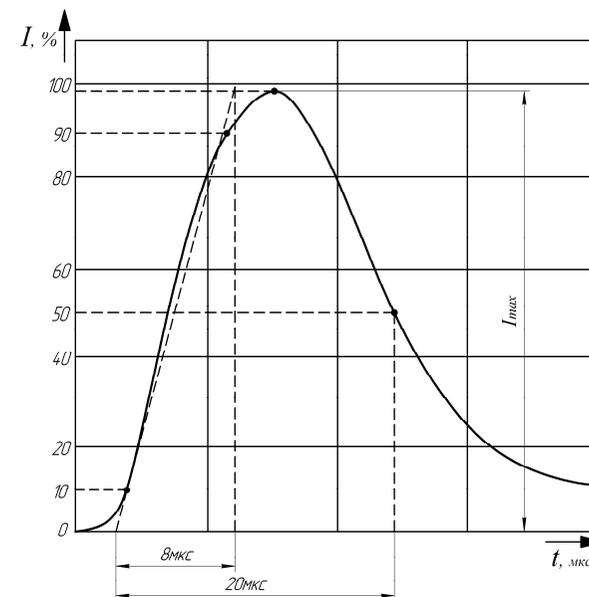


Рисунок 4.15 – Форма испытательного импульса 8/20 мкс

Из рисунка 4.14 видно, что в течение примерно 8 мкс ток возрастает, а через 20 мкс от начала импульса уменьшается до половины амплитудного значения.

**Максимальный импульсный разрядный ток  $I_{max}$**  – пиковое значение испытательного импульса тока формы 8/20 мкс, которое за-

щитное устройство может пропустить один раз и не выйти из строя. Используется для испытания УЗИП класса II.

*Сопровождающий ток  $I_f$*  (параметр для УЗИП на базе разрядников) – это ток, который протекает через разрядник после окончания импульса перенапряжения и поддерживается самим источником тока, т. е. электроэнергетической системой. Фактическое значение этого тока стремится к расчетному току короткого замыкания (в точке установки разрядника для данной конкретной электроустановки). Поэтому для установки в цепи «L–N; L–PE» нельзя применять газонаполненные и другие разрядники со значением  $I_f$ , равным 100–400 А. В результате длительного воздействия сопровождающего тока они будут повреждены и могут вызвать пожар. Для установки в данную цепь необходимо применять разрядники со значением  $I_f$ , превышающим расчетный ток короткого замыкания, т. е. величиной 2–3 кА и выше [38].

*Импульсный ток  $I_{imp}$* . Этот ток определяется пиковым значением  $I_{peak}$  испытательного импульса длительностью 10/350 мкс и зарядом  $Q$ . Применяется для испытания защитных устройств класса I.

*Уровень напряжения защиты  $U_p$*  – это максимальное значение падения напряжения на защитном устройстве при протекании через него импульсного тока разряда. Параметр характеризует способность устройства ограничивать появляющиеся на его клеммах перенапряжения. Обычно определяется при протекании номинального разрядного тока  $I_n$ .

*Время срабатывания*. Для оксидно-цинковых варисторов его значение обычно не превышает 25 нс. Для разрядников разной конструкции время срабатывания может находиться в пределах от 100 наносекунд до нескольких микросекунд.

*Остающееся напряжение  $U_{res}$*  – это пиковое значение напряжения, появляющиеся на выводах УЗИП вследствие прохождения разрядного тока. Параметр, характеризующий УЗИП в части ограничения перенапряжения на его выводах. Данное значения должно быть наибольшее из измеренных ограниченных напряжений. Крутые импульсы тока, характерные для прямого удара молнии, вызывают наибольшие остающиеся напряжения, коммутационные перенапряжения – наименьшие остающиеся напряжения. Чем ниже остающееся напряжение при одном и том же токе, тем лучшими защитными свойствами обладает УЗИП.

*Классификационное напряжение* (параметр для варисторных ограничителей импульсных перенапряжений) – это действующее значение напряжения промышленной частоты, которое прикладывается к варисторному ограничителю при классификационном токе 1,0 мА (иногда значение классификационного тока принимается 1,5 мА).

На рисунке 4.16 определены классификационные напряжения УЗИП типа ОПС1.

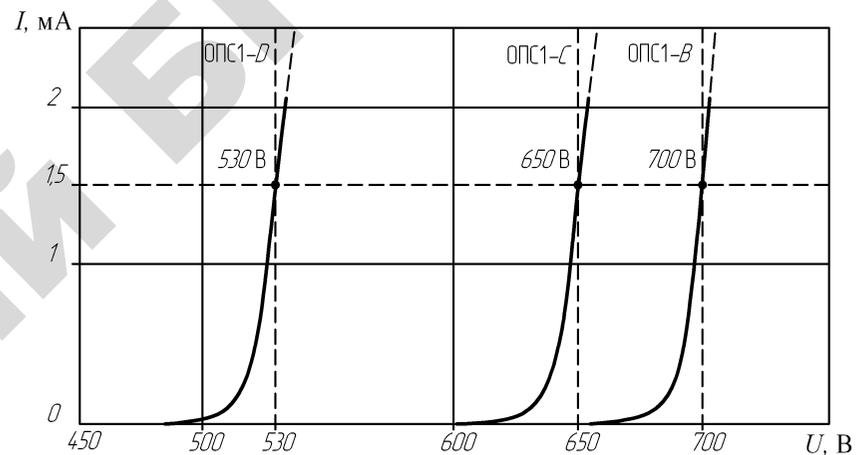


Рисунок 4.16 – Вольт-амперные характеристики ограничителей импульсных перенапряжений ОПС1 при положительной волне напряжений

Особенностью вольт-амперной характеристики варистора является наличие участков малых токов (условно от 0 до 1,0–1,5 мА), в котором находится рабочая точка варистора, и участка больших токов (до тысяч ампер), который в ряде случаев называют туннельным участком. Туннельный участок во многом определяет защитные свойства и, в частности, остающееся напряжение и уровень защиты.

Существует ряд других параметров, которые тоже учитываются при выборе устройств защиты от перенапряжения: ток утечки (для варисторов); максимальная энергия, выделяемая на варисторе; ток срабатывания предохранителей (для защитных устройств со встроенными предохранителями) и т. д.

#### 4.6. Принципиальные электрические схемы включения УЗИП

ГОСТ Р 51992-2002 определяет, что защитный элемент УЗИП может подсоединяться между фазами, или между фазой и землей, или между фазой и нейтралью, или между нейтралью и землей, или в любой из перечисленных комбинаций.

Известны две основные схемы включения УЗИП (рисунок 4.17).

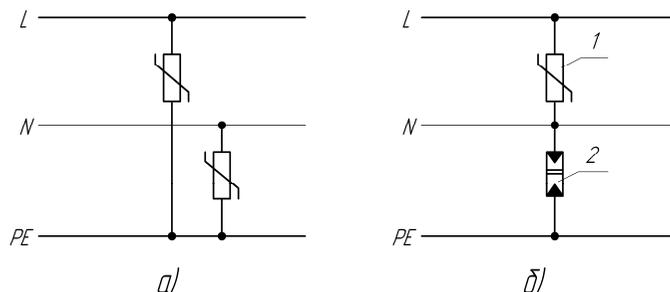


Рисунок 4.17 – Схема включения УЗИП для защиты от синфазных (продольных) (а) и противофазных (поперечных) перенапряжений (б): 1 – УЗИП на базе варистора; 2 – УЗИП на базе разрядника суммарного тока

Схема рисунка 4.17, а предназначена, в первую очередь, для защиты от синфазных (продольных) перенапряжений между проводом и землей, а схема рисунка 4.17, б – для защиты от противофазных (поперечных) напряжений провод–провод.

Наиболее опасны для защищаемого оборудования противофазные (поперечные) перенапряжения (на клеммах электроприемников  $L/N$ ) по сравнению с продольными перенапряжениями (на клеммах электроприемников  $L/PE$  и  $N/PE$ ).

На рисунке 4.18 представлена схема включения УЗИП в сети  $TN-C-S$ . Молниеразрядник типа 1 (ранее класс требований В) используется в каждой фазе.

В [43] рекомендуется использовать молниеразрядник MC 50-B/VDE фирмы OBO BETTERMANN. Он является многократным искровым разрядником закрытого типа, что позволяет полностью избежать искровых выбросов вне корпуса устройства. Предназначен для отвода мощного импульсивного тока 50 кА при импульсе 10/350 мкс. Имеет уровень защиты менее 2 кВ и отключающую способность сопровождающего тока 12,5 кА.

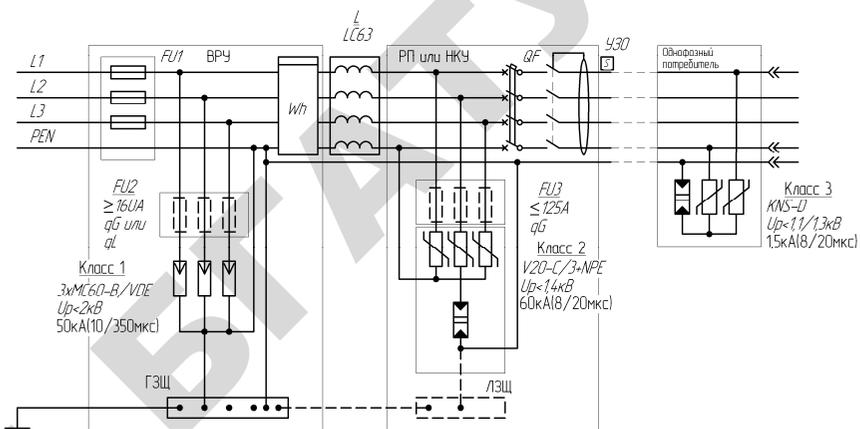


Рисунок 4.18 – Вариант включения УЗИП фирмы OBO BETTERMANN в сети  $TN-C-S$ :

ГЗШ – главная заземляющая шина; ЛЗШ – локальная заземляющая шина

Перед молниеразрядниками устанавливаются плавкие предохранители  $FU2$  с номинальным током 160–500 А (меньшим, чем ток предохранителей  $FU1$ ) и характеристикой срабатывания  $gG$  или  $gL$  (по ГОСТ Р 50339.0-92).

Нижние зажимы молниеразрядников соединены вместе и подключаются к  $PEN$ -проводнику и к главной заземляющей шине (ГЗШ) вводно-распределительного устройства (ВРУ).

$PEN$ -проводник разделяется в ВРУ на  $N$ - и  $PE$ -проводники, причем  $PE$ -проводник соединяется с ГЗШ. Далее в здании распространяется проводка из пяти проводников, и может устанавливаться счетчик электроэнергии.

Если длина кабеля между ВРУ и локальным распределительным щитом или НКУ менее 10 м, то для согласования (координации) срабатывания УЗИП разных классов устанавливаются индуктивные развязки  $L1-L4$ . В [43] рекомендуется использовать индуктивную развязку  $LC63$ . Она предназначена для нагрузки линии до 63 А, имеет номинальную индуктивность 5 мкГн. При подземном вводе (когда в первом каскаде защиты установлены варисторы) величина индуктивности может быть 5–6 мкГн, при воздушном вводе (в первом каскаде защиты установлены разрядники) это значение должно быть не менее 12–15 мкГн. Это объясняется разным временем сра-

батывания разрядников и варисторов. У разрядников время срабатывания примерно в 4 раза больше.

В распределенном шкафу (или НКУ) используются УЗИП класса 2. Они выбираются на базе варисторов, например, V20-C/3+NPE OBO BETTERMANN [43], параметры которых следующие: номинальный импульсный ток 60 кА при импульсе 8/20 мкс; уровень защиты 1,4 кВ. Нижние зажимы варисторного УЗИП подключаются к нейтральному проводнику ( $N$ ), а нейтральный проводник через искровой разрядник суммарного тока подключается к защитному проводнику ( $PE$ ). Разрядник суммарного тока позволяет избежать появления напряжения на защитный проводник и возникновения опасного контактного напряжения в месте уравнивания потенциалов.

Если в распределительном щите имеется локальная заземляющая шина, то она соединяется защитным проводником с главной заземляющей шиной (пунктирная линия на рисунке 4.18).

УЗИП класса 3 используются для защиты от коммутационных перенапряжений приборов, стоящих в конце электрической цепи. Здесь перенапряжения возникают, главным образом, между фазой  $L$  и нулевым проводником  $N$ . Соединение звездой варисторов защищает проводники  $L$  и  $N$  через варисторы и связывает общую точку звезды с разрядником суммарного тока (на рисунке 4.18 указано однофазное УЗИП, например, типа KNS-D фирмы OBO BETTERMANN [43]). Благодаря этой защитной системе между фазой  $L$  и нулевым проводником  $N$  при поперечных перенапряжениях не происходит проведения импульсного тока в защитный проводник  $PE$ . Устройство защитного отклонения (УЗО) не срабатывает. Его можно устанавливать в сети после места включения УЗИП класса 2. Уровень защиты  $U_p$  на рисунке 4.18 для УЗИП класса 3 задан в виде дроби 1,1/1,3 кВ, что означает:  $U_p = 1,1$  кВ – для симметричных перенапряжений;  $U_p = 1,3$  кВ – для асимметричных перенапряжений.

Схему (рисунок 4.18) можно упростить, если использовать УЗИП класса 1, координированный к классу 3. В этом случае нет необходимости использовать УЗИП класса 2 и индуктивную развязку  $L$ .

УЗИП типа VS3-VA/TNC+Fs фирмы OBO BETTERMANN является готовой к монтажу комбинацией из молниеразрядника 1 серии MCD и разрядника для защиты от перенапряжения типа 2 серии V20-VA с контактами сигнализации (Fs) при неисправности УЗИП [43]. Данная комбинация специально разработана для установки в области до счетчика (рисунок 4.19).

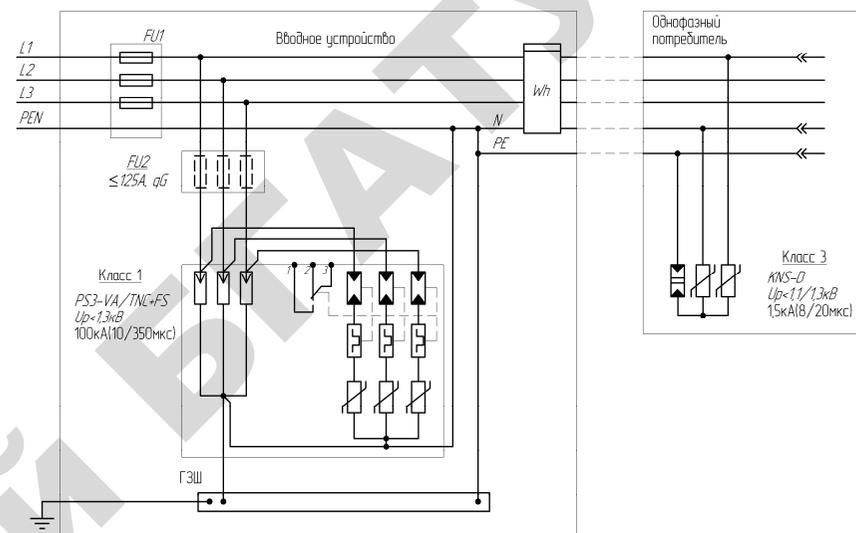


Рисунок 4.19 – Вариант включения УЗИП фирмы OBO BETTERMANN класса 1, координированного к классу 3, в сети TN-C-S

Плавкие предохранители  $FU2$  необходимы только в том случае, если плавкие предохранители  $FU1$  в сети больше 125 А.

Особенности УЗИП данной комбинации:

- выдерживают импульсивный ток 100 кА при импульсе 10/350 мкс, что больше, чем выдерживает молниеразрядник МС 50-B/VDE (50 кА) (рисунок 4.18);
- имеют уровень защиты  $U_p$  менее 1,3 кВ. На рисунке 4.18 обеспечивается уровень защиты после УЗИП 1 класса  $<2$  кВ, а после класса 2 – 1,4 кВ. Чем меньше уровень защиты, тем лучше УЗИП;
- время срабатывания  $<25$  нс. На рисунке 4.18 молниеразрядник класса 1 имеет время срабатывания  $<100$  нс, варистор класса 2 –  $<25$  нс, в сумме –  $<125$  нс. Чем меньше время срабатывания, тем лучше УЗИП;
- отключающая способность сопровождающего тока 12,5 кА. Следовательно, ток КЗ в месте подключения УЗИП должен быть меньше этого значения.

В сети TN-S УЗИП присоединяются между фазой и нейтральным проводником ( $N$ ), который соединяется через разрядник суммарного тока с защитным проводником ( $PE$ ). Так включаются УЗИП классов 1, 2, 3 (рисунок 4.20).

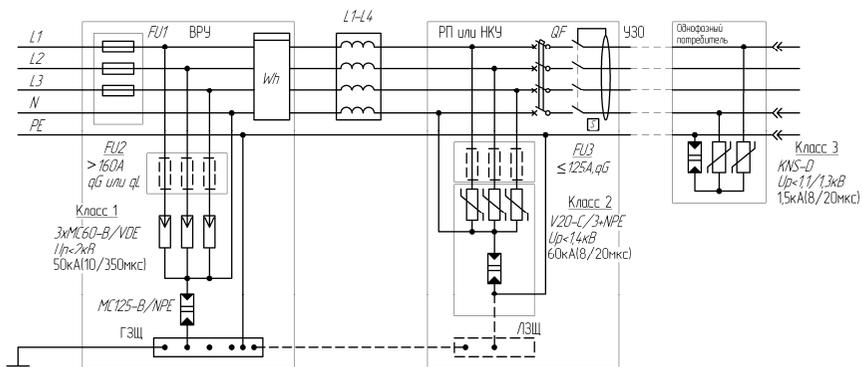


Рисунок 4.20 – Вариант включения УЗИП фирмы OBO BETTERMANN в сети TN-S

Счетчик электрической энергии включается после УЗИП класса 1, а УЗО – после УЗИП класса 2.

УЗИП класса 2 устанавливаются в каждом устройстве вторичного распределения тока, а УЗИП класса 3 – перед подключением конечного токоприемника (в переходниках розеток на 16 А, в качестве кабельных адаптеров и т. п.). Обычно УЗИП класса 3 – однофазные [43], устанавливаются у каждого потребителя.

Схему рисунка 4.20 можно упростить подобно тому, как была упрощена схема рисунка 4.18, если вместо УЗИП классов 1 и 2 установить один УЗИП класса 1, координированный к классу 3 и имеющий дополнительный разрядник суммарного тока. Таким является разрядник грозовой защиты и защиты от перенапряжений (комплект) PS4-VA/TT+TN-S+FS (с функцией переключения контактов сигнализации при возникновении неисправности) [43].

Одним из преимуществ приведенных схем является то, что разрядники в цепи N–PE позволяют обеспечить гальваническую развязку этих проводников, следовательно, и лучшую помехозащищенность оборудования связи или обработки информации. Известно, что нулевой рабочий проводник практически всегда находится под каким-то потенциалом (от единиц до десятков вольт), зависящим от симметричности распределения нагрузки по фазам. Или, например, при работе импульсных нагрузок (импульсных выпрямителей с преобразованием частоты) в нулевом рабочем проводнике появляются высшие гармоники рабочей частоты сети 50 Гц. Все эти помехи могут приводить к ошибкам и сбоям в работе сверхчувств-

вительных нагрузок через цепи заземления и уравнивания потенциалов, т. е. через PE-проводники. Применение системы электропитания типа TN-S с разрядниками в цепи N–PE позволяет свести эти влияния к минимуму.

Для удобства монтажа и обслуживания устройства защиты могут размещаться в отдельном щитке [38]. Причем в одном щитке могут быть установлены ограничители перенапряжения разных классов. Это становится возможным в случае установки между ними разделительных дросселей. Пример схемы подключения к электроустановке защитного щитка с двумя ступенями защиты приведен на рисунке 4.21.

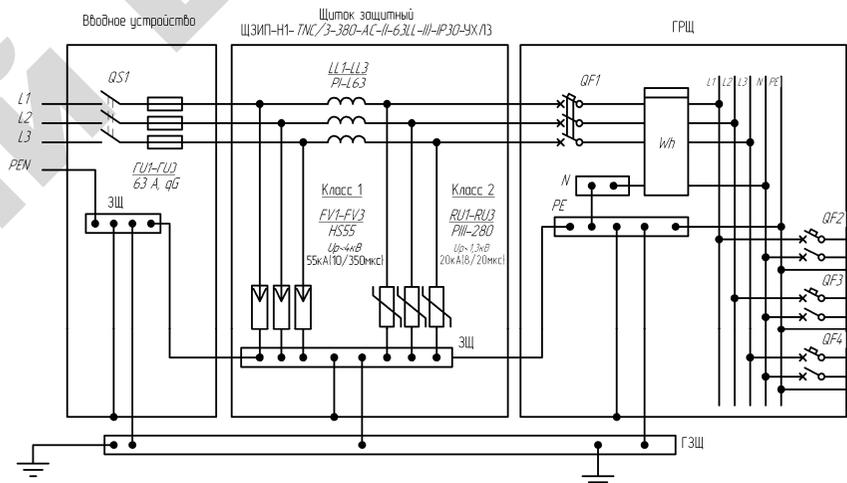


Рисунок 4.21 – Вариант включения УЗИП фирмы Nakel, установленного в защитном щитке, в трехфазную сеть TN-C-S

К нагрузочной стороне вводного устройства подключается вход защитного щитка с УЗИП, к силовой стороне группового автомата – выход защитного щитка. Заземление щитка осуществляется на главную заземляющую шину объекта и на PE-шину главного распределительного щита (ГРЩ).

Основные требования по монтажу и подключению главной заземляющей шины (ГЗШ) изложены в [11, гл. 1.7], а так же в Техническом циркуляре ассоциации «РОСЭЛЕКТРОМОНТАЖ» №6/2004 от 16.02.2004 «О выполнении основной системы уравнивания потенциалов на вводе в здание».

На рисунке 4.22 изображено включение УЗИП, установленных в щитках защиты, в сеть *TN-C-S*, имеющую два кабельных подземных ввода. В этом случае используются УЗИП класса 1 на базе варисторов с глубоким уровнем защиты ( $U_p < 1,3$  кВ), например, типа SPC 1.1 фирмы Nakel, имеющие однофазное исполнение, рассчитанное на номинальный импульсный ток 50 кА при импульсе 8/20 мкс и на импульсный ток 12 кА при импульсе 10/350 мкс [38].

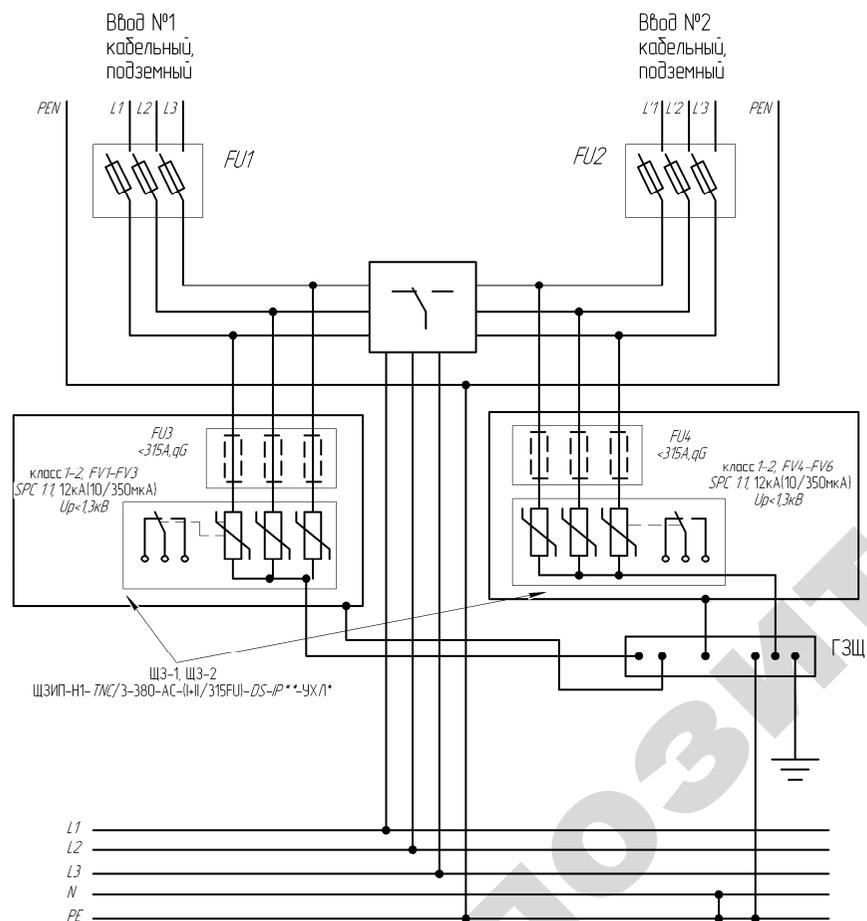


Рисунок 4.22 – Вариант включения УЗИП фирмы Nakel, установленных в защитных щитках, в трехфазную сеть *TN-C-S* с двумя подземными вводами

В случае воздушного ввода условия защиты от импульсных перенапряжений более тяжелые в связи с возможным прямым ударом молнии в воздушную линию. В этом случае требуется использовать мощные УЗИП на базе молниеразрядников класса 1, например, HS55 (рисунок 4.23). Его параметры следующие: однофазный уровень защиты  $< 4$ кВ; импульсный ток 55 кА при импульсе перенапряжения продолжительностью 10/350 мкс.

Для более глубокой защиты используются варисторы класса 2, например, типа PIII-280 DS, имеющие уровень защиты перенапряжения  $< 1,3$  кВ при номинальном импульсном токе 20 кА (8/20 мкс) [38].

В схеме, приведенной на рисунке 4.23, дополнительно установлены разделительные дроссели между первой и второй ступенями защиты. Необходимость их применения описана выше. Следует отметить, что разделительные дроссели выбираются с учетом тока нагрузки в каждой фазе электроустановки.

Для установки на DIN-рейку предусмотрены дроссели с номинальным током до 63 А. Дроссели с более высоким максимальным током (до 120 А) имеют большие габариты и не очень удобны для монтажа в малоразмерные щиты. Поэтому при больших нагрузочных токах целесообразно отказываться от применения разделительных дросселей и размещать УЗИП разных ступеней защиты на расстоянии не ближе 10 м в различных распределительных щитах [38].

В том случае, если дроссели применяются, необходимо предусмотреть на вводе в электроустановку или в той линии, где установлены дроссели, устройства защиты от сверхтоков (автоматические выключатели или предохранители) соответствующего номинала, которые смогут защитить дроссели и проводники электроустановки от токов перегрузки и короткого замыкания.

При отсутствии дросселей в схеме защиты необходимо обеспечить защиту электроустановки от аварийных режимов КЗ в УЗИП при помощи включения последовательно с ними предохранителей с номинальным током, предложенным в технических условиях изготовителя УЗИП. Предохранители можно не устанавливать при очевидно более низком номинальном значении устройства защиты от сверхтоков (предохранителя), установленного перед точкой включения УЗИП по ходу электроэнергии (см. рисунок 4.22).

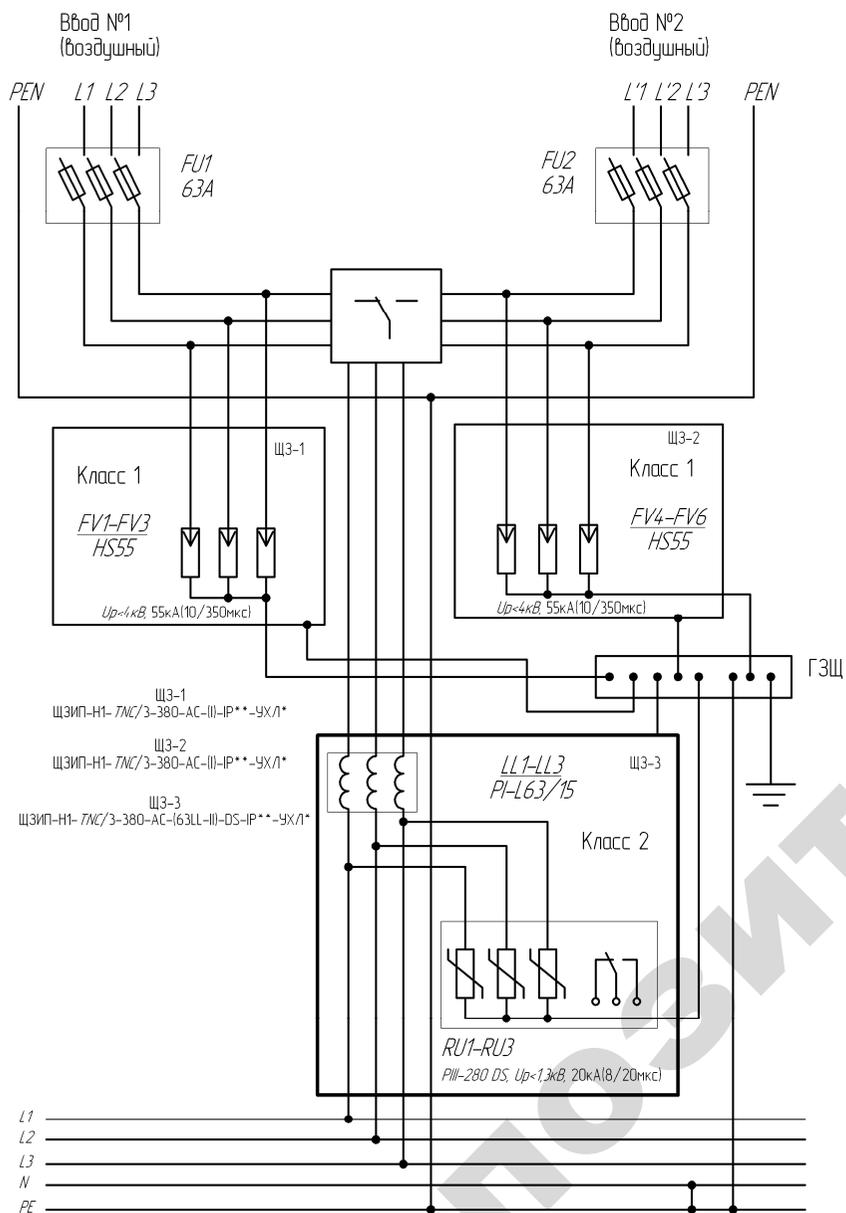


Рисунок 4.23 – Вариант включения УЗИП фирмы Накел, установленных в защитных щитках, в трехфазную сеть TN-C-S с двумя воздушными вводами

Микропроцессорные счетчики электрической энергии устанавливаются в сельской местности в частном секторе, где преобладают в основном воздушные линии (ВЛ) электропередач, которые наиболее всего подвержены воздействию грозовых разрядов.

Защита воздушных линий от перенапряжений предусмотрена в [11, гл. 1.7, подп. 2.4.25, 2.4.26].

Особого внимания требуют участки воздушных линий, проходящие по открытой или высокой местности, в зонах со среднегодовой продолжительностью гроз 40 часов и более, в населенных пунктах, отходящие от трансформаторных подстанций, стыкующиеся с подземными кабелями или с кабельными вставками, заканчивающимися вводом в здание.

Наиболее эффективной защитой воздушных линий от грозовых перенапряжений являются применение ОПН, которые устанавливаются на опорах ВЛ и должны быть присоединены к заземлителю отдельным спуском.

В качестве защиты должны применяться ОПН, способные пропускать через себя импульсные токи формы 10/350 мкс с амплитудным значением 50–100 кА и обеспечивающие уровень защиты (U) менее 4 кВ (см. п. 1.4).

На электрооборудование жилого дома распространяется зона концепция защиты от перенапряжений. Необходимо учитывать, что большинство частных домов в сельской местности не имеют собственного устройства защитного заземления, поэтому требуется более качественная защита от перенапряжений. Вариант такой защиты изображен на рисунке 4.24.

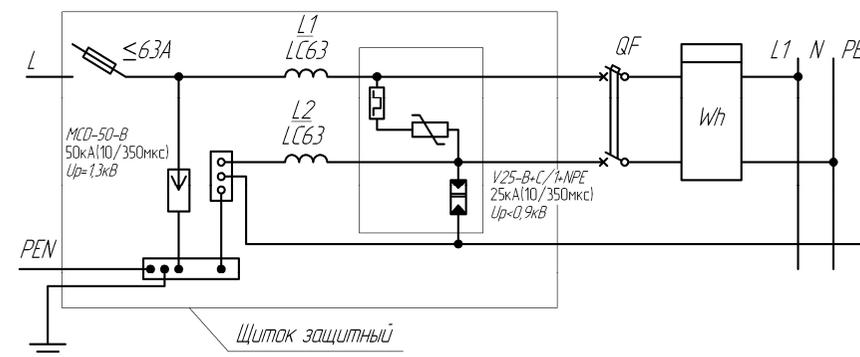


Рисунок 4.24 – Вариант включения УЗИП фирмы ОВО BETTERMANN в однофазную сеть частного жилого дома с воздушным вводом и микропроцессорным счетчиком

В этой схеме используется мощный молниеразрядник MCD-50-B фирмы OBO BETTERMANN (Германия), обеспечивающий повышенную надежность и уровень защиты 1,3 кВ. В качестве второй ступени защиты использован комбинированный молниеразрядник и разрядник перенапряжения V25-B+C/1+NPE классов 1 и 2 той же фирмы, имеющий низкое остающееся напряжение ( $U_p < 0,9$  кВ) [43].

Для повышения надежности защиты используются индуктивные развязки  $L1$  и  $L2$  типа LC63 той же фирмы, имеющие индуктивность 5 мкГн.

В случае подземного кабельного ввода электрического питания в частный дом можно в защитном щитке исключить первую ступень защиты (MCD-50-B) и индуктивные развязки  $L1$  и  $L2$ .

#### 4.7. Применение и выбор УЗИП

*Применение УЗИП требуется* в следующих случаях:

а) если электроустановка получает питание от воздушной линии, число грозовых дней в году не превышает 25, но возможна повышенная опасность или повышенный риск, например, электроустановки взрывоопасных или пожароопасных помещений;

б) если электроустановка получает питание по воздушной линии или включает в себя наружную проводку, а число грозовых дней в году превышает 25.

При воздушном вводе в жилые и общественные здания установка УЗИП является обязательной [11, разд. 6 и 7].

*Применение УЗИП не требуется*, если электроустановка получает питание по кабелю, проложенному в земле, или по кабелю, броня которого не заземлена, а импульсное выдерживаемое напряжение электрооборудования не меньше указанного в таблице 4.2 для соответствующей категории. Но и в этих случаях *рекомендуется применение УЗИП*, если:

1) электроустановка размещена в здании, имеющем систему молниезащиты, или вблизи от системы молниезащиты;

2) длина кабеля недостаточна для надлежащего затухания грозового импульса напряжения, появившегося в воздушной части питающей сети при воздействии молнии;

3) на подземный кабель может воздействовать прямой удар молнии при высоком удельном сопротивлении почвы;

4) высота здания или его размеры достаточно велики или оно размещено таким образом, что повышена вероятность прямого удара молнии в здание, который может привести к большим материальным потерям;

5) имеется риск прямого удара молнии в другие входящие и исходящие цепи (телефонные линии, антенные системы и т. п.), что может привести к переходу импульса напряжения из этих цепей на электрооборудование здания;

6) имеются другие виды наружного обеспечения здания, проходящие в воздухе (металлические трубы газоснабжения, водопроводы, канализации, воздухопроводы вентиляции и кондиционирования);

7) несколько зданий обеспечивается энергией от одной питающей сети или имеет общий заземлитель. В этом случае электрические цепи тех зданий, которые имеют УЗИП, могут быть подвержены повышенным импульсным перенапряжениям [14].

Цели выбора УЗИП: обеспечить максимальные условия защиты изоляции электроустановки и предохранить УЗИП от аварийных режимов.

Перед выбором УЗИП необходимо иметь представление о трех группах параметров: о свойствах защищаемого объекта; об электрической сети; об условиях установки и окружающей среде.

О свойствах защищаемого объекта необходимо знать следующие характеристики: тип защищаемой электроустановки; способы включения ее в сеть; номинальное испытательное напряжение изоляции электроустановки; ожидаемые уровни токов молнии.

*Электрическая цепь* должна характеризоваться следующими характеристиками: наибольшим напряжением сети; видом ввода (воздушный или кабельный); системой заземления; максимальным временем продолжения КЗ на землю; величиной тока КЗ в месте установки УЗИП; максимальным значением медленно изменяющихся перенапряжений и временем их действия; длиной кабельного участка.

*Условия установки и окружающей среды* должны учитывать температуру и влажность окружающего воздуха, а также место и способ установки УЗИП.

Один из параметров выбора УЗИП – выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения  $U_c$ . При выборе должно быть использовано условие:  $U_c$  УЗИП должно быть больше наибольшего сетевого напряжения  $U_m$  с 10 % запасом. Если  $U_m$  не известно, то следует принимать

$$U_M = 1,1U_{н.сети}$$

где  $U_{н.сети}$  – номинальное напряжение электрической сети в месте установки УЗИП, В.

В сельском хозяйстве Беларуси используется силовая электрическая сеть 220/380 В с глухозаземленной нейтралью. УЗИП в этой сети устанавливаются на фазное напряжение сети. В этом случае:

$$U_c \geq 1,1 \left( \frac{U_M}{\sqrt{3}} \right) = 1,1 \left( \frac{380}{\sqrt{3}} \right) = 241,6 \text{ В.}$$

Следовательно, УЗИП должно иметь  $U_c > 242 \text{ В}$ .

Максимальное длительное рабочее напряжение ( $U_c$ ) УЗИП должно быть согласовано с возможным временным перенапряжением.

При обрыве нулевого рабочего или PEN-проводника в трехфазных сетях и при значительной несимметрии фазных нагрузок уровень временных перенапряжений может достигать значений междуфазного напряжения (380 В), а его длительность – нескольких часов. В связи с этим в системах TN рабочее напряжение УЗИП должно быть не ниже 242 В для надежной работы УЗИП в нормальных режимах и не ниже 380 В для исключения возможности выхода из строя УЗИП при неблагоприятном стечении обстоятельств. Предпочтительные значения напряжения  $U_c$  УЗИП выбирают из следующего ряда: 250; 260; 275; 280; 320; 420 В. При этом необходимо иметь в виду, что меньшему значению напряжения  $U_c$  соответствует и меньший уровень остающегося напряжения УЗИП, но при этом возрастает риск выхода УЗИП из строя при временных перенапряжениях. В этом случае электроустановка должна быть дополнительно защищена от воздействия временных перенапряжений при помощи специальных устройств, к которым можно отнести, например, реле контроля напряжения или реле контроля фаз с функцией управления контактором.

Уровень защиты напряжения УЗИП, размещаемых в электроустановках зданий, должен соответствовать категории перенапряжений II, т. е. должен быть не выше 2,5 кВ. При выборе уровня защиты перенапряжений УЗИП должен учитываться уровень стойкости электрооборудования к перенапряжениям. При использовании электронного оборудования уровень защиты УЗИП должен быть менее 1,5 кВ.

Выбор УЗИП связан с местом его установки в здании и внешними условиями, в частности, ожидаемым током молнии на вводе.

Для определения доли грозового тока, попадающего через отдельные вводы в здание, следует руководствоваться методикой расчета тока растекания, изложенной в ГОСТ Р 51992-2002 (МЭК 61643-1-98, приложение А). На рисунке 4.25 приведен классический пример распределения грозового тока в объекте, подвергнутом прямому удару молнии (МЭК 61024-1-1; МЭК 61643-12).

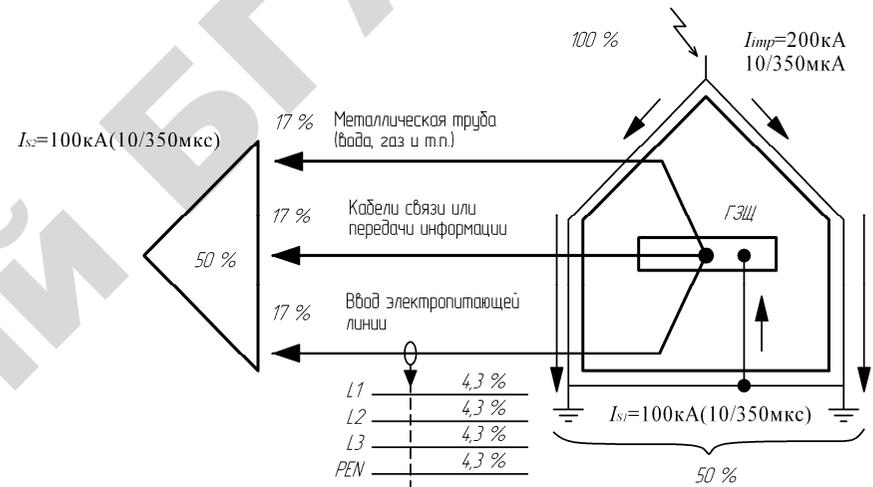


Рисунок 4.25 – Распределение токов молнии при прямом ударе в объект

Для определения распределения токов между металлическими элементами конструкции здания и попадания молнии в систему внешней молниезащиты необходимо рассчитать сопротивления заземляющих устройств, трубопроводов, электропитающего ввода, ввода кабелей связи и т. п.

В случаях, когда трудно осуществить сложный расчет, используется так называемая квалифицированная оценка по данным, приведенным на рисунке 4.25. После этого выбирается защитное устройство класса I с некоторым запасом (20–30 %), с учетом возможной неравномерности растекания токов по различным проводникам.

В случае изменения исходных данных, т. е. числа вводов в объект, типа системы электропитания, количества проводов в кабеле и т. д., токовые значения также могут существенно измениться. При этом изменения могут произойти как в сторону уменьшения импульсных

токов, так и в сторону их возрастания. В случае применения экранированных кабелей большая часть токов растекается через экранные оболочки, что лишним раз подтверждает необходимость применения данных кабелей на объектах с повышенными требованиями к защищенности от ударов молнии [38].

Приведенные выше заключения справедливы для объектов, оборудованных внешней молниезащитой и имеющих кабельный подземный ввод электропитания. Ситуация может серьезно усложниться в случае наличия воздушного ввода электропитания. Расчет показывает, что при прямом попадании молнии с импульсным пиковым током 200 кА с фронтом импульса 10/350 мкс и при условии его равномерного распределения по четырем проводам системы *TN-C*, импульсные токи в каждом проводе имеют значение около 50 кА. Стеkanie этих токов на землю будет осуществляться в две стороны: через оборудование низковольтной стороны подстанции и элементы электроустановки объекта в примерном соотношении 1:1. Таким образом, в каждом проводе на вводе электропитающей установки объекта получаем ток величиной 25 кА (10/350 мкс). Если предположить, что равномерного растекания токов по какой-то причине не произошло, то это значение может возрасти до 45–50 кА и более [38].

При воздушном вводе электропитания, вне зависимости от наличия внешней системы молниезащиты, когда возможно прямое попадание молнии в провода линии электропередачи (в непосредственной близости от объекта) в качестве первой системы защиты устанавливаются грозовые разрядники. Они должны быть способны пропускать через себя импульсные токи формы 10/350 мкс с амплитудным значением 50–100 кА и гасить сопровождающие токи величиной более 4 кА, а так же обеспечивать уровень защиты ( $U_p$ ) менее 4 кВ. Например, можно использовать многоазорные угольные искровые разрядники без выброса ионизированных газов типа HS55 производства фирмы HakeI или MC50-B VDE (MCD50-B) фирмы OBO BETTERMANN.

При подземном вводе электропитания и при наличии внешней системы молниезащиты, когда существует вероятность попадания молнии в молниеприемник, можно установить варисторные защитные устройства. Они должны быть способны пропускать через себя импульсные токи формы 10/350 мкс с амплитудным значением 10–25 кА и также обеспечивать уровень защиты  $U_p < 4$  кВ. Например, можно использовать устройства серии SPC1/1 или SPC3/1

(HakeI), устройства V20-C/3+NPE или V25-C/3+NPE (OBO BETTERMANN).

При отсутствии внешней системы молниезащиты ее рекомендуется установить, так как прямой удар молнии в этом случае, как правило, приводит к динамическим воздействиям на строительные конструкции объекта, а также может вызвать пожар за счет искрения и перекрытия воздушных промежутков между токопроводящими элементами объекта [38].

В качестве второй ступени защиты в цепях *L-N* используются устройства на базе варисторов с максимальным импульсным током 20–40 кА формы 8/20 мкс и уровнем защиты  $U_p$  менее 2,5 кВ (устройства фирмы HakeI серии PП-230, PПМ-230, PП-280, PПМ-280, SPU1, SPU3 или фирмы OBO BETTERMANN серии V20-C/3+NPE).

В цепях *N-PE* в качестве второй ступени защиты применяются газонаполненные металлокерамические разрядники, способные выдерживать импульсные токи с амплитудой 20–40 кА формы 8/20 мкс. Сопровождающие токи в цепях *N-PE* не возникают, поэтому в данном случае могут применяться разрядники с  $I_f = 100–300$  А (разрядники B20-C).

В качестве третьей ступени защиты используются модули с максимальным импульсным током 6–10 кА формы 8/20 мкс уровнем защиты  $U_p$  менее 1,5 кВ. Могут применяться комбинированные устройства, включающие в себя дополнительно помехозащитный фильтр на полосу частот в диапазоне 0,15–30 МГц (устройства серии PI-k8, PI-k32, PI-3k80 и другие фирмы HakeI или VF230-AC/DC, KNS-D, SMS-D фирмы OBO BETTERMANN).

С переходом от первого до третьего класса УЗИП уровень номинального разрядного тока должен уменьшаться. Это условие записывается в следующем виде:

$$I_{п.кл.1} > I_{п.кл.2} > I_{п.кл.3} \quad (4.4)$$

Кроме того, с переходом от первого до третьего класса УЗИП остающееся напряжение должно уменьшаться. Это условие запишется так:

$$U_{р.кл.1} > U_{р.кл.2} > U_{р.кл.3} \quad (4.5)$$

С остающимся напряжением тесно связано номинальное импульсное (выдерживаемое) напряжение электроустановки  $U_{имп.ном}$ .

Требуется, чтобы всегда выполнялось условие

$$U_p < U_{\text{имп.ном}} \quad (4.6)$$

Если расстояние между УЗИП разных классов менее 10 м, то для координации временных характеристик УЗИП используют разделительные дроссели. Разделительные дроссели выбираются, исходя из величины максимальных рабочих токов нагрузки, например, 16, 32, 63 или 120 А (PI-L16/15, PI-L32/15, PI-L63/15 фирмы Hakel или LC-63 фирмы OBO BETTERMANN, где первые цифры – ток, а вторые – индуктивность, мкГн).

В некоторых случаях установить УЗИП только на вводе здания недостаточно для того, чтобы с большой степенью вероятности защитить такую категорию потребителей электроэнергии, как высокочувствительная электронная техника. УЗИП класса III в этом случае устанавливаются непосредственно возле защищаемого оборудования (в розетках, вилках, кабельных лотках).

В случае применения устройств защитного отключения (УЗО) УЗИП классов I и II должны быть включены до УЗО (по ходу энергии). Таким образом, их срабатывание не вызовет ложного отключения УЗО. Устройства защиты класса III могут быть установлены после УЗО (по ходу энергии), но при этом должны использоваться УЗО типа S (селективные) с временной задержкой срабатывания от импульсных помех (рисунок 4.26).

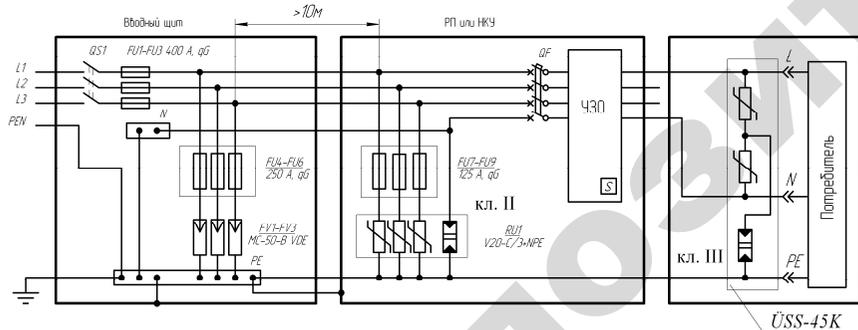


Рисунок 4.26 – Вариант установки УЗИП фирмы OBO BETTERMANN в сеть TN-C-S, имеющей УЗО

#### 4.8. Применение плавких предохранителей для защиты УЗИП

УЗИП включается между проводниками, одним из которых, как правило, является фазный проводник, а другим – нулевой рабочий или нулевой защитный проводник. При этом в случае выхода из строя УЗИП возможно возникновение режима КЗ между данными проводниками, что может привести к выходу из строя электроустановки и даже возникновению пожара.

Имеющееся в УЗИП устройство отключения при перегреве варистора (тепловая защита), как правило, срабатывает при старении варистора, когда увеличиваются токи утечки. При превышении фактического тока импульсного разряда через варистор над максимально допустимым током варистор может не выйти из строя, но при этом все равно будет отключен от защищаемой цепи в результате выделения большого количества тепловой энергии.

Другая ситуация возникает в случае установившегося превышения действующего напряжения в сети над максимальным допустимым рабочим напряжением УЗИП. Примером такой ситуации может быть отгорание нулевого рабочего проводника на вводе в электроустановку. Как известно, в этом случае к нагрузке может быть приложено межфазное напряжение 380 В. При этом варистор открывается и через него длительное время протекает ток. Величина этого тока близка к току КЗ и может достигать сотен ампер. Из практики известно, что устройство тепловой защиты не всегда срабатывает в подобных ситуациях. Не все УЗИП на базе разрядников имеют в своем составе устройства теплового отключения. В результате, как правило, УЗИП разрушается от воздействия большого количества тепловой энергии. Возможно даже возникновение дуги и замыкание клемм устройства на корпус шкафа или DIN-рейку при расплавлении пластмассы корпуса. Поэтому для защиты электроустановки и УЗИП от режимов КЗ необходимо предусматривать дополнительную защиту в виде предохранителей с характеристикой срабатывания gG или gL, установленных последовательно с каждым УЗИП.

Применение защитных автоматических выключателей в данной ситуации может не обеспечить необходимый результат. Опыт эксплуатации показывает, что сами автоматические выключатели могут быть повреждены импульсом тока при грозовом разряде. При этом может произойти приваривание контактов и появляется вероятность несрабатывания автомата при КЗ в защищенной линии. Плавкий предохранитель полностью исключает подобную ситуа-

цию. При правильном выборе номинального тока плавкого предохранителя практически исключается вероятность перегорания предохранителя при прохождении через защитное устройство импульсного тока при ударе молнии.

При отказе от установки предохранителей, в случае возникновения КЗ хотя бы в одном из УЗИП, произойдет срабатывание плавкого предохранителя ВРУ и электропитание потребителя будет отключено до устранения неисправности. Применение предохранителей в цепи каждого УЗИП значительно уменьшает вероятность такой ситуации.

Номиналы предохранителей и тип их времятоковых характеристик определяются конкретным производителем УЗИП и отражаются в технической документации. Как уже указывалось выше, для этих целей обычно используются плавкие предохранители типа *gG* или *gL*, предназначенные для защиты проводников и коммутационного оборудования от перегрузок и КЗ. Они обладают значительно меньшим временем срабатывания по сравнению с автоматическими выключателями тех же номиналов. При этом предохранители имеют более высокую стойкость к импульсным токам значительных величин.

Пример выбора плавких предохранителей для защиты УЗИП фирмы *Nakel* приведен на рисунке 4.27.

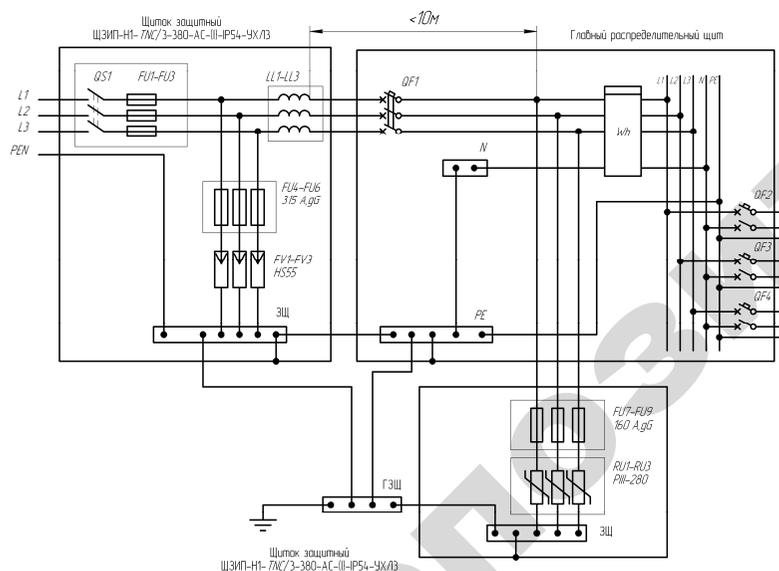


Рисунок 4.27 – Применение плавких предохранителей для защиты УЗИП фирмы *Nakel*

Рекомендации при выборе плавких предохранителей для защиты УЗИП следующие [38].

1. При номинальном токе плавких предохранителей *FU1–FU3* более 315 А (*gG*) или при их отсутствии номинальные токи плавких предохранителей *FU4–FU6* выбираются равными 315 А (*gG*), а номинальные токи плавких предохранителей *FU7–FU9* выбираются равными 160 А (*gG*). Соотношение токов этих плавких вставок должно быть не менее 1,6.

2. При номинальном токе плавких предохранителей *FU1–FU3* менее 315 А (*gG*), но более 160 А (*gG*) плавкие предохранители *FU4–FU6* можно не устанавливать.

3. При номинальном токе плавких предохранителей *FU1–FU3* менее 160 А (*gG*) плавкие предохранители *FU4–FU6* и *FU7–FU9* можно не устанавливать.

4. При наличии разделительных дросселей *LL1–LL3* номинальный ток плавких предохранителей *FU1–FU3* должен соответствовать номинальному току дросселей.

Так же необходимо учитывать наличие или отсутствие автоматического выключателя *QF1*.

1. При номинальном токе плавких предохранителей *FU1–FU3* менее 160 А (*gG*) или при их отсутствии и при номинальном токе автоматического выключателя *QF1* более 100 А (или при его отсутствии) номинальные токи плавких предохранителей *FU7–FU9* выбираются 160 А (*gG*).

2. При номинальном токе автоматического выключателя *QF1* менее 63 А предохранители *FU7–FU9* можно не устанавливать.

#### 4.9. Требования к установке и монтажу УЗИП

УЗИП устанавливают как можно ближе к вводу питающей сети, во вводном устройстве в здание или в квартирном щитке индивидуального жилого дома.

В системе *TN-C-S* УЗИП класса I должны быть установлены на вводе между каждым фазным проводником и проводником *PEN*, а УЗИП класса II – между фазой и проводником *PE*, а также между проводниками *PE* и *N*.

В системе *TN-S* УЗИП должны быть установлены между каждым фазным проводником и главной заземляющей шиной или главным заземляющим зажимом (выбирают самое короткое расстояние), а также между нулевым рабочим и нулевым защитным проводниками.

Требуется установка УЗИП класса III в распределительные щитки (в розетки, в удлинители) вблизи оборудования, подлежащего защите, в следующих случаях:

1) когда имеется очень чувствительное к перенапряжениям и достаточно дорогое оборудование (радиоэлектронные приборы, компьютеры);

2) расстояние между УЗИП, размещенным на входе, и оборудованием, которое надо защищать, слишком велико;

3) внутри сооружения имеются электромагнитные поля, создаваемые разрядами молнии и внутренними источниками помех.

Если уровень напряжения защиты  $U_p$  УЗИП, установленного на вводе электроустановки, на 20 % ниже номинального импульсного выдерживаемого напряжения оборудования категории перенапряжений II, то применение дополнительных УЗИП при отсутствии внутри здания источников мощных электромагнитных полей обычно не требуется [46].

УЗИП должны быть установлены и присоединены согласно инструкциям изготовителя так, чтобы избежать опасности возгорания или взрыва в случае выхода УЗИП из строя.

При установке в пожароопасных и взрывоопасных местах УЗИП должны иметь оболочку с соответствующей степенью защиты.

Для повышения уровня защиты соединительные проводники от выводов УЗИП к цепи питания должны быть как можно короче (предпочтительна общая длина проводника к одному УЗИП не более 0,5 м). Соединительные проводники должны быть медными и иметь сечение не менее  $4 \text{ мм}^2$  [46].

Предпочтительно применение соединительных проводников, смонтированных в виде буквы V, когда проводники цепи нагрузки подключены непосредственно к выводам УЗИП или через разъединитель (предохранитель) (рисунок 4.28, б). Защищенные проводники, идущие к нагрузке, не должны приближаться к входным проводникам или PE-проводникам.

#### 4.10. Проверка и диагностика УЗИП при эксплуатации

В процессе эксплуатации необходимо внешним осмотром проверять отсутствие повреждений УЗИП, проводить контроль встроенных индикаторов состояния УЗИП (при их наличии) и разъединителей УЗИП, заменять неисправные УЗИП.

Текущие проверки УЗИП в объеме, указанном изготовителем, должны производиться при каждом выявлении срабатывания разъединителей УЗИП, но не реже одного раза в год [46].

Периодические проверки УЗИП (не реже одного раза в 6 лет) должны проводиться в объеме, установленном в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей» для разрядников и ограничителей перенапряжения, с учетом информации изготовителей УЗИП.

Сигнализация о том, что УЗИП вышел из строя и больше не осуществляет функцию защиты от импульсных перенапряжений, должна обеспечиваться или встроенным индикатором состояния УЗИП [42] или разъединителем УЗИП, например, предохранителем или встроенным терморазъединителем.

Несмотря на то, что конструкция и параметры УЗИП постоянно совершенствуются и повышается их надежность, в процессе эксплуатации их нельзя оставлять без внимания.

При интенсивных грозах, когда может произойти несколько ударов молнии непосредственно в защищаемый объект или вблизи от него во время грозы возникает вероятность повреждения УЗИП. Они подвержены так называемому старению (деградации), т. е. постепенной

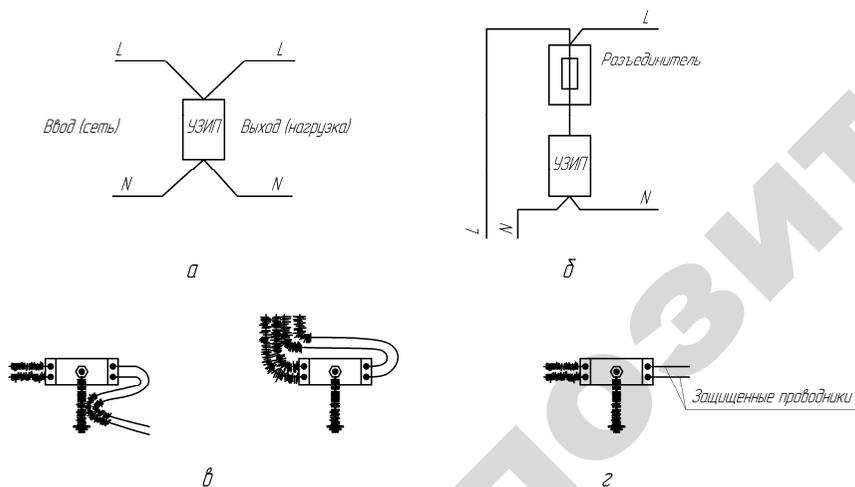


Рисунок 4.28 – Варианты присоединения УЗИП без разъединителя (а), с разъединителем (б), неправильная (в) и правильная (г) прокладки защищенных проводников

потере своих способностей ограничивать импульсные перенапряжения. Интенсивнее всего процесс старения протекает при повторяющихся грозовых ударах в течение короткого промежутка времени в несколько секунд или минут, когда амплитуды импульсных токов достигают предельных максимальных параметров.

Повреждение УЗИП происходит следующим образом [38]: разрядные токи, протекающие при срабатывании защитных устройств, нагревают корпуса их нелинейных элементов до такой температуры, что при повторных ударах с той же интенсивностью (в не успевшее остыть устройство) происходит:

1) у варисторов – нарушение структуры кристалла (тепловой пробой) или его полное разрушение;

2) у металлокерамических газонаполненных разрядников (грозо-защитных разрядников) – изменение свойств в результате утечки газов и последующее разрушение керамического корпуса;

3) у разрядников с открытой разрядной камерой – за счет взрывного выброса ионизированных газов во внутреннее пространство распределительного щита могут возникать повреждения изоляции кабелей, клеммных колодок и других элементов электрического шкафа или его внутренней поверхности. Важной особенностью при эксплуатации разрядников этого типа в распределительных щитах является также необходимость повышения мер противопожарной безопасности.

По указанным выше причинам все серьезные изготовители устройств защиты от импульсных перенапряжений рекомендуют осуществлять их регулярный контроль как минимум два раза в год – перед началом грозового сезона и после его окончания, а также после каждой сильной грозы. Проверку необходимо осуществлять с помощью специальных тестеров или приборов, которые обычно можно заказать у фирм, занимающихся техникой защиты от перенапряжений. Контроль, осуществляемый другими способами, например, визуально или с помощью универсальных измерительных приборов, в этом случае является неэффективным по следующим причинам [38]:

1) *варисторное защитное устройство может быть повреждено, хотя сигнализация о выходе варистора из строя не сработала.* Варистор может обладать искаженной вольт-амперной характеристикой (более высокая утечка тока) в области токов до 1 мА (область рабочих токов при рабочем напряжении сети; настоящую область невозможно проверить с помощью обычно применяемых приборов). Проверка осуществляется минимально в 2-х точках

характеристики (как правило, 10 и 1000 мкА), при помощи специального источника тока с высокой скоростью нарастания напряжения от 1 до 1,5 кВ. При этом простое измерение квалификационного напряжения не даст полной картины состояния варистора.

В связи с этим для применения в электроустановках рекомендуются только те варисторные УЗИП, которые имеют в своем составе устройство теплового отключения (терморазмыкатель). Конструкция данного устройства, как правило, очень проста. Терморазмыкатель состоит из подпружиненного контакта, припаянного легкоплавким припоем к одному из выводов варистора, и связанной с ним системы сигнализации. В некоторых устройствах применяются дополнительно «сухие» контакты для подключения дистанционной сигнализации о выходе УЗИП из строя, позволяющие с помощью физической линии передавать информацию об этом на пульт диспетчера или на вход какой-либо системы обработки и передачи телеметрических данных;

2) *у металлокерамического газонаполненного разрядника может быть поврежден от взрыва внешний декоративный корпус (или его вводы).* С помощью визуального контроля можно заметить повреждения, но чтобы выяснить состояние самого разрядника, необходимо разобрать внешний корпус. Однако даже при таком контроле практически нельзя обнаружить утечку газа. Контроль напряжения зажигания газового разрядника с помощью обыкновенных измерительных приборов выполнить невозможно, так как динамическое напряжение зажигания разрядника будет зависеть от крутизны фронта импульса, а статическое напряжение зажигания даст информацию только лишь о том, способен ли разрядник загореться вообще. Реальную картину состояния разрядника и значения его уровня защиты можно получить только при помощи специализированных генераторов, формирующих комбинированную волну напряжения и тока [42], и запоминающего осциллографа;

3) *проверку исправной работы разрядника с открытой искровой камерой* можно осуществить только после демонтажа и измерения грозового тока с характеристикой (10/350 мкс) по заказу у изготовителя УЗИП или в специальной лаборатории.

ООО «Интерэлектрокомплект» (Россия) для выпускаемых УЗИП типа ОПС1 рекомендует следующее [9]:

1) потребителем могут быть проведены предмонтажные испытания ОПС1. В качестве источника напряжения может быть использован любой аппарат, имеющий выходной постоянный ток

не более 10 мА (во избежание выхода из строя варисторов вследствие тепловой перегрузки) и допускающий плавный подъем напряжения до 1000 В с измерением его значения. Для измерения тока утечки один из выводов ограничителя соединяется с выводом испытательной установки, а второй вывод присоединяется к заземлению через миллиамперметр класса точности не ниже 4. Значение напряжения при протекании через ОПС1 постоянного тока 1,5 мА не должно быть ниже приведенного на вольт-амперной характеристике (см. рисунок 4.16);

2) проверку исправности ограничителя в процессе эксплуатации производить следующим образом:

а) по визуальному индикатору проверяется степень «износа» (если индикатор затемнен более чем на  $\frac{3}{4}$ , то его необходимо заменить);

б) отсоединить ограничитель от питающей сети и подсоединить к мегомметру напряжением 1000 В;

в) замерить сопротивление ограничителя, которое должно лежать в диапазоне 0,1–2,0 мОм. Если сопротивление ограничителя находится вне указанного диапазона, ограничитель должен быть заменен.

#### 4.11. Защита электрооборудования от временных перенапряжений

В электрической сети 380 В повышенные значения напряжения не должны превышать +10 % [35]. Для защиты электрооборудования при повышенных напряжениях в электрической сети, превышающих допустимые значения, возможны два решения: 1) применение стабилизаторов напряжения или электронных ограничителей напряжения; 2) отключение потребителя на время повышенного напряжения.

В качестве примера устройства первого типа на рисунке 4.29 представлена принципиальная электрическая схема ограничителя напряжения ЭОН-1.

Устройство ЭОН-1 предназначено для ограничения напряжения в сельскохозяйственных осветительных установках с лампами накаливания. Устройство рассчитано на ток нагрузки до 15 А при напряжении в сети 220–250 В. На нагрузке поддерживается напряжение  $215^{+5}_{-10}$  В.

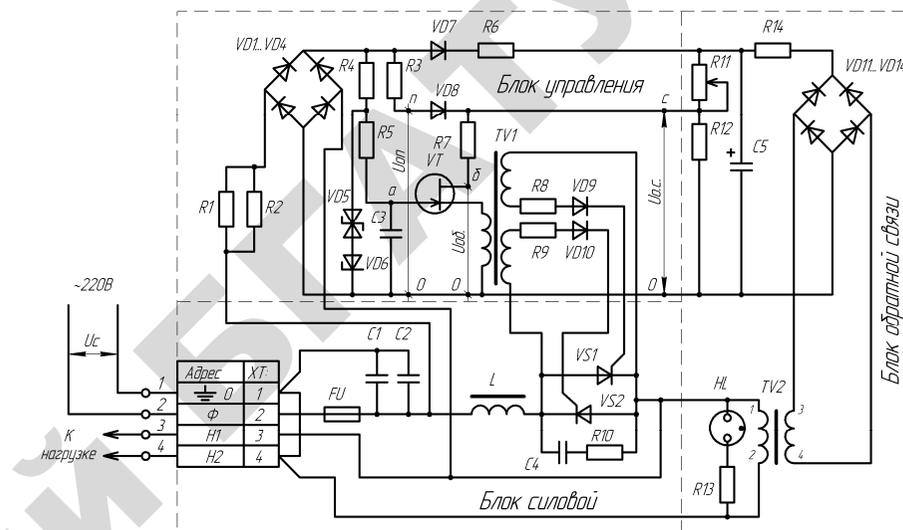


Рисунок 4.29 – Принципиальная электрическая схема электронного ограничителя напряжения ЭОН-1

В основу работы электронного ограничителя напряжения заложен принцип фазового регулирования действующего напряжения. Он заключается в изменении продолжительности прохождения тока по нагрузке в каждый полупериод напряжения сети, в зависимости от фазы подаваемых на тиристоры импульсов управления. Фаза подаваемых на тиристоры импульсов управления в данном устройстве зависит от величины напряжения сети и изменяется автоматически.

Напряжение на нагрузке коммутируют силовые тиристоры *VS1*, *VS2*. Включение их осуществляет блок управления через свой трансформатор *TV1*.

Предохранитель *FU* защищает цепи тиристоров от КЗ. Конденсаторы *C1* и *C2* фильтруют высокочастотные помехи, а дроссель *L* сглаживает пульсации тока. Трансформатор *TV2* обеспечивает напряжение обратной связи. Цепочка *C4-R10* защищает тиристоры от перенапряжений. Трансформатор *TV1* осуществляет гальваническую развязку блока управления от силового блока.

Блок обратной связи содержит разделительный трансформатор *TV2*, подключенный параллельно нагрузке, выпрямительный мост на диодах *VD11-VD14*, сглаживающий фильтр *R14-C5* и делитель

напряжения на резисторах  $R11$ ,  $R12$ . С выхода делителя на базу транзистора  $VT$  подается напряжение обратной связи.

Для улучшения стабилизирующих свойств аппарата на вход делителя через диод  $VD7$  и резистор  $R6$  дополнительно подается напряжение, пропорциональное напряжению сети. Диод  $VD8$  служит для автоматического включения схемы управления при подаче напряжения сети. Лампа  $HL$  сигнализирует о наличии напряжения на нагрузке.

Схема работает следующим образом: в начале каждого полупериода тиристоры закрыты. К ним приложено напряжение сети. Это напряжение выпрямляется диодным мостом  $VD1$ - $VD4$  и через ограничивающие резисторы  $R1$ - $R4$  подается на стабилитроны  $VD5$  и  $VD6$ , формирующие импульс опорного напряжения. Конденсатор  $C3$  через резистор  $R5$  начинает заряжаться, вследствие чего на эмиттере однопереходного транзистора  $VT$  напряжение плавно нарастает от нуля до напряжения отпирания  $VT$ . Величину напряжения отпирания  $VT$  определяет межбазовое напряжение  $U_{об}$ . Оно формируется цепью обратной связи (напряжением  $U_{о.с}$ ). Напряжение  $U_{об}$  пропорционально  $U_{о.с}$ .

Когда напряжение на эмиттере однопереходного транзистора  $VT$  достигнет межбазового напряжения  $U_{об}$ , конденсатор  $C3$  разряжается на первичную обмотку трансформатора  $TV1$ . Во вторичной обмотке трансформатора  $TV1$  индуцируется ЭДС. Под действием этой ЭДС потечет ток и один из тиристоров, к которому в этот момент приложена положительная волна напряжения сети, откроется. Аналогичное явление происходит во второй полупериод сетевого напряжения.

Параметры схемы подобраны так, что при напряжении сети до 220 В тиристоры открываются в начале полуволны напряжения. Это происходит потому, что напряжение  $U_{оп} > U_{о.с}$  и оно мало по значению. Следовательно, напряжение на  $C3$  и эмиттере  $VT$  за короткое время превышает межбазовое, и тиристоры откроются в начале полуволны. Уменьшение действующего значения напряжения на нагрузке от этого процесса не превышает 5 В.

Если же напряжение в сети превысит 220 В, то в действие вступают цепи обратной связи. Происходит это потому, что напряжение  $U_{о.с}$  становится больше, чем пропорциональное сети напряжение  $U_{об}$ , отчего диод  $VD8$  запирается. Теперь межбазовое напряжение транзистора  $VT$  определяется  $U_{о.с}$ . Чем больше  $U_{о.с}$ , тем дольше заряжается конденсатор  $C3$  и, следовательно, позже наступит момент

открытия тиристоров. При этом величина действующего значения напряжения на нагрузке не изменяется и не превышает нормы.

На рисунке 4.30 изображены кривые изменения напряжения и ток на нагрузке при  $U_c < 220$  В и при  $U_c > 220$  В. Чем выше отклонение напряжения от 220 В, тем больше угол  $\alpha$  открытия тиристора. Однако площадь кривой  $U$  на обоих графиках примерно одинаковая, значит, действующее значение напряжения не изменяется.

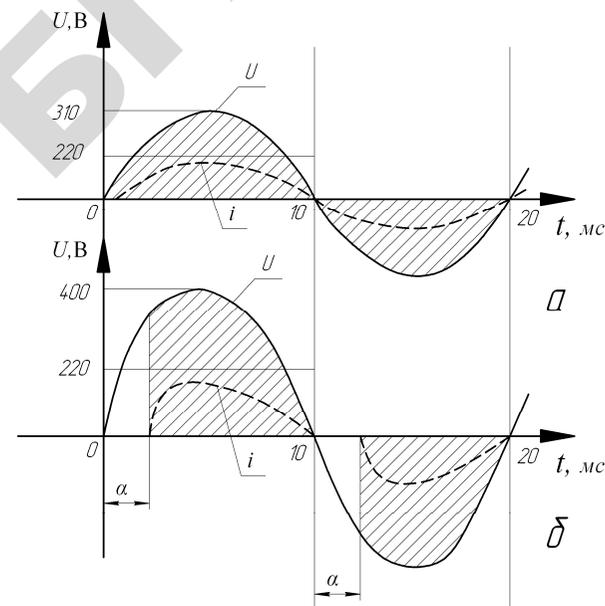


Рисунок 4.30 – Кривые тока и напряжения на нагрузке при  $U_c \leq 220$  В (а) и при  $U_c > 220$  В (б)

Устройства второго типа (с отключением потребителя при повышенных напряжениях) функционируют следующим образом: как только измеряемое напряжение достигнет своего установленного порогового значения, выходное реле изменяет состояние после заданного времени  $t_1$  (рисунок 4.31, а). Нагрузка отключается от электрической сети. Когда измеряемое напряжение возвращается к установленному значению гистерезиса, реле немедленно возвращается в исходное состояние. Нагрузка подключается к электрической сети. Следует обратить внимание, что при колебаниях напряжения (продолжительностью  $t_2$ ) реле не успеет сработать.

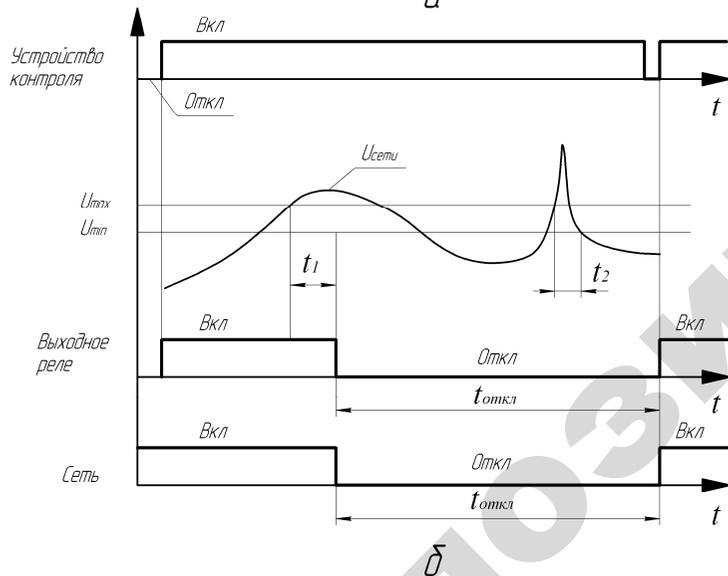
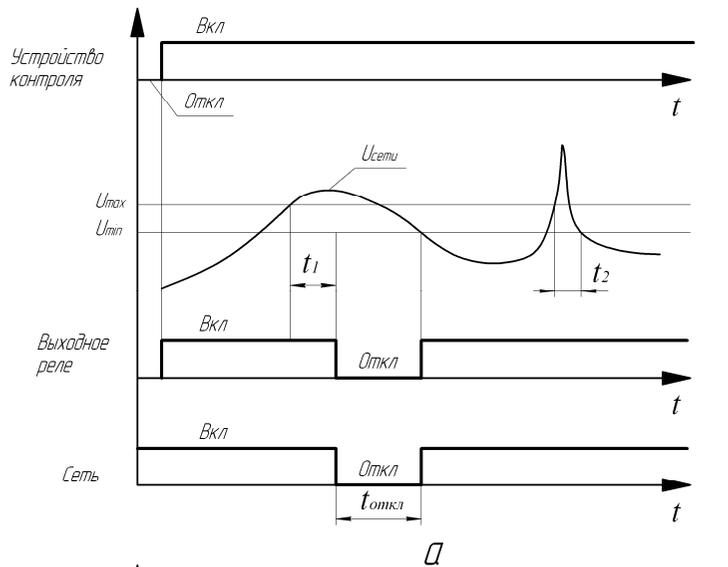


Рисунок 4.31 – Гистограммы реле контроля повышенного напряжения с возвратом в исходное состояние (а) и без возврата, т. е. с запоминанием отключенного состояния (б)

Возможен контроль напряжения с последующим сохранением отключенного состояния потребителя, даже если напряжение возвращается в норму (рисунок 4.31, б). Возврат устройства в исходное состояние (сброс) осуществляется отключением и включением напряжения питания устройства.

Обычно устройства контроля повышенного напряжения контролируют так же уровень снижения напряжения. Такими являются реле контроля однофазного напряжения 3UG35 фирмы Siemens [47]. Выпускаются такие реле для контроля напряжения переменного тока 24, 120, 230 В и постоянного тока 24 В. В некоторых моделях эти напряжения выбираются от 15 до 275 В. Время задержки на отключение устанавливается от 0,1 до  $3 \pm 10$  % с. Время готовности после приложения напряжения сети – 500 мс, время переключения отказа сети – 10 мс.

Подобные устройства выпускает ООО «F&F» Евроавтоматика» (Беларусь) под общим названием датчики (реле) напряжения CP-710 (однофазные) и CP-730 (трехфазные) [48]. Они предназначены для непрерывного контроля напряжения в электрической сети и защиты электроустановок от роста и падения напряжения, выходящего за пределы установленных значений путем коммутации электрических цепей нагрузки. При циклической нестабильности напряжения сети реле отключает питание нагрузки на 10 минут, защищая установку от хаотической коммутации. Верхний предел фазного напряжения регулируется от 230 В до 260 В, нижний предел – от 150 В до 210 В. Время отключения при росте напряжения составляет 0,1 с, время отключения при падении напряжения и время включения реле при восстановлении напряжения – 1,5 с.

Настройка порогов срабатывания реле осуществляется движковыми потенциометрами на лицевой панели устройства. Светодиодные индикаторы сигнализируют о нормальном, повышенном и пониженном напряжении. Схемы включения реле CP-710 и CP-730 изображены на рисунке 4.32.

Реле для трехфазного контроля напряжения сети модели 3UG30 фирмы Siemens или реле CP-730 ООО «F&F» Евроавтоматика» имеют следующий алгоритм работы: выходные реле находятся в состоянии срабатывания, пока значения трех линейных напряжений (или фазных) находятся между нижними и верхними пороговыми значениями. Эти пороговые значения задаются раздельно с помощью потенциометров на передней панели. Если значение напряжения выходит за пределы этого диапазона, то выходные

реле отключаются по истечении времени задержки или времени, которое отдельно устанавливается на лицевой панели приборов. Постоянный гистерезис 3–5 % предотвращает длительное выключение или отключение выходных реле, когда измеряемое напряжение находится вблизи порогового значения.

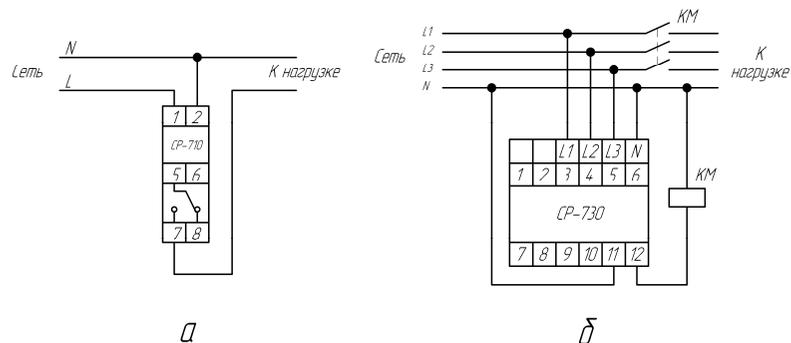


Рисунок 4.32 – Схемы включения однофазного реле CP-710 контроля напряжения сети (а) и трехфазного реле CP-730 (б)

Реле контроля напряжения строится обычно на элементе сравнения, усилителе и исполнительном органе. На рисунке 4.33 приведена схема простейшего реле такого типа [49]. Элемент сравнения образуют стабилитрон  $VD3$  и потенциометр  $RP2$ . Усилителем служит тиристор  $VS$ . Исполнительный орган выполнен на реле  $KV$ .

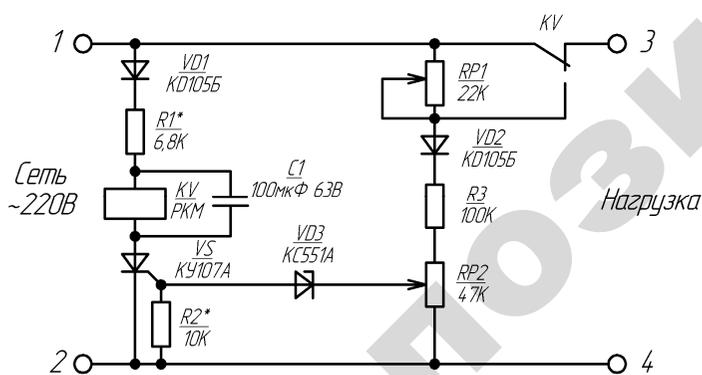


Рисунок 4.33 – Принципиальная электрическая схема реле контроля временного перенапряжения

Устройство работает следующим образом: положительные полуволны сетевого напряжения, выпрямленные диодом  $VD1$ , через резистор  $R1$ , обмотку реле  $KV$  поступают на анод тиристора  $VS$ . Одновременно выпрямленные диодом  $VD2$  положительные полуволны напряжения через резисторы  $R3$ ,  $RP1$  поступают на  $RP2$ .

Если напряжение сети не превышает норму, то напряжение на движке потенциометра  $RP2$  оказывается недостаточным для открытия стабилитрона и тиристора. В это время сетевое напряжение через контакт  $KV$  поступает непосредственно к нагрузке.

В случае превышения напряжения сети заранее установленного значения напряжение на движке потенциометра  $RP2$  окажется достаточным для открывания стабилитрона и тиристора. Реле при этом срабатывает и контактом  $KV$  отключает нагрузку от сети. Контакт  $KV$  перебросится вниз и зашунтирует сопротивление  $RP1$ . Ток через  $RP2$  увеличится. В исходное состояние устройство вернется при меньшем сетевом напряжении, чем сработало. Тем самым обеспечивается гистерезис и исключается его неустойчивая работа при напряжении, близком к пороговому значению. Если сетевое напряжение снова окажется в норме, тиристор тут же закроется, реле потеряет питание и своим контактом подключит нагрузку к сети. Для контроля повышенных и пониженных напряжений схему приходится усложнять, см. [49] или [50].

Самыми распространенными причинами появления опасного напряжения в однофазной сети является «отгорание» нулевого проводника трехфазного ввода. При этом однофазные потребители могут оказаться под линейным напряжением. В этом случае требуется быстрое действие схемы. Следует исключить использование в выключателе электромагнитных изделий (реле, контакторов). Выключатель может быть построен на базе тиристора, симистора, IGBT-модулей, МОП-транзисторов и бесконтактных оптореле, например, в [50] используются МОП-транзисторы.

#### 4.12. Контрольные вопросы и задания

1. Что называется перенапряжением?
2. В чем отличие импульсного перенапряжения от временного?
3. В каких случаях наблюдается не прямое воздействие молнии?
4. Когда возникают внутренние перенапряжения?

5. Какие требования предъявляются к устройствам защиты от перенапряжений?

6. Объясните сущность зонной концепции молниезащиты. Что такое Зоны 0; 0<sub>Е</sub>; 1; 2; 3 и т. д.?

7. Объясните устройство искрового разрядника.

8. Объясните устройство вентильного разрядника.

9. Объясните устройство ОПН.

10. Объясните назначение УЗИП.

11. В чем различие УЗИП коммутирующего типа от УЗИП ограничивающего типа?

12. Какие номинальные импульсные выдерживаемые напряжения соответствуют категориям стойкости к перенапряжениям (от 1 до 4)?

13. На какие классы делятся УЗИП?

14. В каких случаях применяются УЗИП класса I (B)?

15. В каких случаях применяются УЗИП класса II (C)?

16. В каких случаях применяются УЗИП класса III (D)?

17. Какими параметрами характеризуются УЗИП?

18. Нарисуйте график вольт-амперной характеристики варисторного УЗИП.

19. Нарисуйте принципиальную электрическую схему включения УЗИП в системе заземления электрической сети *TN-C-S*.

20. Нарисуйте принципиальную электрическую схему включения УЗИП в системе заземления электрической сети *TN-S*.

21. Наибольший номинальный разрядный ток имеют УЗИП типа ОПС1 с индексом *B*, *C* или *D*?

22. Что означают записи  $U_n = 400$  В и  $U_c = 440$  В на корпусе ОПС1?

23. Что означает запись  $U_p = 2,0$  кВ на корпусе ОПС1?

24. Что означают записи  $I_n = 30$  кА(8/20) и  $I_{max} = 60$  кА(8/20) на корпусе ОПС1?

25. Как определяется износ элементов ОПС1?

26. Как устроен механизм указателя износа защитного элемента ОПС1?

27. Надо ли применять плавкий предохранитель для защиты импульсных перенапряжений от сверхтоков?

28. Какое назначение имеет встроенный в защитный элемент ОПС1 термопредохранитель?

29. Объясните понятие «классификационное напряжение варистора».

30. Как осуществляется контроль износа варисторного УЗИП?

31. Как осуществляются предмонтажные испытания варисторных УЗИП типа ОПС1?

32. Какие два решения используют для защиты от временных перенапряжений?

33. Запишите два условия выбора УЗИП для электрических сетей.

34. Выберите УЗИП для трехфазного водно-распределительного устройства (ВРУ) здания и распределительного пункта (РП). В здании реализуется система заземления электрической сети *TN-C-S*. Номинальное напряжение электрической сети 380 В, 50 Гц.

35. Выберите УЗИП для установки в трехфазном НКУ. Система заземления электрической сети *TN-S*. Номинальное фазное напряжение сети 220 В, 50 Гц.

36. Выберите УЗИП для однофазного НКУ. Система заземления электрической сети *TN-C-S*. Номинальное напряжение сети 220 В, 50 Гц.

## Глава 5. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОТ ОПАСНЫХ ТОКОВ УТЕЧКИ

### 5.1. Общие сведения об электро- и пожаробезопасности

В основе действия устройств защитного отключения (УЗО) лежит принцип ограничения продолжительности протекания тока через тело человека (или животного) за счет быстрого отключения при возникновении опасности поражения электрическим током.

Сущность защиты с помощью УЗО поясняется в ПУЭ: это быстродействующее автоматическое отключение всех фаз участка сети, обеспечивающее безопасное для человека сочетание тока и времени его прохождения при замыканиях на корпус или при снижении уровня изоляции ниже определенного значения.

Опасность поражения человека или животного электрическим током возникает в следующих случаях:

- 1) при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
- 2) при снижении сопротивления изоляции электрооборудования ниже допустимого значения и возникновении опасных токов утечки на корпус, к которому прикасается человек или животное;
- 3) при замыкании фазы на корпус и прикосновении к этому корпусу человека (или животного).

Во всех случаях опасность поражения обусловлена:

- 1) величиной напряжения прикосновения;
- 2) током утечки через человека (или животное);
- 3) продолжительностью воздействия тока.

В нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки наибольшее допустимое напряжение прикосновения для человека при переменном токе частотой 50 Гц составляет 2 В, а допустимый ток утечки – 0,3 мА [51].

В аварийном режиме для производственных электроустановок наибольшее допустимое напряжение частотой 50 Гц составляет 50 В (ток 50 мА) при продолжительности воздействия 1 с и 36 В (ток 6 мА) при продолжительности воздействия более 1 с.

Для бытовых установок эти нормы составляют 25 В (ток 25 мА) при  $t = 1$  с и 12 В (ток 2 мА) при воздействии более 1 с. С увеличением напряжения прикосновения допустимое время воздействия уменьшается. При 220 В в бытовых электроустановках допустимая продолжительность воздействия составляет 0,01–0,08 с.

Ток 1 мА вызывает раздражающее действие. В большинстве случаев человек способен самостоятельно освободиться от него. При токе 10–15 мА возможно появление местной судороги, а при токе 25 мА и выше возникают резкие спазмы кровеносных сосудов, значительно повышается артериальное давление.

Величина тока в 10 мА считается пределом отпускающего тока.

Допустимой величиной тока, протекающего через тело человека при неограниченном времени воздействия, принят ток 1 мА; при воздействии 10–30 с допустимый ток составляет 6 мА в нормальных помещениях и 3–10 с при токе 6 мА – в особо опасных помещениях. Эти нормы относятся к электроустановкам с напряжением до 1000 В, имеющим глухозаземленную или изолированную нейтраль. Указанные безопасные сочетания тока и времени установлены ГОСТ 12.1.038-82 «Энергобезопасность. Предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и токов».

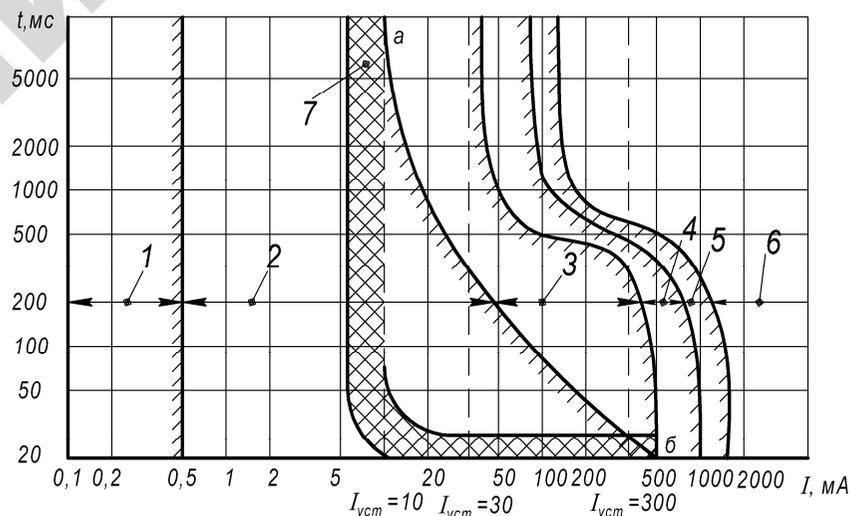


Рисунок 5.1 – Области физиологического воздействия тока частотой 50–60 Гц на человека по сведениям МЭК479-94 и типовая вставка УЗО на ток 10 мА: 1 – неощутимые токи; 2 – оощутимые токи, но не вызывающие физиологических нарушений; 3 – оощутимые токи, но не вызывающие опасности фибрилляции сердца; 4 – оощутимые токи, вызывающие опасность фибрилляции сердца с вероятностью менее 5%; 5 – оощутимые токи, вызывающие опасность фибрилляции сердца с вероятностью менее 50%; 6 – оощутимые токи, вызывающие опасность фибрилляции сердца с вероятностью >50%; 7 – область действия времятоковой характеристики УЗО со вставкой 10 мА

На рисунке 5.1 представлены графики  $t = f(I_{\text{УТ}})$  границ физиологического воздействия на человека переменного тока частотой 50–60 Гц по данным МЭК479-94 и характеристика устройств защитного отключения со вставкой 10 мА.

Из рисунка 5.1 следует, что УЗО должны иметь наименьшую уставку по току утечки 10 мА (точка «а»), причем этот ток может протекать продолжительное время (более 10000 мс). Наибольший ток при времени протекания 20 мс может составлять 500 мА (точка «б»). УЗО имеют разброс токов срабатывания (при вставке 10 мА срабатывают при токах от 6 мА и более). Ток утечки до 40 мА ощутим, но не имеет смертельного исхода. Следовательно, УЗО с вставками 10 и 30 мА обеспечивают надежную защиту даже в результате случайного прикосновения человека к токоведущим частям электрооборудования.

Следует отметить, что ток других частот, не равных 50 Гц, менее опасен. На рисунке 5.2 представлена зависимость граничного тока отпускания от частоты тока.

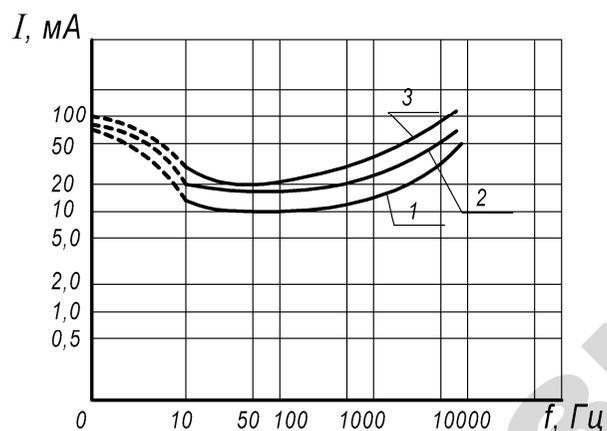


Рисунок 5.2 – Граничные токи отпускания согласно ИЕС 479:  
1 – с вероятностью 99,5 %; 2 – с вероятностью 50 %; 3 – с вероятностью 0,5 %

При граничном токе человек способен собственными силами освободиться от токоведущей части, к которой он прикоснулся. Из рисунка 5.2 следует, что при частоте >50 Гц и <50 Гц граничные токи отпускания возрастают, т. е. при других частотах электрический ток менее опасен.

Для крупного рогатого скота допустимое напряжение прикосновения при длительном воздействии напряжения частотой 50 Гц составляет 3,5 В, а ток – 7,5 мА.

Для дойных коров напряжение прикосновения, не вызывающее задержку молокоотдачи, составляет 2 В, а ток – 4 мА [52].

Основным мероприятием по обеспечению электробезопасности в установках до 1000 В с глухозаземленной нейтралью является присоединение корпусов электрооборудования к нулевому защитному проводнику. Предполагается, что при КЗ на корпус обеспечивается значительный ток КЗ и плавкая вставка перегорит или автоматический выключатель быстро отключит поврежденную цепь. При малых токах КЗ время отключения увеличивается. В течение времени отключения КЗ человек или животное, коснувшись корпуса, оказываются под напряжением прикосновения. Это напряжение может составлять опасную величину. Особенно неблагоприятные условия возникают при КЗ одной фазы электродвигателя на корпус и перегорания предохранителя в поврежденной фазе. Электродвигатель может продолжать вращаться на двух фазах, генерируя ЭДС в поврежденную фазу. На корпусе появляется напряжение прикосновения, опасное для животных и человека. При мощности электродвигателя 0,37 кВт напряжение прикосновения составляет 4,25 В, а при мощности 5,5 кВт – 37 В [53].

Таким образом, при присоединении корпусов к нулевому защитному проводнику не обеспечивается защита людей и животных в момент возникновения КЗ на корпус и прикосновение людей и животных к корпусу.

Не могут защитить человека, случайно прикоснувшегося к токоведущим частям электроустановки, плавкие предохранители и автоматические выключатели, поскольку их ток срабатывания несоизмеримо больше токов утечки через тело человека в землю.

В местах ослабления изоляции ток утечки и температура изоляции увеличиваются. Изоляционные материалы имеют ионную проводимость (а не электронную, как проводники), и с ростом температуры сопротивление изоляции уменьшается, а ток утечки увеличивается. Этот процесс носит лавинообразный характер.

По данным ВИИИ противопожарной обороны МВД РФ при начальном токе утечки 77 мА через 20 часов протекания тока утечки формируется очаг возгорания. При токе утечки 500 мА и протекании его через влажные опилки или пыль (в течение максимум получаса) происходит их самопроизвольное воспламенение. Более

трети всех пожаров возникают из-за токов утечки, появление которых вызвано повреждением либо старением изоляции. Плавкие предохранители или автоматические выключатели, выбранные по рабочим токам цепи, на такие токи не реагируют.

Таким образом, для защиты людей и животных от поражения электрическим током и электропроводки от возгорания изоляции требуются специальные быстродействующие средства защиты – УЗО.

К УЗО предъявляются следующие требования: 1) высокая чувствительность; 2) малое время отключения; 3) селективность действия; 4) самоконтроль; 5) высокая надежность.

Высокая чувствительность и надежность необходимы в связи с обеспечением безопасности людей.

Время отключения УЗО должно составлять малую величину, не более 0,3 с. С увеличением тока утечки время отключения уменьшается до 0,02–0,01 с. Эти параметры УЗО нормирует ГОСТ Р 50807-95 [54].

Самоконтроль УЗО выражается в способности реагировать на неисправности в собственной схеме и отключать установку при их появлении.

## 5.2. Типы устройств защитного отключения по контролируемым параметрам

Устройства защитного отключения могут быть построены на контроле следующих параметров:

- 1) напряжения корпуса относительно земли;
- 2) тока замыкания на землю;
- 3) напряжения нулевой последовательности;
- 4) оперативного тока (тока отдельного источника);
- 5) дифференциального тока проводников питающей сети (или тока утечки на землю).

УЗО, реагирующее на напряжение корпуса относительно земли, должны отключить от сети поврежденное электрооборудование, если напряжение прикосновения к корпусу превышает наибольшее длительно допустимое значение.

В простейшем случае (рисунок 5.3) используется реле напряжения, включенное между защищаемым корпусом и вспомогательным заземлителем, отнесенным на расстояние более 20 м от заземлителей нулевого проводника сети [51].

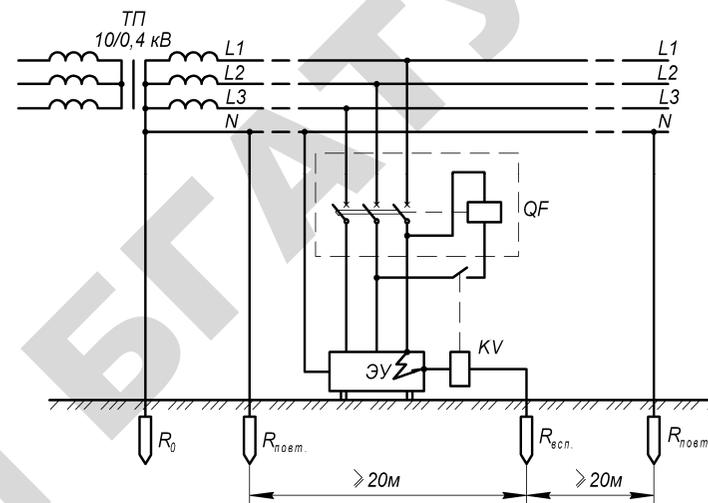


Рисунок 5.3 – Принципиальная электрическая схема УЗО, реагирующего на напряжение корпуса относительно земли:  $R_0$ ,  $R_{повт}$ ,  $R_{всп}$  – сопротивления заземлителей ТП, повторного, вспомогательного; ЭУ – электроустановка; KV – реле защиты; QF – автоматический выключатель с независимым расцепителем

Напряжение срабатывания реле в этой схеме определяется выражением

$$U_{ср} = \frac{U_{пр.доп} \sqrt{R_{кат}^2 + x_{кат}^2}}{\alpha_1 \alpha_2 \sqrt{(R_{кат} + R_{всп})^2 + x_{кат}^2}}, \quad (5.1)$$

где  $U_{пр.доп}$  – допустимое напряжение прикосновения, В;  
 $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты напряжения прикосновения;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  равны 1, если человек стоит на сырой земле вне зоны растекания тока с заземлителей; в других случаях  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  меньше 1;

$R_{кат}$  и  $x_{кат}$  – активное и реактивное сопротивления катушки реле, Ом;  
 $R_{всп}$  – сопротивление вспомогательного заземлителя, Ом.

Расчеты показывают [51], что если в сети 380/220 В при  $U_{пр.доп} = 60$  В и при использовании реле KV с напряжением срабатывания 30 В, а также параметрами катушки  $R_{кат} = 400$  Ом и  $x_{кат} = 200$  Ом, требуется выполнить вспомогательный заземлитель с сопротивлением 470 Ом.

Достоинство УЗО, контролирующего напряжение корпуса относительно земли, состоит в простой схеме реализации. Недостатки УЗО связаны с выполнением вспомогательного заземлителя, постоянством его сопротивления и отсутствием самоконтроля исправности схемы контроля. Областью применения УЗО являются удаленные от ТП электроустановки при отсутствии близкого повторного заземления. Например, передвижные электроустановки.

УЗО, реагирующие на ток замыкания на землю, обеспечивают быстрое отключение поврежденного электрооборудования от сети в случае превышения допустимого тока в заземляющем корпус проводнике. Допустимый ток замыкания на землю создает на корпусе наибольшее длительно допустимое значение напряжения  $U_{пр.доп}$ . В простейшем случае используется реле тока, включенное между защищаемым корпусом и вспомогательным заземлителем. Если используется зануление, то реле тока включается в рассечку зануляющего проводника (рисунок 5.4).

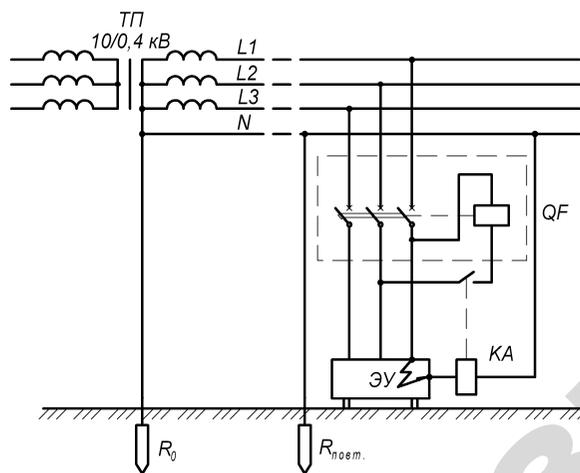


Рисунок 5.4 – Принципиальная электрическая схема УЗО, реагирующего на ток в зануляющем проводнике:

$KV$  – реле тока;  $\mathcal{E}V$  – электроустановка;

$QF$  – автоматический выключатель с независимым расцепителем

В качестве реле тока может использоваться электромагнитный расцепитель автоматического выключателя в нулевом проводе (буква «О» в обозначении, например, АП502МЗТО). Ток уставки реле  $K_A$  определяется из выражения

$$I_{уст} = \frac{U_{пр.доп}}{\sqrt{(R_{кат} + R_{всп})^2 + x_{кат}^2}}. \quad (5.2)$$

Все величины в формуле (5.2) соответствуют выражению (5.1). Если используется реле тока, включенное в рассечку зануляющего корпус проводника, то  $R_{вст} \approx R_{повт}$ , где  $R_{повт}$  – сопротивление повторных заземлений, Ом.

Достоинства УЗО, контролирующего ток замыкания на землю:

- 1) простейшая схема реализации;
- 2) четкое срабатывание при больших токах замыкания на корпус (или заземляющий проводник).

Недостатки УЗО, контролирующего замыкание на землю:

- 1) в случае обрыва заземляющего проводника УЗО перестает работать;
- 2) при наличии металлической связи между защищаемыми корпусами УЗО работает не селективно;
- 3) отсутствует самоконтроль исправности схемы контроля.

Область применения УЗО, реагирующего на ток замыкания на землю, ограничивается электроустановками, корпуса которых изолированы от земли и друг от друга, например, ручного электроинструмента. Напряжение сети и режим ее нейтрали могут быть любыми.

УЗО, реагирующее на токи нулевой последовательности, а также УЗО, реагирующее на оперативный ток (от постороннего источника), используются в сетях с изолированной нейтралью. Такие сети применяются на торфопредприятиях, в шахтах. На сельскохозяйственных предприятиях они не встречаются. С такими устройствами можно ознакомиться по [51], [52].

УЗО, реагирующее на дифференциальный ток проводников сети или управляемые дифференциальным током, описаны ниже.

### 5.3. Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током

УЗО, управляемые дифференциальным током, обеспечивают быстрое отключение от сети поврежденного электрооборудования, если дифференциальный ток проводников питания превысит допустимое значение. Дифференциальный ток проводников питания

не равен нулю, если имеет место утечка тока на землю. В однофазной и трехфазной сетях при отсутствии утечки тока на землю справедливы следующие выражения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A + \dot{I}_N &= 0; \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_N &= 0. \end{aligned} \quad (5.3)$$

При утечке тока на землю на защищаемом участке сети

$$\begin{aligned} \dot{I}_A + \dot{I}_N &= \dot{I}_{\text{ут}}; \\ \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_N &= \dot{I}_{\text{ут}}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

где  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{I}_N, \dot{I}_{\text{ут}}$  – ток в фазах  $A, B, C$ , в нулевом проводнике и ток утечки соответственно.

Контроль суммы токов проводников осуществляется бесконтактным способом с помощью дифференциального трансформатора тока (ДТТ). Такой трансформатор тока охватывает проводники с током (рисунок 5.5).

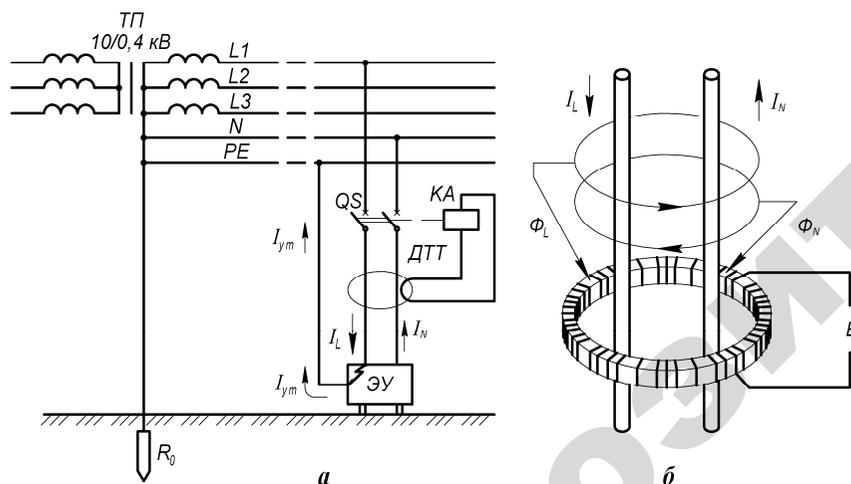


Рисунок 5.5 – Принципиальная электрическая схема УЗО, реагирующего на дифференциальный ток питающих проводников (а) и принцип действия ДТТ (б): ДТТ – дифференциальный трансформатор тока; КА – реле тока (расцепитель выключателя QS);  $I_L, I_N$  – ток в фазном и нулевом проводниках;  $I_{\text{ут}}$  – ток утечки; ЭУ – электрическая установка

Если отсутствует утечка тока, то  $I_L = I_N$  и суммарный магнитный поток в сердечнике ДТТ от этих токов равен нулю. Магнитные потоки (рисунок 5.5, б) действуют внутри сердечника трансформатора. Во вторичной обмотке трансформатора ЭДС не индуцируется.

При протекании тока утечки на корпус  $I_L \neq I_N$  и суммарный магнитный поток ДТТ не равен нулю. Во вторичной обмотке ДТТ возникает ЭДС, пропорциональная току утечки. Эта ЭДС имеет частоту питающего напряжения.

Достоинства УЗО, управляемых дифференциальным током:

- 1) возможность применения в сетях любых напряжений с различными режимами нейтрали;
- 2) способность обеспечивать безопасность человека при случайном прикосновении к токоведущим частям;
- 3) способность обеспечить безопасность человека и животных в случае прикосновения к заземленному (зануленному) корпусу или замыкания на него фазы;
- 4) независимость работы устройства от значений сопротивления заземления и сопротивления нулевого проводника.

Недостатки УЗО, управляемых дифференциальным током:

- 1) нечувствительность к утечке тока между фазами (другие УЗО имеют такой же недостаток);
- 2) более сложное устройство (иногда требуется электронный усилитель).

Область применения УЗО, управляемых дифференциальным током, – сети любых напряжений как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. В сетях с заземленной нейтралью эти УЗО срабатывают селективно. Они получили широкое применение в нашей стране и за рубежом.

В 1928 году германской фирмой RWE (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG) было запатентовано первое устройство защитного отключения с ДТТ (DRP №552 678 от 08.04.1928).

В 1937 году фирма Schutzapparategesellschaft Paris & Co изготовила первое действующее устройство на базе ДТТ и поляризованного реле, имеющего чувствительность 10 мА и быстродействие 0,1 с.

В 1960–1970 годы в Японии, США и странах Западной Европы началось активное внедрение УЗО. В настоящее время в указанных странах на каждого жителя приходится по два УЗО. Они стали привычным и обязательным элементом любой электроустановки производственного или социально-бытового назначения [55]. Внедре-

ние УЗО привело к значительному уменьшению смертельных поражений электрическим током, например, в Австрии – с 50 случаев в 1962 году до 10 случаев в 1985 году [56].

В 70-х годах в бывшем СССР велись активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию и внедрению отечественных УЗО. В 80-е годы на Гомельском заводе «Электроаппаратура» было начато производство устройства ЗОУП-25 (сельскохозяйственного назначения), УЗОШ (для школ и детских учреждений), позже – УЗОВ (встроенное в вилку для подключения бытовых электроприборов). В России большое распространение получили электромеханические устройства АСТРО\*УЗО. Более 60 модификаций АСТРО\*УЗО серийно производятся государственным предприятием – опытно-производственным заводом Московского энергетического института.

С введением в 1995 году в действие в Российской Федерации и Республике Беларусь комплекса государственных стандартов ГОСТ Р 50571 «Электроустановки зданий» применение УЗО становится обязательным в электроустановках социально-бытового и большинстве электроустановок производственного назначения.

Различают три группы УЗО с ДТТ по принципу взаимодействия его элементов:

- 1) электронные;
- 2) электромеханические;
- 3) совмещенные (с автоматическими выключателями).

### Электронные УЗО

В электронном УЗО механизм для выполнения операции отключения нуждается в энергии. Ее можно получить по контролируемой электрической сети (или от внешнего источника), а также от предварительно сжатых пружин аппаратов, включенных в режим самоудержания.

В электронном УЗО сигнал с дифференциального трансформатора тока подается на электронный усилитель или компаратор, с него – на усилитель мощности. Последний включает исполнительный орган (промежуточное реле или тиристор). На рисунке 5.6 показаны элементы схемы отдельного электронного УЗО и связь его с автоматическим выключателем (через замыкающий контакт на независимый расцепитель) или с электромагнитным пускателем (через размыкающий контакт в цепи катушки электромагнитного пускателя).

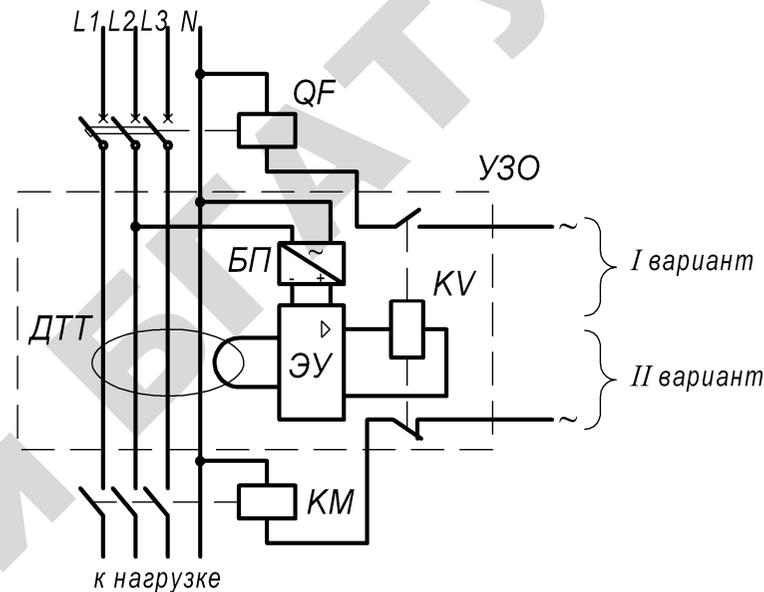


Рисунок 5.6 – Элементы схемы отдельного электронного УЗО и связь его исполнительного реле *KV* с автоматическим выключателем *QF* (I вариант) и электромагнитным пускателем *KM* (II вариант); *БП* – блок питания; *ЭУ* – электронный усилитель; *ДТТ* – дифференциальный трансформатор тока

Из рисунка 5.6 следует, что контакты исполнительного реле УЗО могут отключить отдельно установленный электромагнитный пускатель или автоматический выключатель. Таким УЗО является дифференциальное реле РУД-05УЗ, рассмотренное ниже.

Следует отметить, что такой принцип взаимодействия исполнительного реле и отключающего защищаемое электрооборудование автоматического выключателя или электромагнитного пускателя не надежный. При исчезновении напряжения подаваемого на блок питания промежуточное реле не может включиться (нет питания) и устройство становится не работоспособным. Аналогичная картина возникает при обрыве нулевого проводника в цепи до УЗО. Если при этом через фазу имеет место опасная утечка тока на заземленный корпус, то жизни человека, прикоснувшегося к корпусу, угрожает опасность, а УЗО не работоспособно.

Избежать этого можно, если использовать отключающий защищаемое электрооборудование электромагнитный пускатель в режиме контроля напряжения сети. Если есть напряжение, УЗО работоспособно и получает питание от этой сети; если исчезает напряжение или обрывается нулевой проводник в цепи УЗО, электромагнитный пускатель отключается. В таких УЗО дифференциальный трансформатор тока, электронный блок УЗО и электромагнитный пускатель монтируются в одном корпусе. После нажатия кнопки «Пуск» сначала запитывается электронный блок УЗО и при его исправности включается исполнительное реле и своим контактом включает электромагнитный пускатель. Таким образом, производится самоконтроль схемы УЗО и подключение электромагнитного пускателя в режим самоудержания. Такими электронными УЗО являются аппараты УЗОШ (для школьных кабинетов), УЗОВ (встроенные в вилку) Гомельского завода низковольтной аппаратуры. Электронное УЗО типа УЗОШ рассмотрены ниже.

Если электронные УЗО с ДТТ применяются в одном корпусе с выключателем нагрузки, то обычно такой выключатель нагрузки имеет удерживающее реле. Такое реле при нормальных режимах работы (отсутствует утечка тока и выключатель нагрузки включен) самоудерживается при протекании тока по его обмотке.

При исчезновении напряжения сети реле отключается и силовые контакты выключателя нагрузки размыкаются. Защищаемая электроустановка обесточивается. Аналогично действует устройство при утечке тока, превышающей уставку. Подобная конструкция УЗО обеспечивает гарантированное срабатывание УЗО при исчезновении напряжения и в случае обрыва нулевого проводника.

На рисунке 5.7 показано электронное УЗО, совмещенное с выключателем нагрузки, в отключенном состоянии. В начальном положении якорь удерживающего реле 6 разомкнут. При включении УЗО рычаг 2 защелкивается, контакты замыкаются. Удерживающее реле 6 получает питание, и его якорь 4 притягивается к сердечнику. В случае превышения тока уставки УЗО на выходе усилителя (ЭУ) появляется напряжение, и тиристор VS включается. Тем самым шунтируется удерживающая катушка реле 6, и якорь реле отпадает. Штырь на якоре 4 бьет по рычагу 2, и выключатель нагрузки отключает потребителя от сети. В случае исчезновения напряжения питания или обрыва нулевого проводника устройство также отключится.

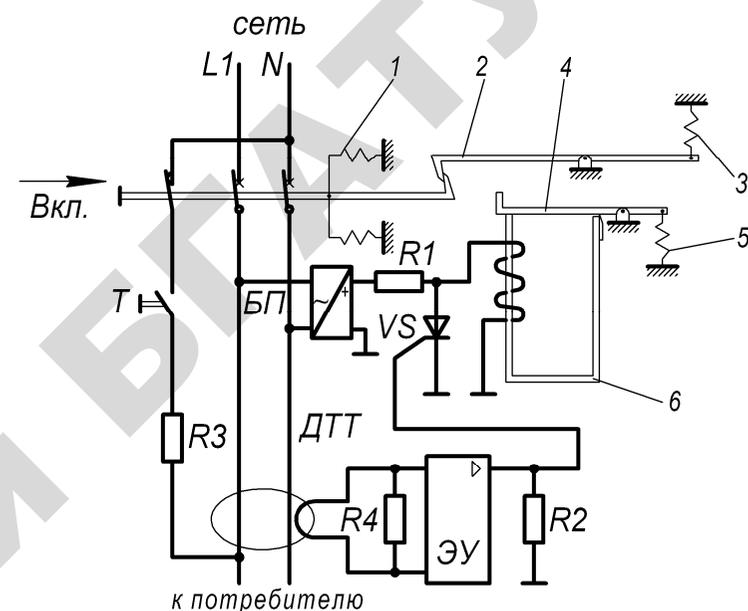


Рисунок 5.7 – Электронное УЗО, совмещенное с выключателем нагрузки и имеющее реле с функцией самоудержания:

1 – возвратная пружина выключателя; 2 – рычаг; 3, 5 – пружины защелки и реле; 4 – якорь; 6 – удерживающее реле; БП – блок питания; У – электронный усилитель; VS – тиристор; R1-R4 – резисторы; Т – кнопка «Тест»

Недостаток электронных УЗО с самоудержанием – малая надежность в связи с наличием большого количества электронных элементов, подвергаемых воздействию перенапряжений в сети и влиянию окружающей среды. УЗО, не имеющие функций самоконтроля и самоудержания, не работоспособны при обрыве нулевого проводника в цепи до УЗО и при потере питания электронного блока.

### Электромеханические УЗО

Электромеханические УЗО не содержат усилителей. Основные элементы УЗО следующие:

- 1) дифференциальный трансформатор;
- 2) удерживающее реле с постоянным магнитом;
- 3) выключатель нагрузки.

В удерживающем реле с постоянным магнитом (рисунок 5.8) якорь 2 притянут к сердечникам 5 и 7 при отсутствии тока в обмот-

ке возбуждения 1. Пружина 3 при этом растянута. Магнитный поток постоянного магнита 6 входит в якорь 2 и удерживает его в притянутом к сердечнику состоянии. Часть магнитного потока замыкается через магнитный шунт 8. Он предназначен для стабилизации напряженности магнитного поля постоянного магнита.

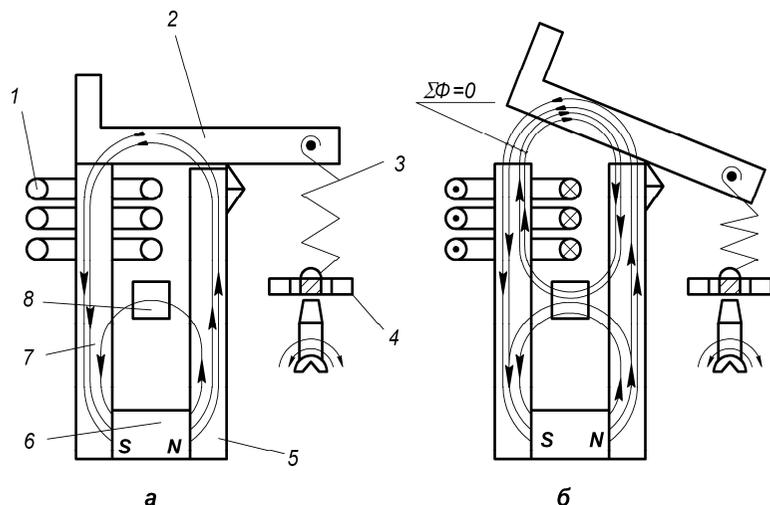


Рисунок 5.8 – Удерживающее реле (расцепитель) УЗО с постоянным магнитом при отсутствии (а) и при наличии тока утечки (б):

1 – обмотка возбуждения; 2 – якорь; 3 – пружина; 4 – винт регулировки натяжения; 5, 7 – полюсные сердечники; 6 – магнит; 8 – магнитный шунт

При появлении переменного тока в обмотке 1 (рисунок 5.8, б) в магнитопроводе создается второй магнитный поток. В течение одной полуволны тока он будет направлен в сторону магнитного потока от постоянного магнита, а в течение другой полуволны тока – навстречу магнитному потоку от постоянного магнита, компенсируя его воздействие на якорь. При некотором токе произойдет компенсация магнитного потока постоянного магнита на такую величину, что якорь 2 под действием растянутой пружины 3 отойдет от сердечников. Произойдет удар выступающей части якоря по защелке выключателя (защелка и выключатель на рисунке 5.8 не показаны). Выключатель сработает и отключит нагрузку от сети.

Следует отметить, что одна полуволна переменного тока усиливает притяжение якоря к сердечникам, а вторая уменьшает его. Чтобы избежать воздействия на якорь знакопеременных сил,

в обмотку 1 пропускают только одну полуволну тока, вызывающую размагничивание сердечника. Вторая полуволна тока шунтируется диодом, включенным параллельно катушке.

На рисунке 5.9 изображено устройство трехфазного четырехполюсного УЗО на базе выключателя нагрузки. Удерживающее реле 4 имеет постоянный магнит. Выходное напряжение ДТТ 6 подается на диод 5 и далее на обмотку реле 4. Одна полуволна напряжения шунтируется диодом 5. При отсутствии утечки тока в силовой сети суммарный магнитный поток проводников фаз и нулевого рабочего проводника равен нулю. Во вторичной обмотке ДТТ не индуцируется ЭДС. Нагрузка остается включенной в сеть.

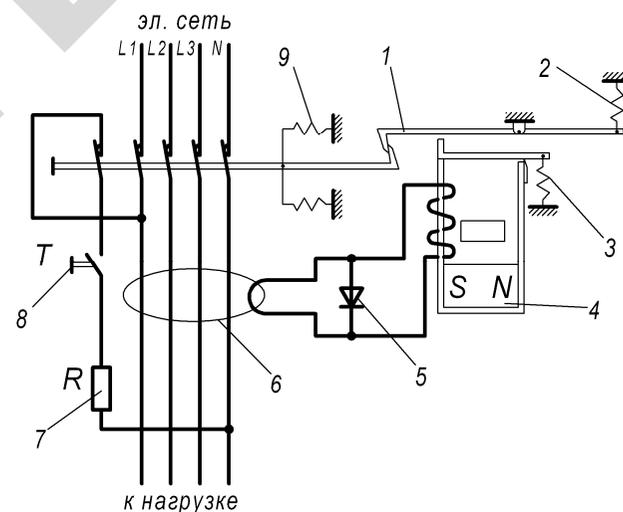


Рисунок 5.9 – Трехфазное электромеханическое УЗО с выключателем нагрузки и удерживающим реле с постоянным магнитом:

1 – защелка; 2 – пружина защелки; 3 – пружина, регулирующая силу натяжения якоря удерживающего реле; 4 – удерживающее реле с постоянным магнитом; 5 – шунтирующий диод; 6 – дифференциальный трансформатор тока (ДТТ); 7 – резистор цепи тестового контроля; 8 – кнопка «Тест»; 9 – пружина выключателя нагрузки

При появлении тока утечки в силовой сети в магнитопроводе ДТТ появляется нескомпенсированный магнитный поток, который индуцирует ЭДС во вторичной обмотке. Поскольку эта обмотка замкнута на обмотку удерживающего реле 4, то появляется ток в обмотке. Одна

полуволна тока шунтируется диодом 5, а вторая размагничивает сердечники удерживающего реле 4 и его якорь отрывается от сердечников, ударяет по защелке 1 и под действием пружины 9 контакты выключателя размыкаются. Нагрузка отключается от сети.

Для контроля неисправности УЗО служит кнопка «Тест» 8. При ее нажатии искусственно создается ток утечки от проводника *N* (после окна ДТТ) через резистор 7, кнопку 8, блок-контакт выключателя на фазу *A* (до окна ДТТ). Таким образом, этот ток проходит один раз через окно ДТТ и аналогичен по действию действительной утечке в сети. Величина сопротивления резистора подбирается такой, чтобы создать паспортный ток утечки УЗО.

Электромеханические УЗО не содержат усилителей, поэтому надежнее электронных УЗО. Электромеханические УЗО выпускают ведущие европейские фирмы (ABB, AEG; Siemens, Merlin-Gerin, Legrand, ABL Sursum, Vaco, Gircutor, GE Power, Hager, Корр и другие). В Германии, Австрии, Франции электротехнические нормы допускают применение только электромеханических УЗО. Электронное УЗО разрешено применять только в качестве дополнительной защиты для конечных потребителей, например, электрических инструментов.

В России электромеханическое УЗО под маркой АСТРО\*УЗО выпускает государственное предприятие ОПЗ МЭИ [55] и компания ИЭК (УЗО типа ВД-1-63) и другие.

Достоинства электромеханических УЗО:

- 1) высокая надежность;
- 2) отсутствие потребляемой электроэнергии (электронные УЗО потребляют от 4 до 8 Вт);
- 3) сеть и нагрузка могут быть подключены с любой стороны на верхние или нижние клеммы УЗО.

Недостаток электромеханических УЗО – они дороже электронных УЗО.

#### **Совмещенные УЗО (с автоматическими выключателями)**

УЗО, совмещенное с автоматическим выключателем, представляет собой устройство, в котором, помимо электромагнитного и теплового расцепителей, размещен ДТТ и магнитоэлектрический расцепитель (реле), а также кнопка «Тест» и тестовый резистор. Механизм расцепления такого выключателя действует от трех расцепителей. Устройство УЗО, совмещенное с автоматическим выключателем во включенном состоянии изображено на рисунке 5.10. Все расцепители при срабатывании движутся вверх и воздействуют на защелку 2.

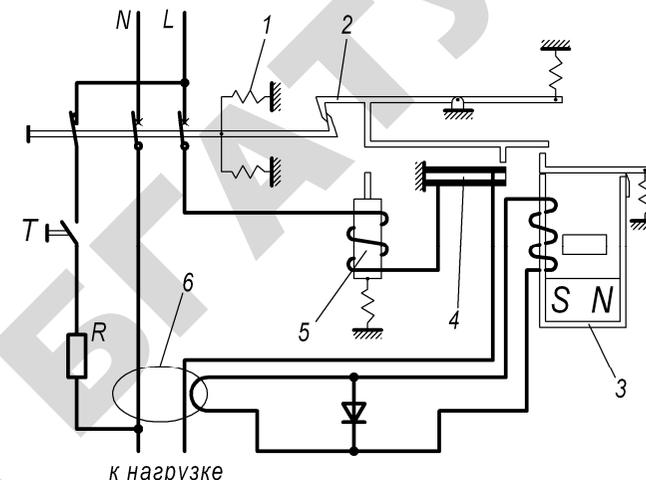


Рисунок 5.10 – Устройство однофазного электромеханического УЗО со встроенной защитой от сверхтоков:

- 1 – основная пружина автоматического выключателя; 2 – защелка;
- 3 – магнитоэлектрический расцепитель; 4 – тепловой расцепитель;
- 5 – электромагнитный расцепитель максимального тока; 6 – ДТТ

УЗО, совмещенные с автоматическими выключателями, называют дифференциальными автоматами. Они имеют более сложную конструкцию, чем электронные или электромеханические УЗО, но перспективны. Их доля в общем объеме выпускаемых УЗО пока не превышает 1–2 % [55]. Применение данных УЗО целесообразно для одиночных потребителей электроэнергии, требующих защиты от сверхтока и от опасных токов утечки. В России такие устройства выпускаются типов АД12, АД14, АДТ (Москва, ИЭК), УЗО-ВАД2 (г. Ставрополь «Энергомера»), УЗО-ДМ (Дивнагорский завод низковольтной аппаратуры), СВДТ «Щит» (г. Москва).

По числу полюсов УЗО разделяют на двухполюсные, трехполюсные и четырехполюсные.

По условиям регулирования отключающего дифференциального тока УЗО делятся на устройства с одним значением и с несколькими переключаемыми значениями тока утечки.

По условиям реагирования на форму тока УЗО делятся на следующие типы:

**АС** – реагирующий на синусоидальный переменный дифференциальный ток утечки, нарастающий медленно или возникающий скачком;

Вид тока утечки	Форма кривой тока утечки	Диапазон срабатывания	Тип УЗО
3. Однополупериодный ток с наложением постоянного тока без пульсации 6 мА		Макс. $1,4 I_{\Delta H}$ + 6 мА	<i>A; B</i>
4. Постоянный ток утечки без пульсации (внезапно появившийся или медленно возрастающий)		$(0,5 \dots 2) I_{\Delta H}$	<i>B</i>

\* $I_{\Delta H}$  – номинальный отключающий дифференциальный ток.

Из таблицы 5.1 следует, что в случае пульсирующих постоянных токов диапазон срабатывания по сравнению с переменным током увеличен в 1,4 раза, а для постоянного тока без пульсаций – в 2 раза. При любой форме тока универсальное УЗО типа *B* срабатывает.

*A* – реагирующий как на синусоидальный переменный дифференциальный ток утечки, так и на пульсирующий постоянный дифференциальный ток, нарастающий медленно или возникающий скачком;

*B* – универсальные, реагирующие на синусоидальный, пульсирующий ток и постоянный ток утечки.

УЗО типа *AC* имеют на корпусе символ УЗО типа *A* – символ УЗО типа *B* – символ

В бытовых и промышленных установках постоянно увеличивается применение электронных устройств, например, выпрямителей, тиристорных преобразователей напряжения, преобразователей частоты и т. д., у которых как рабочие токи, так и токи утечки отличаются от нормальной синусоидальной формы. В таблице 5.1 приведены токи срабатывания УЗО в зависимости от формы кривой тока утечки, согласно стандарту DIN VDE 0664.

Таблица 5.1 – Токи срабатывания УЗО, предписанные согласно DIN VDE 0664 для устройств, реагирующих на переменные, пульсирующие постоянные токи утечки и на постоянные токи утечки без пульсаций

Вид тока утечки	Форма кривой тока утечки	Диапазон срабатывания	Тип УЗО
1. Переменный: - внезапно появляющийся - медленно возрастающий		$(0,5 \dots 1,0) I_{\Delta H}^*$	<i>AC; A; B</i>
2а. Пульсирующий постоянный ток утечки (положительные и отрицательные полуволны), а также однополупериодный ток, внезапно появляющийся или медленно возрастающий		$(0,35 \dots 1,4) I_{\Delta H}$	<i>A; B</i>
2б. Однофазный ток с отсечкой: - угол отсечки 90° - угол отсечки 135°		$(0,25 \dots 1,4) I_{\Delta H}$ $(0,11 \dots 1,4) I_{\Delta H}$	

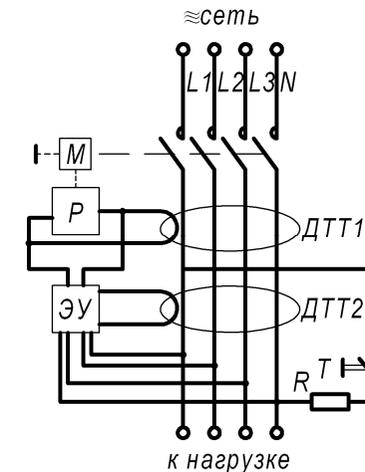


Рисунок 5.11 – Принципиальная схема универсального УЗО типа *B* фирмы Siemens: *M* – механизм расцепления выключателя; *P* – расцепитель магнитоэлектрический; *ДТТ1* – дифференциальный трансформатор тока для обнаружения синусоидальных токов утечки; *ДТТ2* – дифференциальный трансформатор тока для обнаружения постоянных токов утечки без пульсаций; *ЭУ* – электронный усилитель; *T* – кнопка «Тест»

На рисунке 5.11 показано устройство универсального УЗО фирмы Siemens. Оно выполнено на базе выключателя нагрузки. Универсальное УЗО имеет два ДТТ. Первый ДТТ1 служит для обнаружения синусоидальных токов утечки, а второй ДТТ2 – для обнаружения постоянных токов утечки без пульсаций. Первый ДТТ1 нагружен на магнитоэлектрический расцепитель  $P$ , а второй ДТТ2 – на электронный усилитель ЭУ. Выход усилителя соединен также с расцепителем  $P$ . При появлении тока утечки любой формы УЗО срабатывает.

По наличию задержки времени на срабатывание УЗО бывают без задержки (тип общего применения) и УЗО с задержкой (тип  $S$ , селективный и тип  $G$  – с меньшей выдержкой времени). УЗО без задержки времени на срабатывание используют в ответвлениях к нагрузке, а УЗО селективные – на линиях (магистралах).

#### 5.4. Параметры устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током

Основные параметры УЗО определяют ГОСТ Р50807-95, ГОСТ 51326.1-99 и ГОСТ Р51327.1-99.

*Номинальное напряжение  $U_n$*  – действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО. Обычно в силовых электрических сетях  $U_n = 220$  или  $380$  В. На это напряжение рассчитана изоляция УЗО и питание их усилителей. Для электромеханических УЗО работоспособность сохраняется при любых значениях напряжений, поскольку они не содержат усилителей.

*Номинальный ток нагрузки  $I_n$*  – значение тока в силовой цепи, которое УЗО может пропускать в продолжительном режиме работы при температуре воздуха  $+30$  °С, не перегреваясь выше допустимого значения. Номинальный ток УЗО выбирается из следующего ряда: 6; (8); (10); (13); 16; (20); 25; (32); 40; 63; 80; 100; 125 А (в скобках указан неpreferred ток). Значение тока  $I_n$  определяет сечение проводников в самом устройстве, размер ДТТ, а в совмещенных конструкциях с автоматическими выключателями – размер присоединительных зажимов и ток электромагнитного расцепителя. В УЗО, имеющих электромагнитный пускатель,  $I_n$  соответствует номинальному току электромагнитного пускателя.

*Номинальный отключающий дифференциальный ток  $I_{\Delta n}$*  – значение уставки дифференциального тока, которое вызывает

отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации. УЗО высокой чувствительности имеют  $I_{\Delta n} = 6; 10; 30$  мА; УЗО средней чувствительности –  $I_{\Delta n} = 100$  и  $300$  мА; УЗО низкой чувствительности –  $I_{\Delta n} = 500$  мА.

*Номинальный неотключающий дифференциальный ток  $I_{\Delta no}$*  – значение дифференциального тока, которое не вызывает отключение УЗО при заданных условиях эксплуатации. Для синусоидального тока частотой  $50$  Гц  $I_{\Delta no} = 0,5I_{\Delta n}$ . Это означает, что значение дифференциального синусоидального тока, при котором УЗО автоматически срабатывает, должно находиться в диапазоне от  $0,5I_{\Delta n}$  до  $1I_{\Delta n}$ . Для других несинусоидальных токов диапазон срабатывания приведен в таблице 5.1.

*Предельное значение неотключающего сверхтока  $I_{nm}$*  – минимальное значение неотключающего сверхтока при симметричной нагрузке двух- и четырехполюсных УЗО или несимметричной нагрузке четырехполюсного УЗО. Это значение равно  $6I_n$  (ГОСТ Р51326-99). Параметр  $I_{nm}$  характеризует способность УЗО не реагировать на симметричные токи КЗ и перегрузки до определенного значения. При больших значениях сверхтока, чем  $6I_n$ , УЗО может ложно срабатывать в связи с насыщением ДТТ и появлением во вторичной обмотке апериодической составляющей тока небаланса, превышающую порог чувствительности расцепителя УЗО.

Для УЗО с защитой от сверхтоков данный параметр имеет другой смысл, поскольку УЗО отключается автоматическим выключателем при достижении уставки от сверхтока. Для расцепителей автоматических выключателей типа  $B$  уставки мгновенного расцепителя составляют  $2,4I_n$ , типа  $C$  –  $4I_n$  и типа  $D$  –  $8I_n$ . Следовательно, УЗО не должно отключаться при симметричных сверхтоках, близких к этим значениям. При проверке УЗО по этому параметру обычно принимают  $I_{nm} = 0,8I_{эм}$ , где  $I_{эм}$  – ток срабатывания мгновенного расцепителя автоматического выключателя.

*Номинальная включающая и отключающая способность (коммутационная способность)  $I_m$*  – это среднеквадратическое значение переменной составляющей ожидаемого тока, указанное изготовителем, которое УЗО способно включить, проводить и отключить при заданных условиях (при наличии в главной цепи УЗО отключающего дифференциального тока). Этот показатель определяет качество и надежность УЗО. Согласно требованиям ГОСТ Р 51326.1-99  $I_m > 10I_n$  или  $500$  А (берется большее значение).

Номинальная включающая и отключающая способность по дифференциальному току ( $I_{\Delta n}$ ) – действующее значение ожидаемого дифференциального тока, которое УЗО способно включить, пропустить в течение своего времени размыкания и отключить при заданных условиях эксплуатации без нарушения его работоспособности.

Минимальное значение  $I_{\Delta n} = 10I_n$  или 500 А (выбирается большее значение).

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

$I_{nc}$  должен составлять не менее 3000 А. Другие значения: 4500, 6000 и 10000 А. Западноевропейские УЗО имеют  $I_{nc}$  не менее 6 кА (до 15 кА). Значение  $I_{nc}$ , как важнейшего параметра УЗО, должно быть приведено на лицевой панели устройства в виде символа «» и в технической информации на устройство.

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

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

Стандартные значения максимального допустимого времени отключения УЗО приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Стандартные значения времени отключения и неотключения УЗО

Тип УЗО	$I_n$ , А	$I_{\Delta n}$ , мА	Время (с) при дифференциальном токе				Параметр времени
			$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$	500 А	
АС, А	Любое значение		0,3	0,15	0,04	0,04	Максимальное время отключения
S			0,5	0,2	0,15	0,15	
	$\geq 25$	$> 30$	0,13	0,06	0,05	0,04	Максимальное время неотключения

Максимальное время неотключения (несрабатывания) для УЗО типа S есть максимальный промежуток времени с момента возникновения отключающего дифференциального тока до момента трогания размыкающих контактов. Это время выдержки селективного УЗО при многоуровневой системе защиты.

Из таблицы 5.2 следует, что наибольшее допустимое время отключения УЗО типов А, АС составляет 0,3 с, а типа S – 0,5 с.

В действительности современные электромеханические УЗО имеют быстроедействие 0,02–0,03 с.

Однофазные КЗ такие УЗО могут отключать быстрее, чем аппараты защиты от сверхтока, и разрывать ток КЗ контактами, не рассчитанными на отключение тока КЗ. Чтобы избежать этого, рекомендуется с УЗО применять последовательно включенные автоматические выключатели с номинальным током на одну ступень меньшим, чем номинальный ток УЗО. Например, если УЗО имеет номинальный ток 25 А, то автоматический выключатель должен иметь номинальный ток 16 А.

Если УЗО и автоматический выключатель имеют равные номинальные токи, то существует вторая опасность – перегрев УЗО при нагрузках. Например, если ток перегрузки стал  $1,4I_{норм.расц.}$ , то срабатывание теплового расцепителя автоматического выключателя может произойти за период времени 60 мин. За это время УЗО может перегреться. Поэтому требование увеличить номинальный ток УЗО по отношению к автоматическому выключателю оправдано. Очевидно, что этот недостаток органически присущ УЗО со встроенной защитой от сверхтока.

Интеграл Джоуля УЗО  $\int i^2 dt$  – количество энергии, которое способно выдержать УЗО при сверхтоках. Интеграл Джоуля позволяет оценить стойкость УЗО к выделенному теплу.

Для УЗО со встроенным автоматическим выключателем интеграл Джоуля относится к автоматическому выключателю. Пример характеристик интеграла Джоуля для УЗО типа АСТРО\*УЗО производства ГП ОПЗ МЭИ, без встроенной защиты от сверхтоков приведен на рисунке 5.12.

Обычно интеграл Джоуля УЗО во много раз больше интеграла Джоуля автоматического выключателя при одинаковых номинальных токах.

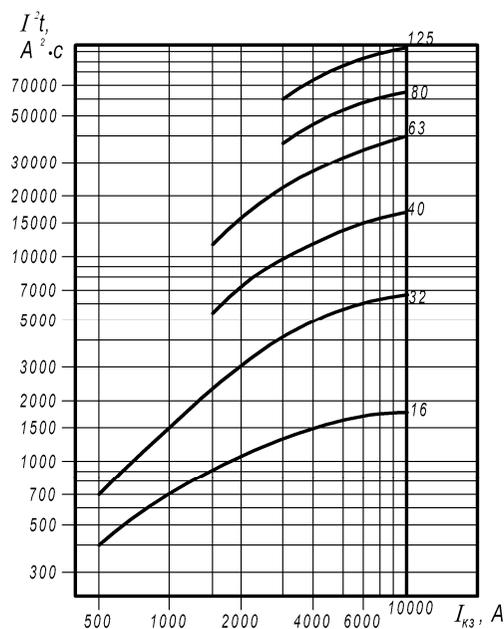


Рисунок 5.12 – Характеристики интеграла Джоуля аппарата АСТРО\*УЗО без встроенной защиты от сверхтоков

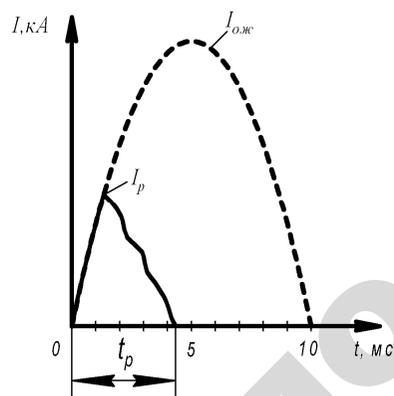


Рисунок 5.13 – Токоограничение в силовой цепи УЗО, обеспечиваемое последовательно включенным автоматическим выключателем:  
 $I_p$  – пиковый ток при отключении, А;  $I_{ож}$  – ожидаемый ток КЗ, кА;  
 $t_p$  – время отключения, мс

УЗО должны включаться обязательно с автоматическим выключателем. При КЗ автоматический выключатель обеспечит токоограничение в силовой цепи УЗО. При этом ток КЗ не достигнет амплитудного значения, а оборвется раньше, при пиковом токе  $I_p$  (рисунок 5.13).

В случае, если интеграл Джоуля для УЗО не определен, то принимают его минимальные значения и значения пикового тока  $I_p$  согласно ГОСТ Р 51326.1-99 по таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Минимальные стандартные значения интеграла Джоуля  $\int i^2 dt$  и пикового тока  $I_p$  для УЗО

Номинальные токи УЗО, А	Параметры	Значения тока $I_p$ , КА, интеграла Джоуля, КА <sup>2</sup> ·с, при номинальном условном токе короткого замыкания $I_{пс}$ , КА			
		3	4,5	6	10
16	$I_p$	1,1	1,15	1,3	1,45
	$I^2t$	1,2	1,45	1,6	1,9
20	$I_p$	1,2	1,3	1,4	1,8
	$I^2t$	1,8	2,1	2,4	2,7
25	$I_p$	1,4	1,5	1,7	2,2
	$I^2t$	2,7	3,1	3,7	4
32	$I_p$	1,85	2,05	2,3	2,6
	$I^2t$	4,5	5	6	6,5
40	$I_p$	2,35	2,7	3	2,3
	$I^2t$	8,7	9,7	11,5	12
63	$I_p$	3,3	3,9	4,05	4,3
	$I^2t$	2,25	24	25	28
80	$I_p$	2,5	4,3	4,7	5,1
	$I^2t$	26	31	31	31
100	$I_p$	3,8	4,8	5,3	6
	$I^2t$	42	45	48	48
125	$I_p$	3,95	5,6	5,6	6,4
	$I^2t$	72,5	82	82	82

Кроме указанных выше параметров, в технической документации УЗО указывают другие параметры (число циклов «Вкл. - Откл.» для электрической и механической части, диапазон рабочих температур, максимальное сечение подключаемых проводников и т. д.).

### 5.5. Маркировка устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током

На каждом УЗО должна быть стойкая маркировка, в которой указываются все или, при малых размерах УЗО, отдельные данные:

1. Наименование или торговый знак (марка) производителя.
  2. Обозначение типа, номера по каталогу или номера серии.
  3. Номинальное напряжение  $U_n$ .
  4. Номинальная частота, если УЗО разработано для частоты, отличной от 50 и (или) 60 Гц.
  5. Номинальный ток  $I_n$ .
  6. Номинальный отключающий дифференциальный ток  $I_{\Delta n}$ .
  7. Номинальная включающая и отключающая способности  $I_m$ .
- Для УЗО со встроенной защитой от сверхтоков – номинальная наибольшая коммутационная способность  $I_{cn}$ .
8. Номинальная включающая и отключающая способность по дифференциальному току  $I_{\Delta m}$  (если она отличается от номинальной включающей и отключающей способности УЗО).
  9. Номинальный условный ток короткого замыкания  $I_{nc}$  в виде символа «», где 10 000 означает 10 кА.
  10. Степень защиты (только в случае степени защиты, отличающейся от IP20).
  11. Символ [S] или [G] (для селективных устройств).
  12. Указание, что УЗО функционально зависит от напряжения сети, если это имеет место.
  13. Обозначение органа управления контрольным устройством – кнопки «Тест» – буквой «Т».
  14. Схема подключения.
  15. Рабочая характеристика: тип AC – символ ; тип A – символ ; тип B – символ .
  16. Штрих-код.

Маркировка по пп. 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 15 должна быть расположена так, чтобы быть видимой после монтажа УЗО.

Информация об устройстве по пп. 1, 7, 14, 16 может быть нанесена на боковой или задней поверхности устройства (видимых только до установки изделия).

Информация об устройстве по пп. 4, 10, 12, а также значения интеграла Джоуля  $I^2t$  и пикового тока  $I_p$  должны быть приведены в эксплуатационной документации.

Выводы, предназначенные исключительно для соединения цепи нулевого рабочего проводника, должны быть обозначены буквой «N».

Стандартные значения температуры окружающей среды ( $-5...-40\text{ }^\circ\text{C}$ ) могут не указываться. Диапазон температур ( $-25...-40\text{ }^\circ\text{C}$ ) обозначается символом .

Наличие штрих-кода является показателем качества изделия и гарантией от фальсификации.

Согласно ГОСТ Р 51326.1-99 изготовитель должен гарантировать надежную работу УЗО в течение не менее 5 лет с момента ввода в эксплуатацию.

### 5.6. Выбор устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током

УЗО с ДТТ выбирают по следующим параметрам:

- 1) номинальному напряжению  $U_n$ ;
- 2) номинальному току  $I_n$ ;
- 3) номинальному отключающему дифференциальному току  $I_{\Delta n}$ ;
- 4) условию реагирования на форму тока (тип AC, A, B);
- 5) числу полюсов;
- 6) степени защиты.

Проверяют выбранное УЗО:

- 1) по номинальному условному току КЗ  $I_{nc}$ ;
- 2) по условиям селективности;
- 3) по условиям защиты от сверхтоков и согласования характеристик УЗО с аппаратами защиты от сверхтоков.

При выборе УЗО руководствуются следующим:

1.  $U_n \geq U_{\text{сети}}$ .
2.  $I_n \geq I_{n,\text{вет}}$ , причем знак  $>$  предпочтителен.

Шкала номинальных токов УЗО: 6(6,3); 16; 25; 40; 63; 80; 100; 125 А.

При выборе  $I_n$  УЗО следует обращать внимание на ток стоящего выше (по направлению подачи энергии) автоматического выключателя. Необходимо, чтобы номинальный ток УЗО был на 1 ступень больше номинального тока автоматического выключателя, т. е.  $I_{n,\text{УЗО}} > I_{n,\text{QF}}$ .

3. Согласно ПУЭ [11, п. 7.1.83], номинальный отключающий предельный ток  $I_{\Delta n}$  должен быть в три раза больше «фонового» тока утечки защищаемой цепи, т. е.

$$I_{\Delta n} \geq 3I_{\Delta}, \quad (5.5)$$

где  $I_{\Delta}$  – суммарный «фоновый» ток утечки защищаемой цепи электроустановки, мА.

«Фоновый» ток утечки (мА) цепи вычисляется по формуле

$$I_{\Delta} \geq 0,4I_n + 0,01L. \quad (5.6)$$

С учетом формулы (5.5) имеем:

$$I_{\Delta n} \geq 3(0,4I_n + 0,01L), \quad (5.7)$$

где  $I_n$  – номинальный ток электроустановки, А;

$L$  – длина фазного проводника от места установки УЗО до клемм потребителя, м.

Стандартные значения  $I_{\Delta n}$  равны 10, 30, 100, 300, 500 мА (иногда 1000 мА).

Суммарный ток утечки электроустановки замеряется специальными приборами или определяется путем расчета.

При определении расчетного тока для нескольких цепей рекомендуется учитывать коэффициенты нагрузки  $K_n$ . Например, согласно стандарту DIN VDE 0660 (часть 500 раздел 4.7), при числе цепей главного тока 2 и 3  $K_n = 0,9$ ; при 4 и 5 –  $K_n = 0,8$ ; при 6 и 7 –  $K_n = 0,7$ ; при 10 и более –  $K_n = 0,6$ . Ориентировочные значения коэффициентов нагрузки потребителей в административных зданиях следующие: освещение –  $K_n = 0,85–0,95$ ; кондиционер –  $K_n = 1$ ; лифты (эскалаторы) –  $K_n = 0,7–1$ ; штепсельные розетки –  $K_n = 0,1–0,15$ ; другое оборудование –  $K_n = 0,5–0,85$ . Для других объектов (больницы, магазины и т. д.) коэффициент нагрузки незначительно изменяется. С учетом этого замечания в формулу (5.6) вводится множитель  $K_n$ . Теперь ток утечки УЗО (мА) определяется по формуле

$$I_{\Delta n} \geq 3 \cdot (0,4 \sum K_n I_p + 0,01 \sum K_n l), \quad (5.8)$$

где  $\sum K_n I_p$  – суммарный ток цепей с учетом коэффициента нагрузки, А;

$\sum K_n l$  – суммарная длина цепей с учетом коэффициента нагрузки, м.

Рекомендации по выбору уставки УЗО ( $I_{\Delta n}$ ) приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Рекомендации по выбору уставки УЗО ( $I_{\Delta n}$ )

Параметр	Дифференциальный ток утечки УЗО, мА, при токе силовой цепи, А				
	16	25–32	40–50	63	80–100
Защита одиночного потребителя, мА	10	30	30	30	100
Защита группы потребителей, мА	30	30	30 (100)	100	300
УЗО противопожарного назначения, мА	300	300	300	300	500

4. По условию реагирования на форму тока УЗО предназначены: для синусоидального тока (тип *АС*); для синусоидального и пульсирующего токов (тип *А*); для синусоидального, пульсирующего и постоянного токов (тип *В*).

Для цепей с заведомо известным синусоидальным током выбирается УЗО типа *АС*, например, в цепях асинхронного электродвигателя применяются УЗО типа *АС*.

Если в электроустановке имеются выпрямители, тиристорные регуляторы и другие приборы, вызывающие импульсные, пульсирующие постоянные токи, то выбираются УЗО типа *А*. Следует отметить, что в жилых и административных зданиях, в гаражах и т. п. объектах, как правило, должно применяться УЗО типа *А* в связи с широким использованием в быту и в организациях компьютеров, электронных регуляторов и приборов с бестрансформаторным питанием. Поэтому в цепях розеток используют УЗО типа *А*. УЗО типа *А* предпочтительнее, чем УЗО типа *АС*.

Если в электроустановке возможно появление постоянной составляющей тока утечки (см. таблицу 5.1), то используется УЗО типа *В*. УЗО типа *В* распространены крайне мало. Его применяют в специальных промышленных электроустановках, имеющих переменное, выпрямленное и постоянное напряжение.

5. По числу полюсов УЗО бывают: 2-полюсные – для однофазной нагрузки; 3- и 4-полюсные – для трехфазной нагрузки.

Для однофазных потребителей применяют 2-полюсное УЗО, а для трехфазных – 4-полюсные УЗО. Эти УЗО имеют один полюс

для коммутации нулевого рабочего проводника. Для трехфазной симметричной нагрузки может использоваться трехфазное УЗО. Но этот вариант встречается редко. Кроме того, через 4-полюсное УЗО может быть подключена однофазная, двухфазная или трехфазная несимметричная нагрузка. При этом УЗО должно быть подключено таким образом, чтобы была обеспечена питанием цепь контрольного устройства, состоящего из резистора и кнопки.

6. Степени защиты УЗО обычно бывают IP20, IP25, IP40 (ГОСТ Р 14254-96 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP)»). Для размещения в шкафу достаточна степень защиты IP20. При монтаже вне шкафа УЗО требуется заключать в отдельную оболочку степени защиты IP56.

Проверка выбранного УЗО выполняется по нижеприведенным параметрам.

1. Проверка УЗО по номинальному условному току КЗ  $I_{нКЗ}$  или номинальному условному дифференциальному току КЗ  $I_{\Delta КЗ}$

$$\begin{aligned} I_{нКЗ} &> I_{КЗ}^{(3)}, \\ I_{\Delta КЗ} &> I_{КЗ}^{(1)}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где  $I_{КЗ}^{(3)}$  и  $I_{КЗ}^{(1)}$  – трехфазный и однофазный токи КЗ в начале линии, где установлено УЗО, кА;

Трехфазный ток  $I_{КЗ}^{(3)}$  в точке подключения УЗО определяется расчетом или путем измерения специальными приборами в реальной установке.

2. Проверка УЗО на селективность. В связи с высоким быстродействием УЗО практически невозможно обеспечить селективность его действия по току утечки при значениях уставок на соседних ступенях защиты, например, 10, 30, 100 мА. Селективность работы УЗО может быть обеспечена применением модификаций с задержкой срабатывания. Такие УЗО имеют на корпусе обозначения S или G. УЗО с обозначением S имеют выдержку времени от 0,13 до 0,5 с при номинальном токе утечки, а с обозначением G – от 0,01 до 0,3 с при номинальном токе утечки. С увеличением тока утечки время срабатывания УЗО уменьшается. На рисунке 5.14 показаны защитные характеристики УЗО типа AC на ток 30 мА и селективного УЗО типа S на ток 300 мА.

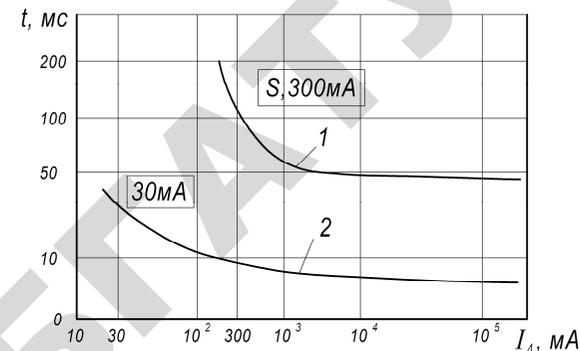


Рисунок 5.14 – Времятоковые характеристики УЗО: 1 – типа S; 2 – типа AC

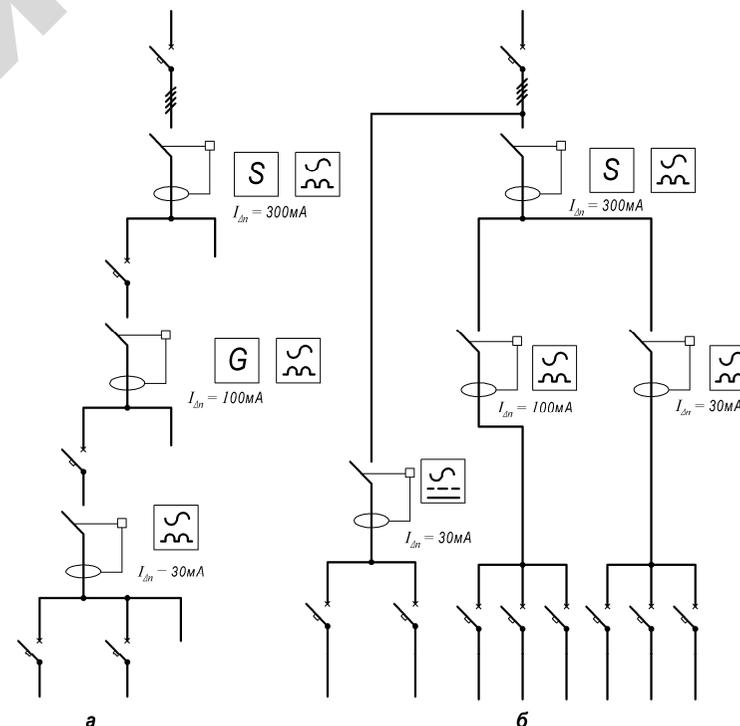


Рисунок 5.15 – Схемы с УЗО трех уровней селективности (а) и двух уровней селективности с отдельной цепью для универсального УЗО типа B (б)

Проверка на селективность обычно выполняется для разветвленной сети, когда УЗО устанавливаются для отдельных потребителей, далее эти потребители объединяются в группу, на вводе которой устанавливается УЗО, и далее на вводе устанавливается вводное УЗО (рисунок 5.15).

При двухступенчатой и многоступенчатой схемах УЗО, расположенные ближе к источнику питания, должны иметь уставку и время срабатывания не менее чем в три раза большую, чем УЗО, расположенные ближе к потребителю.

Простым увеличением уставок дифференциального тока, например, 30, 100 и 300 мА, селективности не добиться, поскольку при повреждении изоляции ток утечки сразу может составлять более 300 мА. В этом случае выбираются на вводе (или на группе) селективные УЗО типа *G* или *S*.

Электрические цепи с потребителями, которые могут создать переменные токи утечки, пульсирующие постоянные или утечки постоянного тока без пульсаций должны запитываться от отдельной линии (рисунок 5.15). В этой линии устанавливается УЗО типа *B*, имеющее символ .

3. Проверка УЗО на интеграл Джоуля. Применяемый для защиты от сверхтока автоматический выключатель в одной цепи с УЗО должен иметь интеграл Джоуля  $\int i^2 t$  меньше, чем интеграл Джоуля (и пиковый ток) применяемого УЗО.

Это условие записывается в виде

$$\int i^2 t_{QF} < \int i^2 t_{УЗО}, \quad (5.10)$$

$$I_{пр.QF} < I_p,$$

где  $\int i^2 t$  – интеграл Джоуля,  $A^2 \cdot c$ ; находится по графику  $\int i^2 t = f(I_{ож})$ , где  $I_{ож}$  – ожидаемый ток КЗ, кА;

$I_{пр.QF}$  – пропускаемый ток токоограничения автоматического выключателя, кА; находится по графику  $I_{пр.QF} = f(I_0)$ ;

$I_p$  – пиковый ток УЗО, кА; приводится в таблице 5.3 для  $I_{нС} (I_{\Delta C}) = 3$  кА.

4. Проверка защиты УЗО от токов КЗ и перегрузки осуществляется на основании требований ПУЭ: «... не допускается использовать

УЗО в групповых линиях, не имеющих защиты от сверхтока, без дополнительного аппарата, обеспечивающего защиту от сверхтока.

При использовании УЗО, не имеющих защиты от сверхтока, необходима их расчетная проверка в режимах сверхтока с учетом защитных характеристик вышестоящего аппарата, обеспечивающего защиту от сверхтока» [11, п. 7.1.76].

В частности, номинальный ток УЗО  $I_n$  должен быть на 1 ступень больше, чем номинальный ток теплового расцепителя  $I_{н.расц.QF}$  автоматического выключателя, т. е.

$$I_n > I_{н.расц.QF}. \quad (5.11)$$

Электромагнитный расцепитель автоматического выключателя и УЗО должны удовлетворять условиям

$$I_{эм.QF} < I_{нс} > I_{КЗ}^{(3)},$$

$$I_{эм.QF} < I_{\Delta C} > I_{КЗ}^{(3)}, \quad (5.12)$$

где  $I_{эм.QF}$  – ток отсечки электромагнитного расцепителя автоматического выключателя, А;

$I_{нс}$  – номинальный условный ток КЗ для УЗО, А;

$I_{КЗ}^{(3)}$  – трехфазный ток КЗ в месте установки УЗО, А;

$I_{\Delta C}$  – номинальный условный дифференциальный ток УЗО, А.

Рекомендации по выбору УЗО и автоматического выключателя приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Выбор УЗО и автоматического выключателя

Устройство	Номинальный ток $I_n$ , А							
	16	25	32	40	50	63	80	100
УЗО								
Автоматический выключатель	10	16	25	32	40	50	63	80

Принимать УЗО, имеющие  $I_{\Delta n} = 10$  мА, следует только:

- 1) для одиночных электроустановок с током нагрузки до 8 А;
- 2) для сантехнических кабин, ванных и душевых, если для них выделена отдельная линия;
- 3) для розеточных групп детских и школьных учреждений.

Принимать УЗО, имеющие  $I_{\Delta n} = 30$  мА, следует:

- 1) если одиночный электроприемник имеет рабочий ток до 25 А;
- 2) в индивидуальных домах для групповых линий;
- 3) для розеточных групп, установленных снаружи здания; в открытых электроустановках; на строительных площадках с розеточными однофазными группами до 16 А; на сельскохозяйственных электроустановках с розетками; в учебных помещениях и лабораториях и т. д. Уставка  $I_{\Delta n} = 30$  мА является самой распространенной в электроустановках.

Для защиты от пожаров, вызванных чрезмерными токами утечки, электрическая цепь должна иметь УЗО с отключающим током не более 300 мА. В частности, на вводе в дом, квартиру, гараж и тому подобные объекты рекомендуется УЗО с током срабатывания до 300 мА. Такой ток обеспечивает защиту электропроводки от пожаров из-за токов утечки [11, п.7.1.84].

Всегда следует выбирать наименьшее значение  $I_{\Delta n}$ , но при этом учитывать, что случайные «фоновые утечки» могут вызвать частые отключения УЗО. Необходимо помнить, что реальные значения отключаемого дифференциального тока УЗО типа АС находятся в диапазоне  $(0,5-1)I_{\Delta n}$ , а для УЗО других типов – в более широком диапазоне (см. таблицу 5.1).

Дифференциальные автоматические выключатели объединяют функции защиты от сверхтока и защиты по току утечки. В России трехфазные дифференциальные автоматы с электромагнитным расцепителем типа D не выпускаются. Известные четырехполюсные дифференциальные автоматы ООО «Интерэлектрокомплект» типа АД-14 имеют расцепители типов B и C. В цепях асинхронного электродвигателя их применять невозможно (требуются расцепители типа D).

### 5.7. Описание устройств защитного отключения

Выключатель дифференциальный ВД1-63 (рисунок 5.16) представляет собой быстродействующий защитный выключатель (УЗО), реагирующий на дифференциальный ток, без встроенной защиты от сверхтоков. Обеспечивает защиту человека от поражения электрическим током при случайном, непреднамеренном прикосновении к токоведущим частям электроустановок и предотвращает возникновение пожаров вследствие протекания токов утечки на землю. Не имеет собственного потребления электроэнергии и обладает высокой механической износостойкостью.



Рисунок 5.16 – Внешний вид выключателя дифференциального ВД1-63

Во всех случаях УЗО типа ВД1-63 необходимо последовательно устанавливать с автоматическим выключателем (аналогичного или меньшего номинала), так как функционально дифференциальный выключатель ВД1-63 не предусматривает защиты от сверхтока (короткого замыкания и перегрузки).

УЗО (или выключатель дифференциальный) ВД1-63 функционирует следующим образом: при протекании по силовым проводам тока нагрузки в магнитопроводе дифференциального трансформатора выключателя создаются равные, противоположно направленные и взаимно компенсирующие друг друга магнитные потоки. Во вторичной обмотке дифференциального трансформатора напряжения нет, якорь расцепителя притянут магнитом, механизм управления взведен.

Техническая характеристика выключателя дифференциального ВД1-63 приведена в таблице 5.6, а технические данные к выбору выключателя дифференциального ВД1-63 – в таблице 5.7.

Таблица 5.6 – Технические характеристики выключателя дифференциального ВД1-63

Технические характеристики	Значения
Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51326.1-99, ТУ 3421-033-18461115-0
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400
Номинальный ток, А	16, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА	10, 30, 100, 300
Номинальный условный дифференциальный ток короткого замыкания, А	3 000
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	< 40
Число полюсов	2, 4
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10 000
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм <sup>2</sup>	35
Наличие драгоценных металлов (серебро), г/полюс	0,6÷2,0
Масса (2/4-полюсные), кг	0,2/0,4
Диапазон рабочих температур, °С	-25 ... +40

Таблица 5.7 – Технические данные к выбору выключателя дифференциального ВД1-63

Типоисполнение	2-полюсные	4-полюсные
Соответствует стандартам	ГОСТ Р 51326.1-99, ТУ 3421-033-18461115-02	
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230	400
Номинальный ток, А	16–100	16–100
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА	10, 30, 100, 300	10, 30, 100, 300
Номинальный условный дифференциальный ток короткого замыкания, А	3 000	3 000

Окончание таблицы 5.7

Типоисполнение	2-полюсные	4-полюсные
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС	
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤40	
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10 000	

При появлении дифференциального тока (тока утечки) на заземленные элементы через поврежденную изоляцию токоведущих частей или через тело прикоснувшегося человека равенство магнитных потоков в магнитопроводе датчика нарушается. Если значение дифференциального тока окажется достаточным для создания (с помощью катушки расцепителя) магнитного потока в ярме, который уравнивает удерживающий поток «блокирующего» магнита (уставка срабатывания  $I_{\Delta n}$ ), возвратная пружина оторвет якорь от ярма и через подвижный шток ударит по поворотному элементу. Произойдет сброс механизма управления, выключатель отключится, даже если оператор удерживает рукоятку управления во взведенном положении.

Значение интеграла Джоуля и пикового тока, выдерживаемого ВД1-63, приведено в таблице 5.8, а время отключения УЗО типа ВД1-63 – в таблице 5.9.

Таблица 5.8 – Значение интеграла Джоуля и пикового тока, выдерживаемого ВД1-63

Номинальный ток $I_n$ , А	16	20	25	32	40	63	80	100
Интеграл Джоуля $I^2t$ , кА <sup>2</sup> ·с	1,2	1,8	2,7	4,5	8,7	22,5	26,0	42,0
Пиковый ток $I_p$ , кА	1,1	1,2	1,4	1,85	2,35	3,3	3,5	3,8

Таблица 5.9 – Время отключения УЗО типа ВД1-63

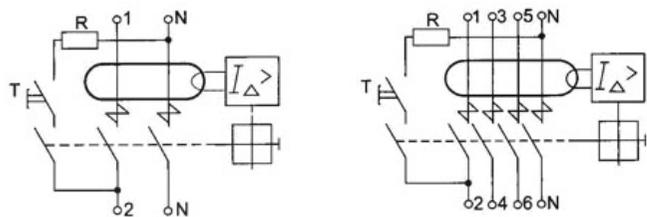
Тип	$I_n$	$I_{\Delta n}$	Максимальное время отключения при дифференциальном токе, с			
			$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$	500 А
АС	Любое значение	Любое значение	0,1	0,08	0,04	0,04

УЗО (или выключатель дифференциальный) ВД1-63 не потребляет электроэнергию и сохраняет работоспособность при обрыве нулевого проводника.

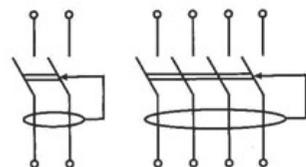
Тестирующая цепь выключателя сохраняет работоспособность в широком диапазоне напряжений: от 110 до 265 В (двухполюсное исполнение) и от 200 до 460 В (четырёхполюсное исполнение).

Электрические схемы, условные графические обозначения и габариты УЗО типа ВД1-63 приведены на рисунке 5.17.

#### Электрические схемы



#### Условное графическое обозначение



#### Габариты

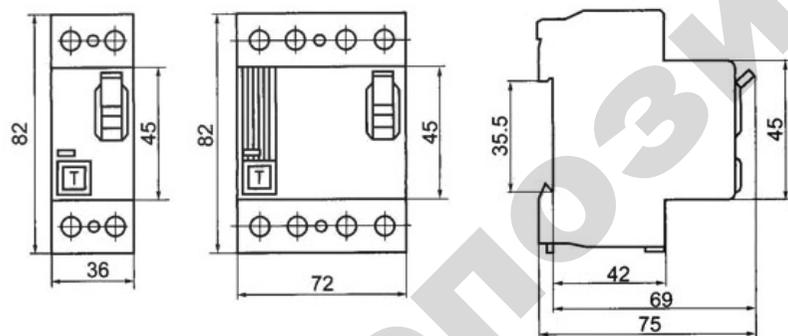
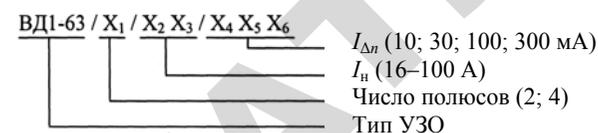


Рисунок 5.17 – Электрические схемы, условные графические обозначения и габариты УЗО типа ВД1-63

Структура условного обозначения типоразмеров УЗО серии ВД1:



Автоматы дифференциальные АД12 (рисунок 5.18) и АД14 реагируют на дифференциальный ток и имеют встроенную защиту от сверхтоков. Они обеспечивают три вида защиты: защиту человека от поражения электрическим током при случайном, непреднамеренном прикосновении к токоведущим частям электроустановок при повреждениях изоляции; предотвращение пожаров вследствие протекания токов утечки на землю; защиту от перегрузки и короткого замыкания. Аппарат сохраняет работоспособность при пониженном напряжении сети (до 50 В) и обладает высокой механической износостойкостью. В аппарате предусмотрена индикация срабатывания от дифференциального тока.

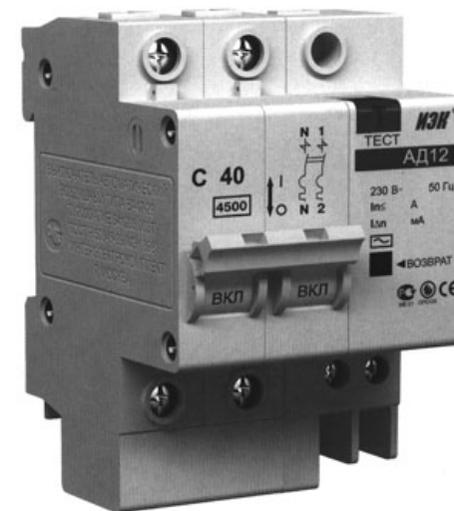


Рисунок 5.18 – Внешний вид дифференциального автомата АД12

Конструкция дифференциального автомата представляет собой соединение двух функциональных узлов: электронного модуля дифференциальной защиты и автоматического выключателя серии ВА47-29.

Электронный модуль состоит из дифференциального трансформатора тока, электронного усилителя с пороговым устройством, исполнительного электромагнита сброса и источника питания.

При установке рукоятки управления автоматического выключателя в положение «Вкл.» на электронный модуль поступает напряжение питания. В нормальном режиме работы, при отсутствии тока утечки, в силовой цепи протекает рабочий ток нагрузки. Равные токи во встречно включенных обмотках наводят в магнитном сердечнике трансформатора тока равные, но векторно противоположно направленные магнитные потоки. Результирующий магнитный поток равен нулю, и ток во вторичной обмотке дифференциального трансформатора также равен нулю.

При случайном прикосновении человека к открытым проводящим частям или пробое изоляции на корпус электроустановки по фазному проводнику, кроме тока нагрузки, протекает дополнительный ток утечки, являющийся для трансформатора тока дифференциальным. Если этот ток превышает значение уставки порогового устройства, последнее подает ток от источника питания на катушку электромагнита сброса, который сдергивает защелку механизма независимого расцепления выключателя, и электрическая цепь замыкается. При этом кнопка «Возврат» выступает из лицевой панели. Для повторного включения дифференциального автомата необходимо нажать на эту кнопку до фиксации и взвести рукоятку автоматического выключателя.

Для осуществления периодического контроля исправности дифференциального автомата в электронный модуль встроена цепь тестирования. При нажатии на кнопку «Тест» искусственно создается отключающий дифференциальный ток. Немедленное срабатывание дифференциального автомата означает исправность всех его элементов.

Технические характеристики дифференциальных автоматов АД12 и АД14 приведены в таблице 5.10, а технические данные к выбору дифференциальных автоматов АД12 и АД14 – в таблице 5.11.

Внутреннее устройство блока защитного отключения дифференциальных автоматических выключателей АД12 и АД14 показано на рисунке 5.19, а времятоковые характеристики отключения АД12 и АД14 – на рисунке 5.20.

Таблица 5.10 – Технические характеристики дифференциальных автоматических выключателей АД12 и АД14

Технические характеристики	Значения
Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51327.1-99, ТУ 99 АГИЕ.641243.039
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230/400
Номинальный ток $I_n$ , А	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63
Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta 0}$ , мА	10, 30, 100, 300
Номинальная отключающая способность, А	4 500
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	АС
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤40
Число полюсов	2, 4
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10 000
Максимальное сечение присоединяемых проводов, мм <sup>2</sup>	вход – 25; выход – 16/25*
Наличие драгоценных металлов (серебро), г/полюс	0,6÷2,0
Масса (2/4-полюсные), кг	0,25/0,45
Диапазон рабочих температур, °С	–25 ... +40
* Размер для аппаратов от 40 А	

Таблица 5.11 – Технические данные к выбору дифференциальных автоматических выключателей АД12 и АД14

Типоисполнение	АД12	АД14
	(2-полюсные)	(4-полюсные)
Соответствует стандартам	ГОСТ Р 51327.1-99 ТУ 99 АГИЕ.641243.039	
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230	400
Номинальный ток, А	6–63	
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА	10, 30, 100, 300	
Номинальная отключающая способность, А	4500	
Рабочая характеристика (при наличии дифференциального тока)	АС	
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤ 40	
Износостойкость, циклов «Вкл.-Откл.», не менее	10 000	

Окончание таблицы 5.11

Типоисполнение	АД12 (2-полюсные)	АД14 (4-полюсные)
Максимальное сечение присоединительных проводов, мм <sup>2</sup>	35	
Условия эксплуатации	УХЛ4	
Степень защиты выключателя	IP20	
Характеристика электромагнитного расцепителя автоматического выключателя	C	
Применение	однофазные сети	трехфазные сети

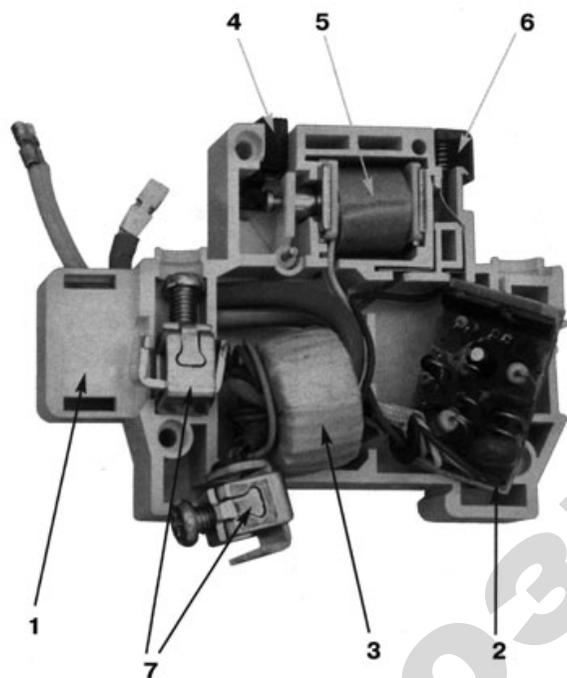


Рисунок 5.19 – Внутреннее устройство блока защитного отключения дифференциальных автоматических выключателей АД12 и АД14:  
 1 – корпус из термостойкой ABS-пластмассы; 2 – электронный усилитель;  
 3 – дифференциальный трансформатор; 4 – кнопка «Возврат»; 5 – катушка электромагнита сброса; 6 – кнопка «Тест»; 7 – присоединительные зажимы с насечкой для фиксации внешних проводников

На рисунке 5.20 пунктирная линия – это верхняя граница время-токовой характеристики для автоматических выключателей с номинальным током  $I_n \leq 32$  А.

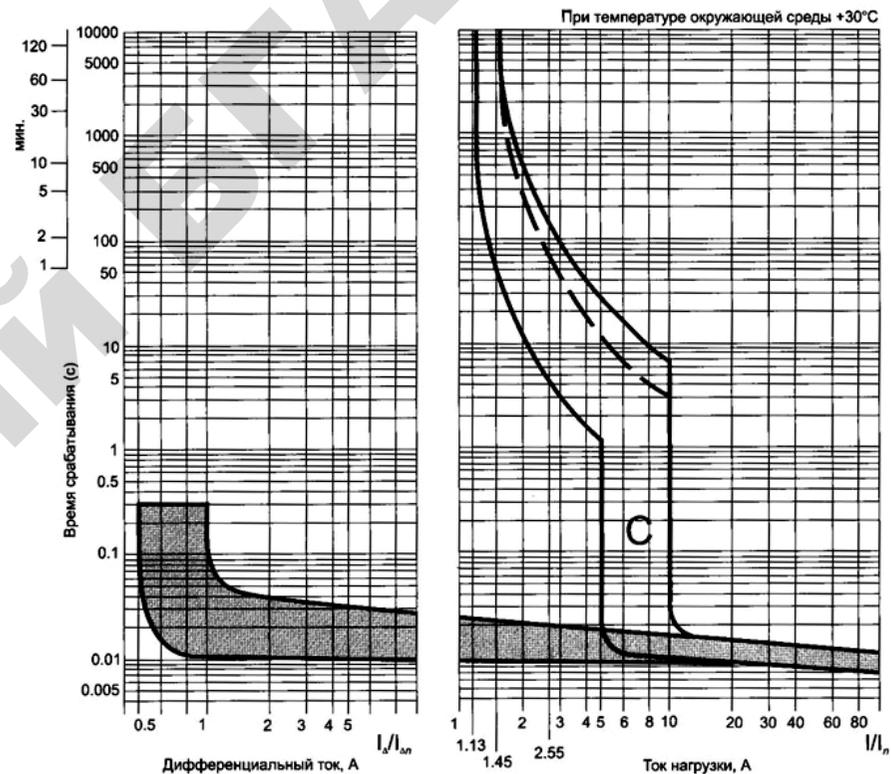


Рисунок 5.20 – Времятоковые характеристики отключения АД12 и АД14

Автоматические выключатели дифференциального тока АДТ32 (рисунок 5.21) предназначены для защиты человека от поражения электрическим током при повреждении изоляции электроустановок, для предотвращения пожаров вследствие протекания токов утечки на землю и для защиты от перегрузки и короткого замыкания и представляют собой комбинированное УЗО.

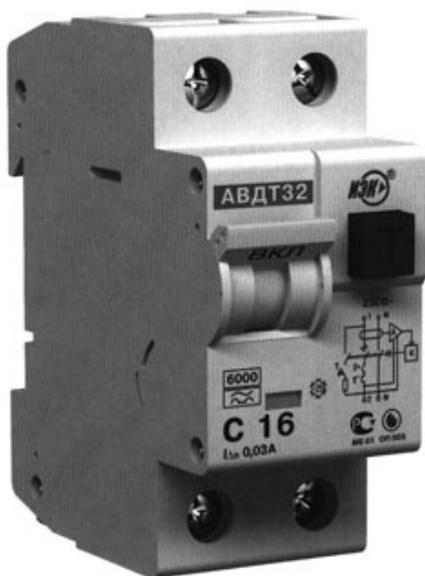


Рисунок 5.21 – Внешний вид автоматического выключателя дифференциального тока АВДТ32

Автоматические выключатели данного типа рекомендуются для защиты групповых линий, питающих розетки наружной установки, розеток и освещения подвалов и гаражей. Автоматический выключатель дифференциального тока АВДТ32 имеет следующие преимущества перед изложенными выше УЗО:

- индикатор положения контактов позволяет получить точную информацию о положении контактов (замкнуто/разомкнуто);
- возможность одновременного подключения шины и гибкого проводника, причем шины двух видов – PIN и FORK;
- максимальная отключающая способность – 6 кА;
- характеристика отключения по дифференциальному току – тип А (защита от синусоидальных токов и от пульсирующих постоянных).

Технические характеристики АВДТ32 приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Технические характеристики автоматического выключателя дифференциального тока АВДТ32

Технические характеристики	Значения
Соответствуют стандартам	ГОСТ Р 51327.1-99, ТУ АГИЕ. 641243.039
Номинальное напряжение частотой 50 Гц, В	230
Номинальный ток $I_n$ , А	6, 10, 16, 20, 25, 32
Характеристики срабатывания электромагнитного расцепителя	C
Число полюсов	1 + N
Номинальный отключающий дифференциальный ток $I_{\Delta n}$ , mA	30
Рабочая характеристика при наличии дифференциального тока	A
Время отключения при номинальном дифференциальном токе, мс	≤40
Износостойкость, циклов В-О, не менее	10 000
Условия эксплуатации	УХЛ4
Степень защиты выключателя	IP 20
Наличие драгоценных металлов, г/полюс	0,85
Максимальное сечение присоединяемых проводников, мм <sup>2</sup>	25
Масса, кг	0,19
Мощность рассеивания, Вт, не более	6,5
Диапазон рабочих температур, °C	-25 ... +40

Времятоковые характеристики отключения АВДТ32 изображены на рисунке 5.22, а электрические схемы, габариты и условные графические обозначения автоматического выключателя дифференциального тока АВДТ32 – на рисунке 5.23.

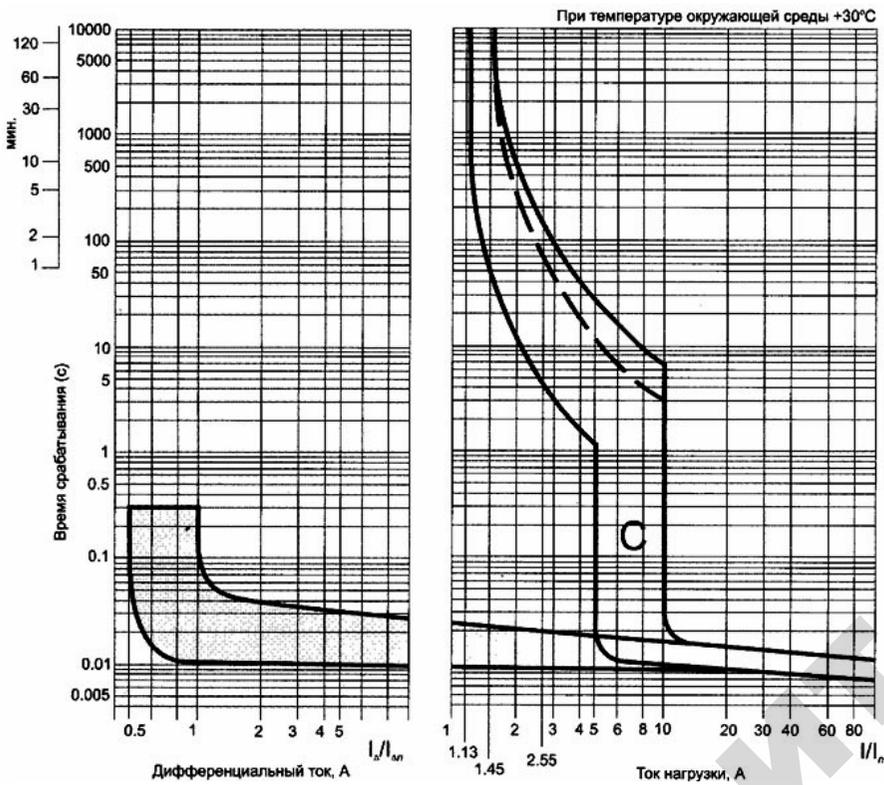
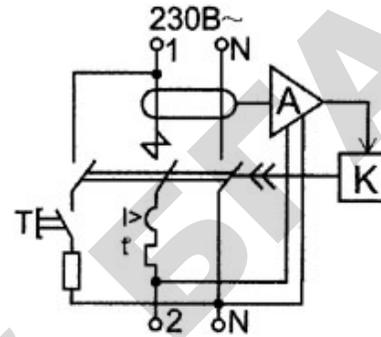


Рисунок 5.22 – Времятоковые характеристики отключения автоматического выключателя дифференциального тока АВДТ32 (пунктирная линия – верхняя граница времятоковой характеристики для автоматических выключателей с номинальным током  $I_n \leq 32$  А)

Электрические схемы



Условное графическое обозначение



Габариты

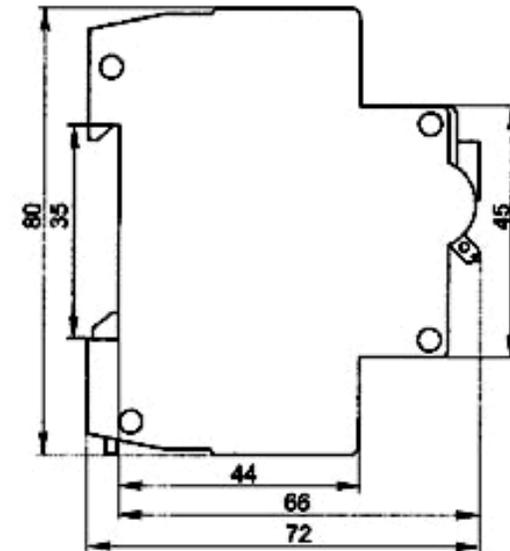
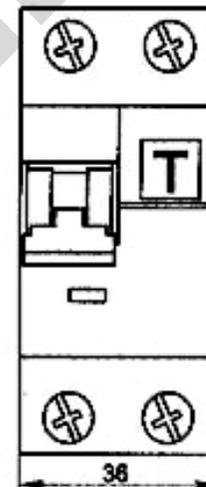
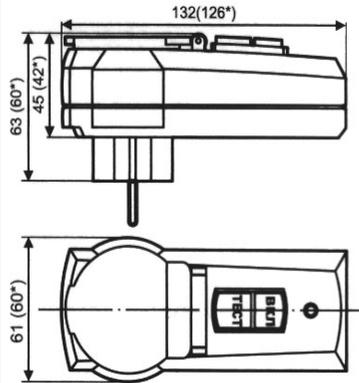
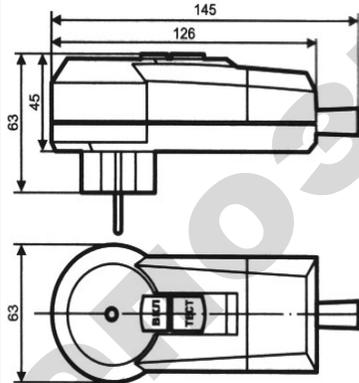


Рисунок 5.23 – Электрические схемы, габариты и условные графические обозначения автоматического выключателя дифференциального тока АВДТ32

В таблице 5.13 приведена информация о некоторых переносных устройствах защитного отключения.

Таблица 5.13 – Ассортимент переносных устройств защитного отключения

Наименование	Внешний вид	Чертеж	Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА	Степень защиты
Адаптер защитного отключения УЗО-ДПА16В с крышкой и без крышки УЗО-ДПА16			10; 30	IP44
Вилка с защитным отключением УЗО-ДПВ16			10; 30	IP44

325

УЗО переносные, управляемые дифференциальным током, отключают напряжение сети, если человек случайно коснется к оголенному проводу или к металлическому корпусу поврежденного электроприбора. Использование таких УЗО – это защита от возможного возгорания электроприбора, в котором повреждена изоляция (износ, сырость, механическое воздействие и т. д.).

Внешний вид переносного УЗО типа УЗО-ДПВ16 изображен на рисунке 5.24, а его технические данные представлены в таблице 5.14.



Рисунок 5.24 – Внешний вид переносного УЗО типа УЗО-ДПВ16

Особенности и преимущества УЗО-ДПВ16:

- не требуют специалиста для установки;
- широкий диапазон рабочих температур;
- работоспособность в диапазоне напряжений 115–265 В;
- индикатор наличия напряжения сети;
- малые габариты и масса;
- любое рабочее положение;
- современный дизайн и конструкция;

326

- обеспечивают защиту при обрыве нулевого провода;
- встроенная защита от грозовых и коммутационных импульсных перенапряжений;
- универсальность применения: предназначены для любых электроприборов мощностью до 3 кВт, подключаемых к штепсельной розетке.

Таблица 5.14 – Технические характеристики УЗО-ДПВ16

Технические характеристики	Значения
Номинальное рабочее напряжение, В	230
Номинальная частота сети, Гц	50
Диапазон напряжений работоспособности устройств, В	115 ÷ 265
Номинальный ток, А	16
Номинальный отключающий дифференциальный ток (уставка), мА	10, 30
Характеристика функционирования	A
Время отключения, с	0,03
Электрическая износостойкость, циклов «Вкл. – Откл.», не менее	20 000
Климатическое исполнение и категория размещения	УХЛ4
Степень защиты УЗО-ДПА16, УЗО-ДПА16В, УЗО-ДПВ16	IP20/IP44
Срок службы, лет	5

Рассмотрим работу некоторых электронных УЗО. Таким является, например, УЗОШ 10.2.010 УХЛ4. Оно предназначено для защиты людей от поражения электрическим током при эксплуатации учебных электрических приборов в кабинетах общеобразовательных школ.

Основные технические данные устройства: исполнение – двухполюсное;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 10$  А; потребляемая мощность – 15 Вт; номинальный ток срабатывания – 0,01 А; время срабатывания при  $I_{\Delta} = 0,02$  А составляет 50 мс. Устройство допускает работу в режиме 120 включений–отключений в час при ПВ 40 %.

УЗОШ 10.2.010 УХЛ4 размещено в пластмассовой оболочке. Стоит из корпуса, в котором закреплен магнитный пускатель типа ПМЛ–1100 и печатные платы. Крышка закрывает пускатель и платы. Две другие крышки закрывают клеммы для подключения сети и нагрузки. Кнопки управления «I», «O» и «Контроль», а также сигнальная лампа устройства закреплены на печатной плате и выступают на лицевую сторону крышки. На другой плате находится трансформатор тока утечки.

Принципиальная электрическая схема УЗОШ приведена на рисунке 5.25.

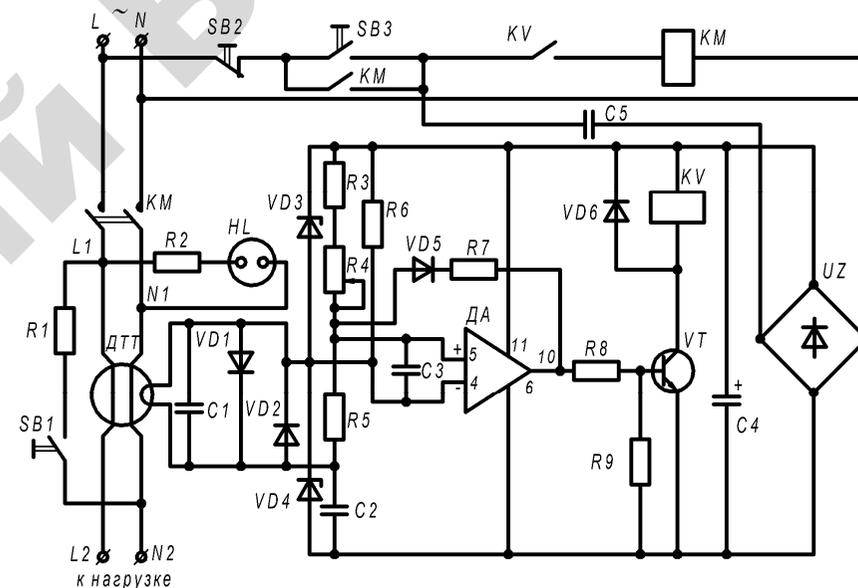


Рисунок 5.25 – Принципиальная электрическая схема устройства УЗОШ 10.2.010 УХЛ 4

При нажатии на кнопку SB3 питание через конденсатор C5 подается на выпрямительный мост UZ. Напряжение, выпрямленное мостом UZ и сглаженное конденсатором C4, поступает в схему. С помощью стабилитронов VD3 и VD4 напряжение на электронной схеме стабилизируется. В дежурном режиме работы на неинвертирующий вход 5 операционного усилителя DA подается положительное напряжение относительно инвертирующего входа 4 (напряжение на входах DA формируется резисторами R3-R6), в резуль-

тате чего на выходе  $DA$  появляется положительное напряжение. Через делитель  $R8, R9$  оно поступает на вход транзистора  $VT$ . Последний открывается, и включается реле  $KV$ , которое своим контактом включает электромагнитный пускатель  $KM$ . Нагрузка подключается к сети. Блок-контакт  $KM$  шунтирует кнопку  $SB3$ , и ее можно отпустить. Через силовые контакты  $KM$  и первичную обмотку дифференциального трансформатора тока ( $ДТТ$ ) протекает ток нагрузки. Токи в нулевом и фазном проводах равны. Напряжение на вторичной обмотке  $ДТТ$  равно нулю.

При появлении тока утечки на землю токи в фазном и нулевом проводах не равны. Во вторичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, которая подается на вход операционного усилителя  $DA$ , и при сравнении ее величины с напряжением смещения на выходе микросхемы устанавливается низкий потенциал. Цепочка  $VD5, R7$  служит для удержания операционного усилителя в этом положении (обеспечивая положительную обратную связь). Транзистор  $VT$  запирается, и реле отпускает, разрывая своими контактами цепь питания катушки магнитного пускателя. Магнитный пускатель своими контактами разрывает цепь питания схемы устройства и отключает сеть от нагрузки.

Цепочка из  $R1$  и  $SB1$  служит для контроля исправности работы устройства. При нажатии кнопки  $SB1$  через резистор  $R1$  протекает ток между прямым и обратным проводами, имитируя утечку на землю, равную  $2I_{уст}$ .

Из приведенного описания следует, что УЗОШ обеспечивает режим работы самоконтроля и самоудержания реле и отключает цепь нагрузки при обрыве нулевого проводника или потере фазы сети.

В случае больших токов нагрузки ДТТ имеет значительные размеры и устанавливается отдельно от дифференциального реле. Такими являются дифференциальные реле АСТРО\*УЗО [55] и РУД-05УЗ. Последнее выпускается на ток 100 и 250 А,  $U_n = 380$  В или 220 В. Уставки срабатывания составляют 30, 100, 300 мА при  $I_n = 100$  А и 100, 300, 1000 мА при  $I_n = 250$  А. Время срабатывания при двукратном токе уставки составляет не более 60 мс.

РУД-05УЗ имеет два блока: датчик тока утечки  $UA$  с дифференциальным трансформатором тока (ДТТ) и резистором  $R1$ , а также релейный блок с усилителем, блоком питания и выходным реле. Датчик тока  $UA$  устанавливается отдельно, имеет внутренний диаметр 37 мм при  $I_n = 100$  А (50 мм при  $I_n = 250$  А).

Принципиальная электрическая схема реле РУД-05 приведена на рисунке 5.26.

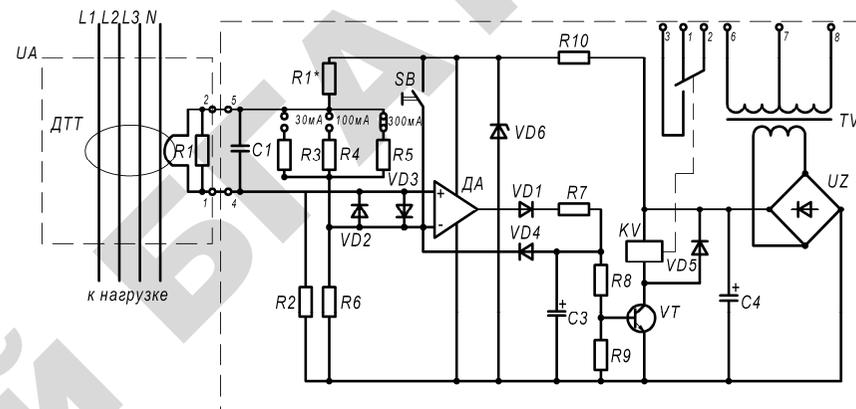


Рисунок 5.26 – Принципиальная электрическая схема реле РУД-05-УЗ

Элементы схемы имеют следующее предназначение:  $C1$  – для фильтрации гармоник напряжения, образующихся в трансформаторе  $TA$ ;  $R1-R6$  – для настройки на порог срабатывания усилителя  $DA$ ;  $SB$  – для контроля исправности реле;  $DA$  – для усиления малых сигналов;  $VD1$  – для обеспечения положительного сигнала на входе  $VT$ ;  $R7-R9$  – для деления выходного сигнала и ограничения тока базы трансформатора  $VT$ ;  $R7$  и  $C3$  – для обеспечения временной отстройки от импульсных помех;  $VD4$  – для положительной обратной связи (выхода  $DA$  с входом  $DA$ ), обеспечивающий триггерный эффект включения оперативного усилителя после снятия входного сигнала;  $VT$  – для включения реле  $KV$ ;  $VD5$  – для защиты  $VT$  от ЭДС, индуцируемой в  $KV$  при отключении;  $R10$  и  $VD6$  – для стабилизации напряжения питания усилителя;  $C4, UZ$  и  $TV$  – для обеспечения релейного блока постоянным пониженным напряжением.

Реле РУД-05УЗ работает следующим образом: при отсутствии утечки тока сумма токов проводов, пропущенных через окно трансформатора  $TA$ , равна нулю. Во вторичной обмотке  $TA$  ЭДС не индуцируется. На инвертирующем входе усилителя  $DA$  положительный сигнал (подбирается резистором  $R1$  при настройке), отчего на входе  $DA$  – нулевой сигнал, транзистор  $VT$  закрыт и реле  $KV$  обесточено.

При появлении тока утечки сумма токов фаз не равна нулю. В магнитопроводе трансформатора  $TA$  появляется нескомпенсированный магнитный поток, а в обмотке – ЭДС. На вход операционного усилителя подается переменное напряжение, которое складывается с постоянным, образованным резисторами  $R1-R6$ . Если только амплитуда переменного тока напряжения частоты 50 Гц превысит постоянное напряжение, то появится отрицательное напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя  $DA$ . Он переключится и на входе его появится положительное напряжение, примерно равное напряжению питания схемы. От этого напряжения  $TV$  срабатывает и включает реле  $KV$ , диод  $VD4$  «запрет»  $DA$  во включенное состояние, если даже входной сигнал исчез. Реле  $KV$  своим контактом включает независимый расцепитель автоматического выключателя или отключает цепь катушки электромагнитного пускателя. В обоих случаях электроприемник отключается от сети.

РУД-05УЗ не обеспечивает самоконтроля и контроля напряжения сети путем самоудержания выходного реле. В этом его недостаток. Поэтому при потере фазы питания и появления тока утечки в другой фазе реле не срабатывает.

УЗО могут быть объединены с другими устройствами защиты. Например, устройство «Защита-3» предназначено для высокочувствительной защиты людей от поражения электрическим током и для температурной защиты электродвигателей.

Устройство рассчитано на работу в трехфазных электрических сетях с глухозаземленной нейтралью. Нулевой провод некоммутируемый. Степень защиты оболочки не хуже IP43 по ГОСТ14254-80. Устройство предназначено для работы при температуре окружающего воздуха от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Основные технические параметры устройства: номинальное напряжение сети –  $380\text{ В} \pm 15\%$ ; частота тока – 50 (60) Гц; номинальный ток нагрузки –  $0,65\text{--}25\text{ А}$ ; номинальная величина уставки срабатывания по тока замыкания на землю –  $0,01\text{ А} \pm 20\%$ ; максимальное отклонение уставки срабатывания тока от номинального тока во всем диапазоне рабочих температур составляет 30 %; время срабатывания реле – не более 0,03 с; потребляемая мощность – не более 7 Вт; сопротивление срабатывания устройства температурной защиты составляет  $2100\text{ Ом} + 10\%$ ; максимальное отклонение уставки срабатывания по току замыкания на землю (в зоне срабатывания температурной защиты) – не более 5 %; кратность включаемого тока не более 7; электрическая изно-

соустойчивость при номинальной нагрузке не менее 1044 циклов; допустимая частота включений–отключений нагрузки в час при ПВ = 40 % составляет 120; сопротивление изоляции устройства в холодном состоянии не менее 20 МОм; сигнализация включенного состояния световая; срок службы – 10 лет; масса устройства – не более 2,5 кг.

### 5.8. Применение устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током, в различных системах заземления

Правила устройств электроустановок, разделяют электроустановки до 1 кВ относительно применяемых систем заземления на 6 систем [11, п. 1.7.3] (рисунок 5.27):

– *система TN* – система заземления электрической сети, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников;

– *система TN-C* – система заземления электрической сети TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении;

– *система TN-S* – система заземления электрической сети TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении;

– *система TN-C-S* – система заземления электрической сети, в которой функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике в какой-то ее части, начиная от источника питания;

– *система IT* – система заземления электрической сети, в которой нейтраль источника питания изолирована от земли или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление, а открытые проводящие части заземлены;

– *система TT* – система заземления электрической сети, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки заземлены при помощи заземляющего устройства, электрически независимого от глухозаземленной нейтрали источника.

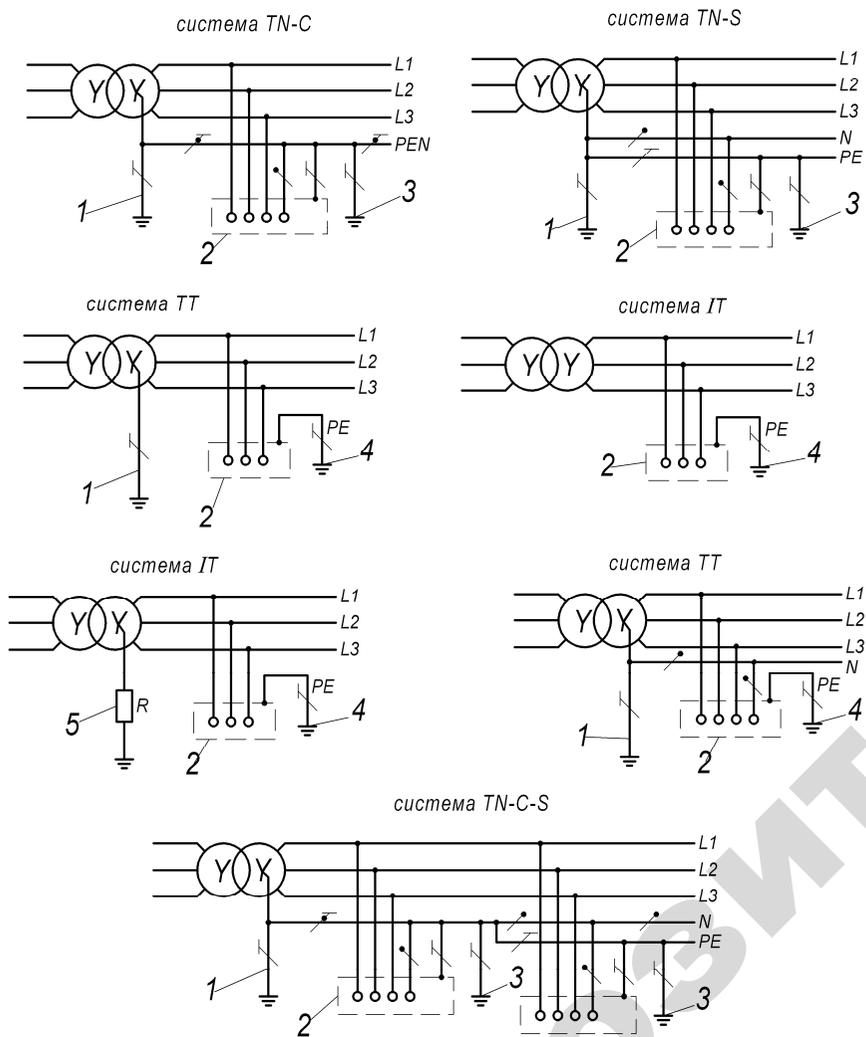


Рисунок 5.27 – Системы переменного тока:

1 – заземлитель нейтрали (средней точки) источника питания; 2 – открытые проводящие части (корпус) электроустановки; 3 – повторное заземление; 4 – заземляющее устройство электроустановки; 5 – сопротивление заземления нейтрали источника питания (высокоомное)

Наиболее распространенной системой в действующих электроустановках является система заземления электрической сети *TN-C*. Ее наиболее просто можно превратить в систему заземления электрической сети *TN-C-S*, разделив во вводно-распределительном устройстве *PEN*-проводник на два: нулевой рабочий *N*-проводник, изолировав его клеммник от корпуса, и нулевой защитный *PE*-проводник, не изолируя его клеммник от корпуса. Кроме этого, нулевой рабочий и нулевой защитный проводники не должны подключаться под общий контактный зажим. Обязательно должны быть разделены проводники, присоединяемые к клеммникам *PE* и *N*, а для подключения клеммников используются 2 зажима (1 и 2 на рисунке 5.28).

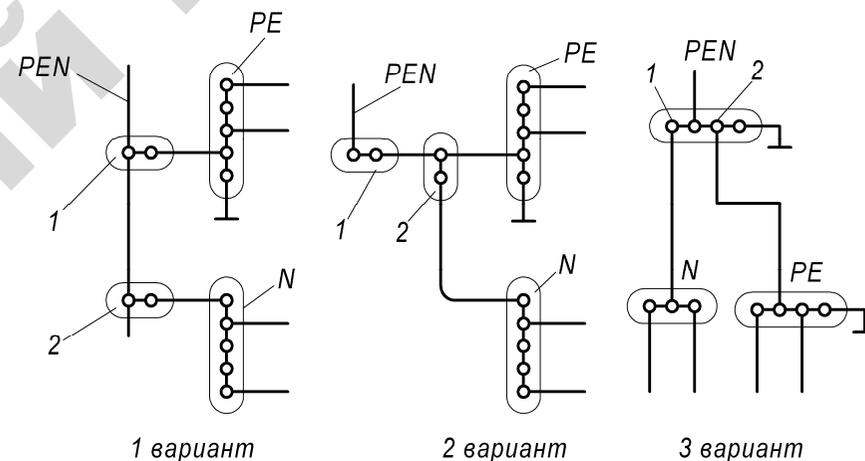


Рисунок 5.28 – Варианты подключения клеммника *N* (изолированного от корпуса) и клеммника *PE* (соединенного с корпусом) к *PEN*-проводнику через контакты 1 и 2

Сечение *PEN*-проводников должно быть не менее сечения *N*-проводников и не менее  $10 \text{ мм}^2$  по меди и  $16 \text{ мм}^2$  по алюминию.

В системе *TN-C* использовать УЗО с ДТТ не допускается [11, п. 1.7.80]. В случае необходимости повысить электробезопасность отдельного электроприемника следует строго соблюдать условие: защитный *PE*-проводник электроприемника должен быть подключен к *PEN*-проводнику цепи, питающей этот токоприемник, до УЗО со стороны источника питания (по отношению к УЗО) (рисунок 5.29).

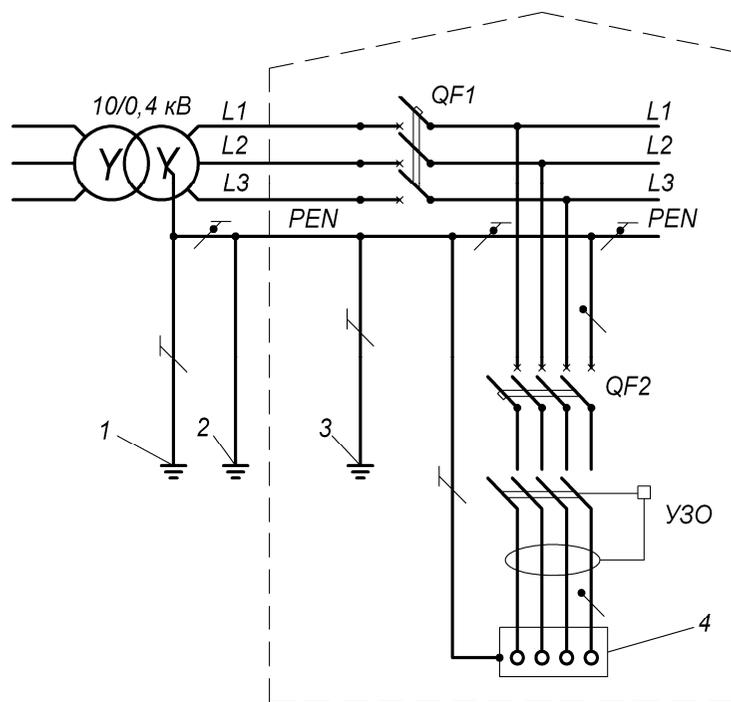


Рисунок 5.29 – Применение УЗО в системе *TN-C*:  
 1 – заземление источника питания; 2 – повторное заземление;  
 3 – защитное заземление электроустановки здания;  
 4 – открытые проводящие части электроустановки (корпус)

В системе *TN-C-S* УЗО должно использоваться в той части, где *PEN*-проводник разделен на *N*- и *PE*-проводники. Соединять их снова не допускается. Проводящие корпуса токоприемников присоединяются к *PE*-проводнику (рисунок 5.30).

Система *TN-S* обеспечивает лучшие условия электробезопасности, чем система *TN-C*, при эксплуатации электроустановок и наиболее благоприятна для использования УЗО. Она широко применяется в Европе, и за многие годы ее использования подтверждалась ее эффективность.

При монтаже электроустановок для *PE*-проводника следует использовать провод в желто-зеленой изоляции.

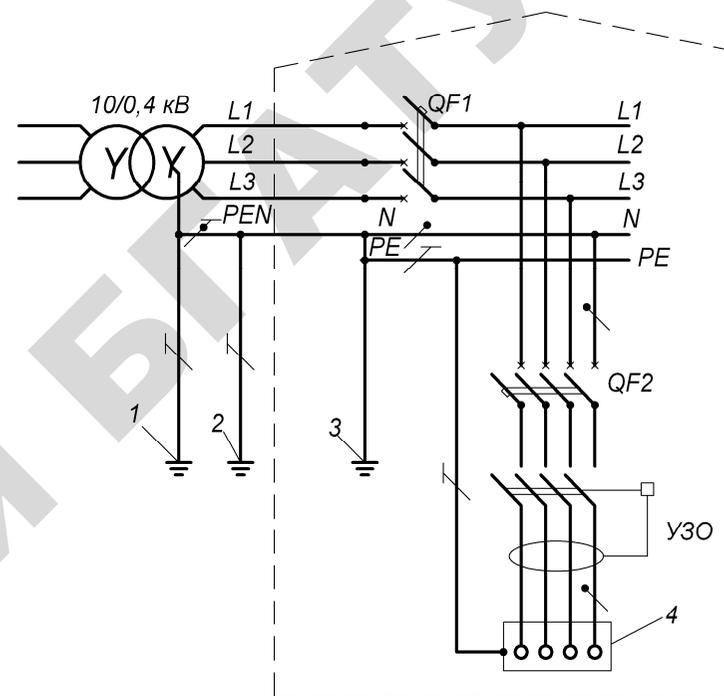


Рисунок 5.30 – Применение УЗО в системах *TN-C-S*:  
 1 – заземление источника питания; 2 – повторное заземление;  
 3 – защитное заземление электроустановки здания;  
 4 – открытые проводящие части электроустановки (корпус)

В сетях *IT* уровень сопротивления изоляции является фактором, определяющим надежность и электробезопасность эксплуатации электроустановок. Значение тока КЗ на землю в этих сетях определяется сопротивлением изоляции относительно земли. При высоком сопротивлении изоляции относительно земли ток замыкания на землю и ток через тело человека, в случае прямого прикосновения к токоведущим частям очень мал и не опасен для жизни.

В сетях *IT* применение УЗО регламентируется пунктом 1.7.58 ПУЭ следующим образом: «...В таких электроустановках для защиты при косвенном прикосновении и первом замыкании на землю должно быть выполнено защитное заземление в сочетании с контролем изоляции сети или применены УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА» [11].

Сети *IT* требуют постоянно включенных в сеть устройств контроля изоляции (УКИ). При первом замыкании на землю УКИ подает сигнал. Если до устранения первого замыкания наступит второе замыкание на землю, то должно произойти срабатывание УЗО. Применение УЗО в системе *IT* показано на рисунке 5.31.

Вариант сети *IT*, связанный с заземлением нейтрали источника питания через сопротивление на землю, и вариант сети *IT* с заземлением фазы источника питания через сопротивление на землю по надежности, электробезопасности и применению УЗО аналогичен основному варианту сети с изолированной нейтралью.

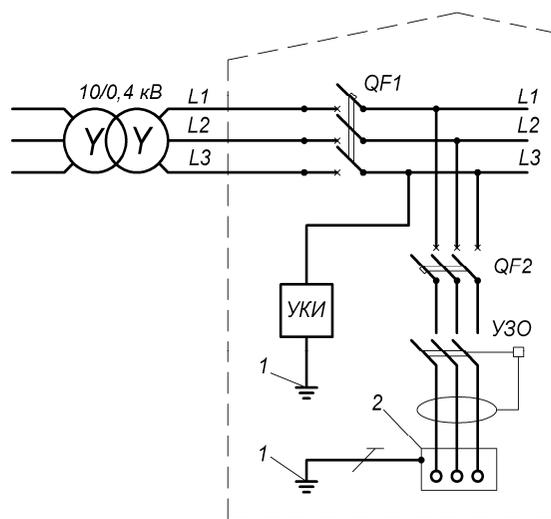


Рисунок 5.31 – Применение УЗО в системе *IT*:

1 – защитное заземление электроустановки здания; 2 – открытые проводящие части электроустановки (корпус); УКИ – устройство контроля изоляции

Система *TT* до последнего времени мало применялась. ПУЭ запрещали ее использование в электроустановках зданий. Это связано с тем, что в реальных условиях обеспечить быстрое отключение электроустановок с помощью автоматических выключателей в этой системе не удастся из-за малых кратностей тока КЗ на землю. Последнее связано с тем, что затруднительно выполнить низкоомное защитное сопротивление заземляющего устройства.

Применение УЗО в системе *TT* показано на рисунке 5.32. Все цепи нагрузки в системе должны иметь УЗО.

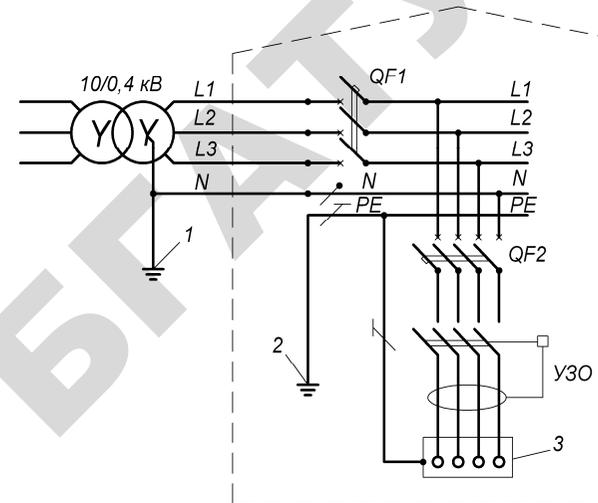


Рисунок 5.32 – Применение УЗО в системе *TT*:

1 – заземление источника питания; 2 – защитное заземление электроустановки здания; 3 – открытые проводящие части электроустановки (корпус)

Применение УЗО меняет отношение к этой системе. Например, ГОСТ Р 50669-94 предписывает применять ее для зданий из металла или с металлическим каркасом для уличной торговли и бытового обслуживания населения, т.е. мобильных зданий. Систему *TT* с УЗО можно применять для индивидуальных жилых домов, дачных (садовых) домов, гаражей и других частных сооружений, где затруднительно выполнить заземлитель с низким сопротивлением заземления. В случае применения системы *TT* и УЗО требуемое сопротивление заземления  $R_3$  (Ом) зависит от установки УЗО (мА).

Например, при  $I_{\Delta n} = 10 \text{ мА}$   $R_3 = 5000 \text{ Ом}$ ;  $I_{\Delta n} = 30 \text{ мА}$   $R_3 = 1650 \text{ Ом}$ ;  $I_{\Delta n} = 300 \text{ мА}$   $R_3 = 165 \text{ Ом}$ .

Сопротивление заземлителей такой величины легко выполняется с помощью одного штыря.

На рисунке 5.33 приведена схема электроснабжения коттеджа в системе заземления электрической сети *TN-C-S*.

В главном распределителе (ГРЩ) установлены автоматический вводной выключатель *QF1*, счетчик электрической энергии, селективное УЗО, автоматические выключатели *QF1-QF4* на отходящие линии, ограничители перенапряжений *RUI-RU4* класса *C*.

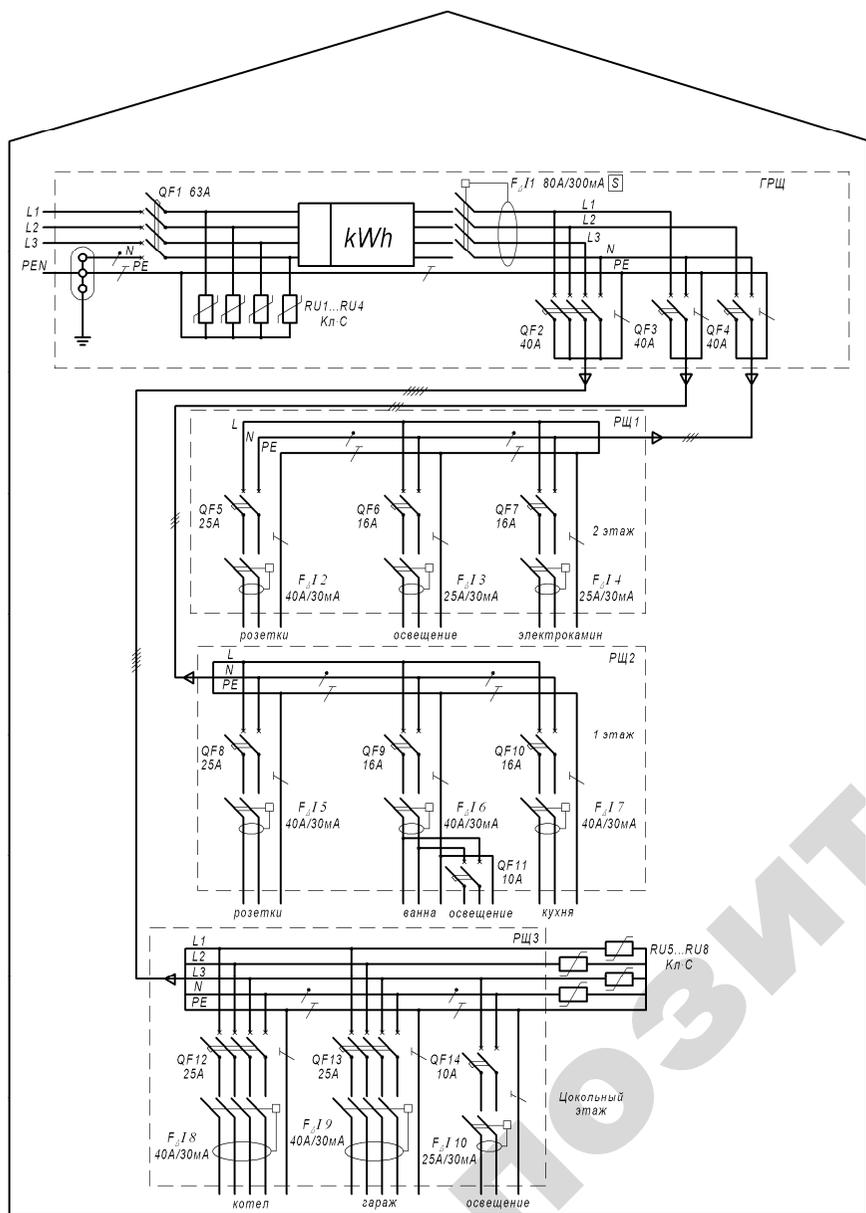


Рисунок 5.33 – Схема электроснабжения коттеджа в системе TN-C-S

Трехфазная линия поступает в цокольный этаж, где находится электродвигатель и гараж. В гаражном оборудовании используется выпрямитель (поэтому УЗО выбирается типа А), электросварка. Для локализации внутренних перенапряжений используются в этом распределительном шкафу (РЩЗ) ограничители перенапряжений типа D. УЗО выбраны по току на одну ступень больше, чем автоматические выключатели в данной группе, и все группы потребителей имеют УЗО.

Потребители разбиты по функциональным группам (освещение, розетки и т. д.), и нулевые проводники групп после УЗО разъединены и нигде не объединяются (рисунок 5.33).

*Применение УЗО является обязательным:*

- если устройство защиты от сверхтока не обеспечивает нормируемое время автоматического отключения из-за низких значений токов короткого замыкания и электроустановка не охвачена системой уравнивания потенциалов;
- для групповых линий, питающих розеточные сети, находящиеся вне помещений и в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью поражения электрическим током;
- для групповых линий в мобильных зданиях из металла или с металлическим каркасом, предназначенных для уличной торговли и бытового обслуживания населения (торговые павильоны, киоски, палатки, кафе, будки, фургоны, боксовые гаражи и т.п.), а также в передвижных и стационарных вагончиках с местами для проживания;
- для групповых линий, питающих электроприемники классов защиты 01 и 1, монтируемые в ваннах, душевых и парильных помещениях (кроме электроприемников, присоединенных к сети через разделительный трансформатор);
- для групповых линий питания светильников местного стационарного освещения при напряжении сети выше 25 В, устанавливаемых в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью поражения электрическим током;
- для групповых линий питания светильников класса защиты I общего назначения, устанавливаемых в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью поражения электрическим током при высоте установки менее 2,5 м над полом или площадкой обслуживания;
- для групповых линий, питающих розетки на столах учеников в кабинетах и лабораториях школ;
- для систем электрообогрева полов;

– для групповых сетей установки световой рекламы и архитектурного освещения зданий.

*Рекомендуется установка УЗО:*

– для электронагревательных кабелей, монтируемых в земле и на открытых пространствах;

– для групповых линий, питающих штепсельные розетки, устанавливаемые на столах для проведения опытов в высших и средних учебных заведениях;

– для групповых линий, питающих штепсельные розетки, электроплиты, насосы и электроводонагреватели в квартирах, в домиках на участках садоводческих товариществ и в хозяйственных постройках;

– в действующем жилом фонде с двухпроводными сетями, где электроприемники не имеют защитного заземления, особенно в случае с плохим состоянием электропроводки (при условии отключения только фазного проводника);

– групповых линий, питающих демонстрационные стенды;

– сетей, где токи короткого замыкания недостаточны для срабатывания максимальной токовой защиты.

Необходимость применения УЗО определяется проектной организацией исходя из условий обеспечения безопасности в соответствии с требованиями заказчика и утвержденными в установленном порядке стандартами и нормативно-техническими документами.

При выборе конкретных типов УЗО необходимо руководствоваться следующим:

– устройства должны быть сертифицированы в Республике Беларусь в установленном порядке;

– технические условия на изготовление должны быть согласованы с Госэнергонадзором Республики Беларусь и УГПН МЧС Республики Беларусь.

Для защиты от поражения электрическим током УЗО, как правило, должны применяться в отдельных групповых линиях. Допускается присоединение к одному УЗО нескольких групповых линий через отдельные автоматические выключатели (предохранители). Использовать УЗО в групповых линиях, не имеющих защиты от сверхтока, без дополнительного аппарата, обеспечивающего эту защиту, недопустимо.

При использовании УЗО, не имеющих защиты от сверхтока, должна быть проведена расчетная проверка УЗО в режимах сверхтока

с учетом защитных характеристик вышестоящего аппарата, обеспечивающих защиту от сверхтока.

Во всех случаях УЗО должно обеспечивать надежную коммутацию уровней нагрузки с учетом возможных перегрузок.

По эффективности действия реальной альтернативы УЗО пока не существует. УЗО будет и в дальнейшем являться важнейшим электрозщитным средством. Применение УЗО целесообразно в электроустановках всех видов и различных систем электроснабжений (*TN-S*, *TN-C-S* и т. д.). Затраты на УЗО незначительны и неизмеримо меньше возможного ущерба от гибели или травмирования людей, от пожаров, возникающих из-за неисправности изоляции электроустановок.

### **5.9. Монтаж и эксплуатация устройств защитного отключения, управляемых дифференциальным током**

При монтаже УЗО необходимо правильно выполнить разделение нулевого рабочего (*N*) и нулевого защитного (*PE*) проводников в зоне защиты УЗО.

Нулевой рабочий проводник не должен иметь электрического контакта с заземленными элементами установки (на рисунке 5.34, *a* неверное соединение перечеркнуто).

Необходимо обращать внимание на то, чтобы после УЗО нулевые проводники двух линий имели отдельные клеммы 1 и 2 для нулевого проводника (рисунок 5.34, *б*).

Соединять нулевые проводники двух и более линий нельзя, потому что образуется цепь тока в нулевом проводнике, минуя УЗО. Это приводит к ложному срабатыванию УЗО.

Нельзя подключать нагрузку к одному полюсу УЗО, а второй конец нагрузки соединять с *N*-проводником (рисунок 5.34, *в*) или подключать нагрузку к *N*-проводнику другого УЗО (рисунок 5.34, *г*).

При использовании УЗО в розетках не должно быть соединения перемычкой (зачеркнуто на рисунке 5.34, *д*) между клеммами *N* и *PE*.

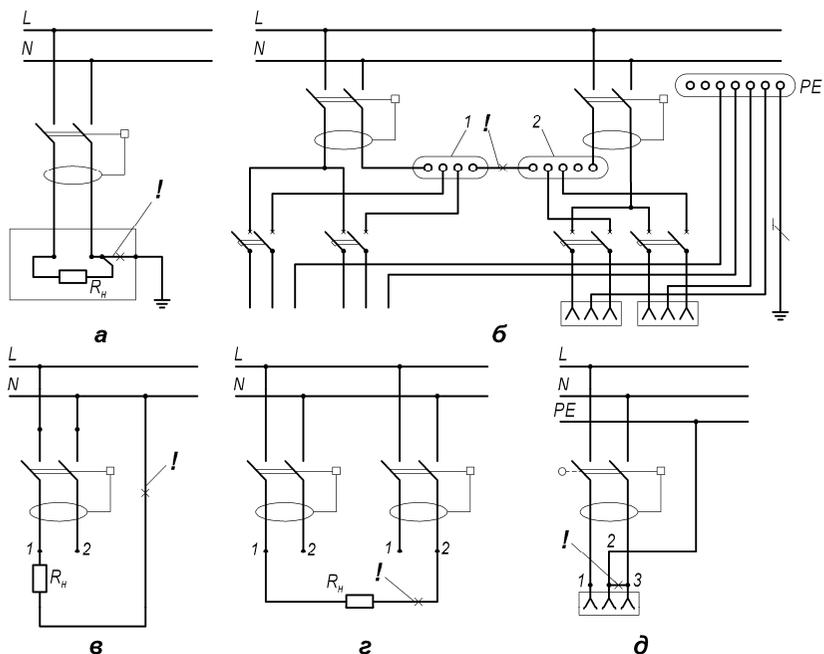


Рисунок 5.34 – Типичные ошибки при монтаже УЗО:

*а* – соединение заземления с клеммой *N* нагрузки; *б* – объединение клеммников двух УЗО; *в* – подсоединение нагрузки к одной клемме УЗО, а второго провода к *N*-проводнику; *г* – присоединение нагрузки к *N*-проводнику другого УЗО; *д* – установка или снятие перемычки (2–3) в розетке

Если 4-полюсное УЗО используется в однофазном режиме (2 полюса), то следует обратить внимание на подключение того полюса, с которого питается цепь проверки исправности УЗО (кнопка «Тест»).

В процессе эксплуатации следует ежемесячно проверять работоспособность (исправность) УЗО нажатием кнопки «Тест».

Проверка работы УЗО производится по рекомендациям ГОСТ Р 50571.16-99.

**Метод 1** (рисунок 5.35, *а*). При использовании этого метода регулируемое сопротивление присоединяют между фазным проводником на стороне нагрузки и открытой проводящей частью. Ток увеличивают путем уменьшения сопротивления регулируемого резистора  $R_p$ .

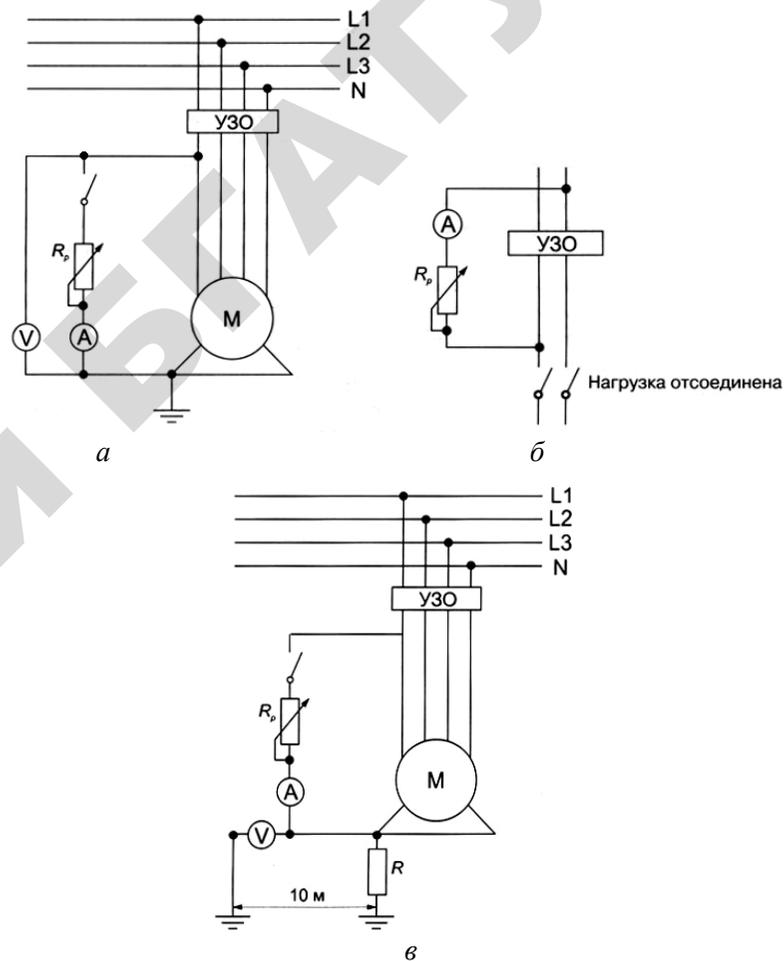


Рисунок 5.35 – Проверка УЗО по методам 1 (*а*), 2 (*б*), 3 (*в*)

Ток  $I_{\Delta}$ , при котором УЗО срабатывает, не должен быть больше номинального тока срабатывания  $I_{\Delta n}$ .

**Примечания:**

1. Этот метод может быть использован для систем *TN-S*, *TT* и *IT*. В системе *IT* может быть соединение точки схемы с землей при проведении испытания. Это необходимо для срабатывания УЗО.

2. Магазин сопротивлений должен обеспечивать сопротивления от 43 кОм до 750 Ом.

**Метод 2** (рисунок 5.35, б). При использовании этого метода регулируемое сопротивление присоединяют между одним проводником (фазным или нулевым рабочим) на стороне питания и другим проводником (нулевым рабочим или фазным) на стороне нагрузки. Ток увеличивают путем уменьшения сопротивления регулируемого резистора  $R_p$ .

Ток  $I_{\Delta}$ , при котором УЗО срабатывает, не должен быть больше  $I_{\Delta n}$ . Нагрузка во время испытания должна быть отсоединена.

*Примечание* – Метод 2 может быть использован для систем  $TN-S$ ,  $TT$  и  $IT$ .

**Метод 3** (рисунок 5.35, в). При применении этого метода используют вспомогательный электрод. Ток увеличивают путем уменьшения сопротивления регулируемого резистора  $R_p$ . Затем измеряют напряжение  $U$  между открытыми проводящими частями и независимым вспомогательным электродом, а также измеряют ток  $I_{\Delta}$  (он не должен быть больше  $I_{\Delta n}$ ), при котором УЗО срабатывает.

Должно быть выполнено следующее условие:

$$U \leq U_L \frac{I_{\Delta}}{I_{\Delta n}}, \quad (5.13)$$

где  $U_L$  – предельное нормируемое напряжение прикосновения, В.

*Примечания:*

1. Метод 3 может быть использован только в том случае, если расположение электроустановки позволяет использовать вспомогательный электрод.

2. Метод 3 может быть использован для систем  $TN-S$ ,  $TT$  и  $IT$ . В системе  $IT$  при проведении испытаний может быть необходимым соединение точки обшей системы с землей для обеспечения срабатывания УЗО.

Для контроля работоспособности УЗО в составе электроустановки необходимо иметь следующие приборы:

- миллиамперметр переменного тока (0÷300 мА);
- переменный резистор (магазин сопротивлений) от 0,75 до 43 кОм с определенной мощностью, рассчитанной по формуле

$$P = I_{\Delta n}^2 R, \quad (5.14)$$

где  $P$  – мощность переменного резистора, Вт;

$I_{\Delta n}$  – номинальный отключающий дифференциальный ток испытуемого УЗО, А;

$R$  – максимальное значение сопротивления переменного резистора, Ом.

### **Методика определения порога срабатывания УЗО по дифференциальному отключающему току**

1. Отключить от установленного в электроустановке УЗО цепь нагрузки с помощью двухполюсного автоматического выключателя. В том случае, если в электроустановке применен однополюсный автоматический выключатель, при выполнении данного измерения необходимо отсоединить и нулевой рабочий проводник (для исключения влияния тока утечки с нулевого рабочего проводника).

2. Подключить с помощью гибких проводников к указанным на схеме клеммам УЗО измерительную цепь с переменным резистором и миллиамперметром. Переменный резистор первоначально должен находиться в положении максимального сопротивления.

3. Плавнo снижая сопротивление резистора, зафиксировать показание миллиамперметра в момент срабатывания УЗО.

Зафиксированное значение тока является отключающим дифференциальным током данного экземпляра УЗО, которое согласно требованиям стандартов должно находиться в диапазоне  $0,5I_{\Delta n} \div I_{\Delta n}$ .

В том случае, если значение  $I_{\Delta}$  выходит за границы данного диапазона, УЗО подлежит замене.

### **Методика измерения тока утечки в зоне защиты УЗО**

1. Подключить к УЗО цепь нагрузки с помощью автоматического выключателя.

2. Подключить с помощью гибких проводников к указанным на схеме клеммам УЗО измерительную цепь с переменным резистором (магазином сопротивлений) и миллиамперметром. Переменный резистор первоначально должен находиться в положении максимального сопротивления.

3. Плавнo снижая сопротивление переменного резистора, зафиксировать показание миллиамперметра в момент срабатывания УЗО. Вычислить «фоновый» ток утечки электроустановки по формуле

$$I_{ут} = I_{\Delta} - I_{изм}, \quad (5.15)$$

где  $I_{ут}$  – ток утечки в зоне защиты УЗО, мА;

$I_{\Delta}$  – значение отключающего тока, используемого для данного измерения УЗО, мА;

$I_{изм}$  – замеренное миллиамперметром значение тока, мА.

Если определенное по данной методике значение тока утечки  $I_{ут}$  в зоне защиты УЗО превышает  $\frac{1}{3}$  номинального отключающего

дифференциального тока УЗО, то это означает, что в зоне защиты имеется дефектная цепь.

Для обнаружения дефектных цепей электроустановки проводят измерение тока утечки по вышеизложенной методике с последовательным отключением электрических цепей и электроприемников.

После устранения дефекта изоляции, являющегося причиной повышенного тока утечки, необходимо провести повторное измерение тока утечки в электроустановке.

Для обнаружения дефектных цепей электроустановки необходимо измерять токи утечки на отдельных участках или ответвлениях. Наиболее простое устройство для измерения тока утечки состоит из ДТТ и милливольтметра. Устройство включается последовательно с УЗО в исследуемую цепь. На вторичной обмотке ДТТ измеряется напряжение (мВ) и по тарифовочному графику, прилагаемому к прибору, определяется ток утечки (мА). Прибор фирмы Simens типа 5SZ9300 имеет номинальный ток 63 А. Для сети напряжением до 500 В диапазон измерения тока утечки составляет 0–30 мА. Вольтметр имеет внутреннее сопротивление более 1 МОм/В.

В России выпускаются цифровой прибор «АСТРО\*  $I_{\Delta}$ » для измерения дифференциального тока в цепи, а также портативное устройство «АСТРО\*ТЕСТ» для контроля исправности УЗО [55]. Последнее отличается тем, что обеспечивает протекание комбинированного значения тока утечки (10, 30, 100, 300 мА) в течение 200 мс. Реальное время отключения качественных электромеханических УЗО составляет 30–40 мс. Допустимое время отключения УЗО – 300 мс, но реально оно не превышает 200 мс. Применение прибора «АСТРО\*ТЕСТ» позволяет быстро проверить исправность УЗО под действием номинального дифференциального тока утечки и за определенное время. Такая проверка более качественная, чем по схемам рисунка 5.35.

Кроме этих приборов, в [55] описан более сложный, но многофункциональный прибор «АСТРО\*ПРОФИ». С его помощью можно измерить токи  $I_{\Delta n}$ , время отключения при номинальном токе утечки и при двух- и пятикратном значении  $I_{\Delta n}$ , частоту и напряжение сети, сопротивление петли «фаза–ноль», ток КЗ петли «фаза–ноль», малые сопротивления. Микропроцессорный прибор имеет жидкокристаллический индикатор; с помощью порта RS-232 прибор присоединяется к компьютеру.

### **Порядок поиска дефектной цепи в электроустановке (срабатывает УЗО и повреждена изоляция в электроустановке)**

1. Повторно включить УЗО. Если УЗО включается, то была временная неисправность. Произвести проверку изоляции электроустановки мегомметром, включая *N*- и *PE*-проводники. Если УЗО не включается, то следует отключить все предохранители или автоматические выключатели после УЗО.

2. Включить снова УЗО. Если оно включилось, то поочередно включать отдельные электрические цепи до тех пор, пока не срабатывает УЗО. Следовательно, цепь, вызывающая срабатывание УЗО, имеет дефектную изоляцию. Продолжить локализацию повреждения: отключить поврежденную цепь и поочередно снова включать другие потребители. В отключенной линии измерять, сопротивление всех проводников; найти поврежденную часть электроустановки, отремонтировать ее и снова включить в сеть.

3. Если при включении УЗО по п. 2 оно не включается, то следует отключить проводники на выходе УЗО, включая *N*-проводник.

4. Снова включить УЗО. Если оно тут же отключается, то УЗО неисправно. Если УЗО не отключается, то повреждена изоляция проводников на выходе УЗО. Поменять проводники и снова включить электроустановку в сеть.

УЗО, применяемые в электроустановках, должны иметь сертификат соответствия с указанием срока его действия (обычно выдается на 3 года), технический паспорт, руководство по эксплуатации с указанием технических параметров, гарантийное обязательство.

Результаты контроля УЗО в составе электроустановки заносятся в протокол испытаний УЗО. В протоколе указываются технические параметры применяемого УЗО, результаты проверки правильности установки УЗО в схеме электроустановки, результаты проверки правильности монтажа, проверка работоспособности УЗО. Образец протокола испытаний приведен в [55].

При выборе проводников следует учитывать возможность их присоединения к УЗО, так как многие импортные УЗО допускают подключение только медных проводников.

Применяемые типы УЗО функционально должны предусматривать возможность проверки работоспособности.

Рекомендации по применению УЗО приведены в таблице 5.15.

Таблица 5.15 – Токи срабатывания УЗО, рекомендуемые нормативными документами

Нормативные документы	Объект применения	Ток срабатывания $I_{\Delta n}$ , мА
ПУЭ, 7-е изд.	Жилые и общественные здания: розеточные цепи общие цепи	30 $\leq 300$
ГОСТ Р 50571.11-96	Ванные и душевые помещения: отдельная линия совмещенные цепи	10 30
ГОСТ Р 50571.23-2000	Строительные площадки: штепсельные розетки	$\leq 30$
ГОСТ Р 50571.17-2000 ПУЭ, 7-е изд.	Промышленные объекты: штепсельные розетки общие цепи	30 $\leq 500$
ГОСТ Р 50669-94	Мобильные здания	$\leq 30$
ПУЭ, 7-е изд.	Сельскохозяйственные объекты: штепсельные розетки общие цепи	30 $\leq 100$
ПУЭ, 7-е изд.	Передвижные электроустановки	$\leq 30$
ПУЭ, 7-е изд.	Переносной электроприемник	$\leq 30$
ГОСТ Р 50571.8-94	Групповые линии, питающие электроприемники наружной установки	$\leq 30$
ПУЭ, 7-е изд.	Наружное освещение фасадов, световая реклама	$\leq 30$
ПУЭ, 7-е изд.	Цепи освещения помещений	$\leq 30$

#### **Жилые и общественные здания**

Для повышения уровня электробезопасности в жилых зданиях, коттеджах и общественных помещениях жилых домов (прачечные, мастерские и т. п.) требуется для защиты цепей штепсельных розеток и оборудования использовать УЗО с уставкой 30 мА. Для повышения уровня защиты от возгорания при замыкании на заземленные части на вводе в квартиру, индивидуальный дом и т. п. требуется установка УЗО с током срабатывания до 300 мА [11]. Если в бытовой электроустановке имеются однофазные и трехфазные цепи штепсельных розеток, то необходимо защищать трехфазные цепи четырехполюсными УЗО, а однофазные – двухполюсными

УЗО. Приведенные рекомендации относятся и к общественным зданиям, например, объектам коммунальных услуг, школам, административным зданиям и т. д.

#### **Ванные и душевые помещения**

Для сантехнических кабин, ванных и душевых требуется устанавливать УЗО с током срабатывания 10 мА, если на них выделена отдельная линия, и с током срабатывания 30 мА в остальных случаях (например, при использовании одной линии для сантехнической кабины и кухни) (ГОСТ Р 50571.11–96).

#### **Строительные площадки**

Строительные площадки характеризуются значительным числом несчастных случаев, вызванным поражением электрическим током. Такое положение объясняется тем, что электроустановки, применяемые на строительных площадках, являются временными, а эксплуатация электрооборудования ведется в тяжелых условиях. При этом большая часть электрооборудования и ручного электроинструмента используется в наружной среде, не защищенной от влаги, а обслуживающий персонал, как правило, не проходит соответствующей специальной подготовки. Применение переносных кабелей, проложенных непосредственно на земле, обуславливает высокую степень вероятности механического нарушения целостности защитного проводника, что может привести к реальной угрозе жизни людей, прикоснувшихся к открытой проводящей части оборудования, питаемого поврежденным кабелем. В соответствии с требованием российского стандарта (ГОСТ Р 50571.23–2000) на строительных площадках должны быть установлены в каждом распределительном щите для защиты цепей штепсельных розеток УЗО с током срабатывания до 30 мА.

#### **Промышленные объекты**

Качество электроустановок промышленных предприятий выше, поскольку предполагается постоянный контроль, осуществляемый квалифицированным персоналом, и плановые периодические испытания защитных мер электробезопасности. Однако и в этом случае область применения УЗО широкая. В помещениях промышленных предприятий УЗО с уставкой не более 30 мА используются для защиты цепей штепсельных розеток, к которым подключается ручной электроинструмент. УЗО необходимо применять для защиты стационарного оборудования, установленного в помещениях

с повышенной опасностью и особо опасных [11]. Во всех вводно-распределительных щитах для защиты от пожаров должно быть установлено УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током, не превышающим 0,5 А (ГОСТ Р 50571.17–2000).

#### **Мобильные здания**

Электрооборудование в мобильных помещениях (мастерские, ремонтные и жилые помещения, медицинские и измерительные лаборатории) должно быть оснащено собственной защитой открытых проводящих частей, не зависящей от исполнения и состояния защиты сети питания. Выполнение этой задачи возлагается на УЗО. В ГОСТ Р 50669–94 применительно к зданиям из металла или с металлическим каркасом задается значение уставки УЗО не выше 30 мА.

#### **Сельскохозяйственные объекты**

Опасность несчастных случаев, вызванных электрическим током, в объектах сельского хозяйства чрезвычайно высока. Причиной этого являются тяжелые условия эксплуатации электрооборудования (влажность, агрессивная среда и т. д.) и неквалифицированное обслуживание, нарушения правил электробезопасности. Для всех групповых цепей, питающих штепсельные розетки, должна быть дополнительная защита от прямого прикосновения при помощи УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА. В животноводческих помещениях, где отсутствуют условия, требующие выполнения выравнивания потенциалов, должна быть выполнена защита при помощи УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не менее 100 мА, устанавливаемых на вводном щитке [11].

### **5.10. Контрольные вопросы и задания**

1. Объясните сущность защиты с помощью УЗО.
2. В каких случаях возникает опасность поражения человека или животного электрическим током?
3. Какими величинами напряжения определяется опасность поражения человека и сельскохозяйственных животных?
4. Какие токи опасны для человека?
5. Какие требования предъявляются к УЗО?
6. Укажите виды УЗО по контролируемому параметру.
7. Назовите достоинства УЗО, управляемых дифференциальным током.
8. Назовите недостатки УЗО, управляемых дифференциальным током.
9. Какие три вида УЗО, управляемых дифференциальным током, вы знаете?
10. Объясните работу удерживающего реле с постоянным магнитом, применяемого в УЗО.
11. Назовите достоинства и недостатки электромеханических УЗО, управляемых дифференциальным током.
12. Что означает тип характеристики УЗО по дифференциальному току АС, А или В?
13. Назовите основные параметры УЗО.
14. Какое время отключения имеют УЗО?
15. По каким параметрам выбирают УЗО?
16. По каким параметрам проверяют выбранное УЗО?
17. Как рассчитывается фоновый ток утечки?
18. Какие номинальные дифференцированные токи имеют УЗО?
19. Сколько полюсов имеют УЗО?
20. Какое соотношение необходимо соблюдать между номинальным током УЗО и номинальным током автоматического выключателя в цепи УЗО?
21. В каких случаях применяют УЗО с дифференциальным током 10 мА?
22. В каких случаях применяют УЗО с дифференциальным током 30 мА?
23. В каких электроустановках рекомендуется использовать УЗО?
24. По какой схеме проверяются УЗО?
25. Какой тип характеристики по дифференциальному току (А, АС или В) имеют УЗО типа ВД1-63?

26. Какое время отключения при дифференциальном токе имеют УЗО типа ВД1-63?

27. На какой дифференциальный ток КЗ рассчитаны УЗО типа ВД1-63?

28. Нарисуйте условное графическое обозначение УЗО на электрической схеме.

29. В чем отличие аппарата АД12 от АД14?

30. Каково назначение аппаратов АД12 и АД14?

31. Расскажите об устройстве узла контроля дифференциального тока аппаратов АД12 или АД14.

32. Какой класс электромагнитного расцепителя (А, В, С или D) имеет аппарат АД12?

33. Какую характеристику отключения по дифференциальному току (типа А, АС или В) имеют аппараты АД12 и АД14?

34. В чем состоит различие между характеристиками отключения по дифференциальному току УЗО типов А и АС?

35. Объясните назначение аппарата АВДТ32.

36. Какую характеристику отключения по дифференциальному току (типов А, АС или В) имеют автоматические выключатели дифференциального тока АВДТ32?

37. В каком случае используются переносные УЗО?

38. На какой ток рассчитаны переносные УЗО-ДП?

39. На какой дифференциальный ток отключения рассчитаны УЗО-ДП?

40. Как проверяется работоспособность УЗО?

41. Срабатывает ли УЗО при двухфазном, трехфазном и однофазном КЗ?

42. Нарисуйте схему включения УЗО в системе заземления электрической сети TN-S.

43. Нарисуйте схему включения УЗО в системе заземления электрической сети TN-C-S.

44. Поясните несколько типичных ошибок, возникающих при монтаже УЗО.

45. Объясните выбор УЗО.

46. Какое правило соблюдают при выборе номинальных токов УЗО и автоматического выключателя, включенных в одну цепь?

47. Как обеспечивается селективность УЗО?

48. По каким параметрам проверяют выбранные УЗО?

49. Расшифруйте обозначения УЗО типа ВД1-63/4/32/30.

50. Выберите УЗО для переносного кабеля, к которому подключена группа однофазных розеток. Номинальное напряжение сети 220 В. Расчетная мощность 2 кВА, длина 20 м. Расчетный ток КЗ в линии равен 1,5 кА. Потребитель обеспечивает синусоидальный и пульсирующий ток.

51. Выберите УЗО для группы стационарно установленных розеток и одновременно защитить линию от токов КЗ. Длина линии 30 м, мощность нагрузки 2,3 кВА. Расчетный ток КЗ линии – 2 кА.

52. Выберите УЗО для установки в шкафу управления. Для защиты от КЗ используется автоматический выключатель ВА 47-29-4D. На бетономешалке установлен трехфазный электродвигатель мощностью 4 кВт,  $I_n = 9,16$  А.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30331.1-95. Электроустановки зданий. Основные положения. – Введен 1.06.1999. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации : БелГИСС, 1999. – 10 с.

2. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. РД153-34.0.-20.527-98 : руководящие указания / исполнители : Б. Н. Неклепаев [и др.]. – Москва : МЭИ (ТУ), 1998. – 131 с.

3. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы : монография / С. А. Ульянов. – Москва : Энергия, 1970. – 519 с.

4. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Введен 01.01.95. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Издательство стандартов, 1994. – 63 с.

5. Беляев, А. В. Выбор аппаратуры и кабелей в сетях 0,4 кВ / А. В. Беляев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988 – 176 с. – (Библиотека электромонтера; вып. 617).

6. Грачева, Е. Белые пятна коммутационных аппаратов / Е. Грачева, Р. Ярусланов // Энергия и менеджмент. – 2002. – № 2. – с. 20–22.

7. Низковольтная аппаратура распределения и управления : технический каталог. – Коренево : Кореневский ЗНА, 2001. – 40 с.

8. Номенклатурный каталог изделий Курского ОАО «Электроаппарат» : технический каталог. – Курск : Полстар, 2003. – 56 с.

9. Аппараты защиты электрических цепей : технический каталог. – Москва : Интерэлектрокомплект, 2005. – 48 с.

10. Каталог электротехнической продукции '06 : технический каталог. – Москва : Интерэлектрокомплект, 2006. – 336 с.

11. Правила устройств электроустановок. – 7-е изд. – Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 170 с.

12. ГОСТ 30331.5-95. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от сверхтоков. – Введен 1.06.1999. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Бел ГИСС, 1999. – 5 с.

13. Правила устройств электроустановок. – 6-е изд. – Москва : Госэнергонадзор, 2000. – 606 с.

14. Кореневский завод низковольтной аппаратуры. Низковольтные аппараты защиты : технический каталог. – Коломна : Коломенская типография, 2002. – 36 с.

15. ГОСТ Р 50339.0-2003. Предохранители плавкие низковольтные. Часть 1. Общие требования. – Введен 26.12.2003. – Москва : Госстандарт России : Издательство стандартов, 2004. – 54 с.

16. Чунихин, А. А. Электрические аппараты : учебник для вузов / А. А. Чунихин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1988. – 720 с.

17. Намитоков, К. К. Плавкие предохранители : монография / К. К. Намитоков, Р. С. Хмельницкий, К. Н. Аникеев. – Москва : Энергия, 1979. – 176 с.

18. Таев, И. С. Электрические аппараты управления : учебник для вузов по спец. «Электрические аппараты» / И. С. Таев. – 2-е изд. – Москва : Высшая школа, 1984. – 247 с.

19. ГОСТ 17242-86. Предохранители плавкие силовые низковольтные. Общие технические условия. – Введен 01.01.88. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 45 с.

20. Хмельницкий, Р. С. Быстродействующие плавкие предохранители : обзорная информация / Р. С. Хмельницкий, Н. А. Шеховцов. – Москва : Информ-электро, 1983. – 44 с.

21. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник / В. А. Андреев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1991. – 496 с.

22. Глух, Е. М. Защита полупроводниковых преобразователей / Е. М. Глух, В. Е. Зеленев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 153 с.

23. Правила эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – 4-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.

24. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве (ППРЭСХ). – Косино : ВНИЭТУСХ, 1982. – 296 с.

25. ГОСТ Р 50030.2-99. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 2. Автоматические выключатели. – Введен 17.12.1999. – Москва : Госстандарт России. – 100 с.

26. Родштейн, Л. А. Электрические аппараты : учебник для техникумов / Л. А. Родштейн. – 4-е изд. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.

27. Таев, И. С. Электрические аппараты автоматики и управления : учебное пособие для вузов / И. С. Таев. – Москва : Высшая школа, 1975. – 224 с.
28. Горобец, А. С. Автоматические выключатели серии А3700 / А. С. Горобец, И. Х. Евзеров. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 72 с.
29. Монтажное электрооборудование Legrand : технический каталог. – Legrand, 2002/2003. – 449 с.
30. Автоматические выключатели серии ВА-88 : технический каталог. – Москва : Интерэлектрокомплект. – 2004. – 40 с.
31. Электротехническая продукция ИЭК : технический каталог. 3-е изд. – Москва : Интерэлектрокомплект, 2003. – 60 с.
32. Автоматические выключатели ОАО «ДЗНВА» : технический каталог. Дивногорск : Дивногорский завод низковольтных аппаратов, 2005. – 152 с.
33. Industrial circuit breakers and Ioabreake Switchers: General Cataloue: Ge Power Controls. – Liverpool, 2002. – 373 p.
34. Пястолов, А. А. Эксплуатация электрооборудования : учебник для вузов / А. А. Пястолов, Г. П. Ерошенко. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 287 с.
35. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введен 1.01.1999. – Москва : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Госстандарт России, 1999. – 52 с.
36. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций СО 153-34.21.122 – 2003 [Электронный ресурс]: / “Coogole”: Формат файла: Microsoft Word. – В виде HTML. – Режим доступа : [www.elec.ru/library/rd/so\\_153-34\\_21\\_122\\_2003.doc](http://www.elec.ru/library/rd/so_153-34_21_122_2003.doc). – Дата доступа 15.08.2009.
37. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД34.21.122-87. – Москва : Союзтехэнерго, 1989. – 39 с.
38. Зоричев, А. А. Защита электроустановок от импульсных грозовых и коммутационных перенапряжений [Электронный ресурс]: / “Coogole”: Формат файла : PDF/Adobe Acrobat. – В виде HTML. – Режим доступа : [www.imc.org.ua/downloads/letra06.pdf](http://www.imc.org.ua/downloads/letra06.pdf). – Дата доступа 15.08.2009.
39. Ограничители перенапряжений низкого напряжения типа GXD завода по производству высоковольтной аппаратуры «ZWAR» : Каталожная карта GXO/06/01/R, 2000. – 6 с.
40. Ограничители перенапряжений нелинейные серии TEL : технический каталог/ предприятие «Таврида Электрик», 2002. – 17 с.
41. Защитные аппараты. Ограничители перенапряжений : технический каталог. – Великие Луки : ЗЭТО, 2002. – 42 с.
42. ГОСТ Р 51992-2002. Устройства для защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. – Введен 01.01.2004 – Москва : Издательство стандартов, 2004. – 48 с.
43. Системы молниезащиты и защиты от импульсных перенапряжений : справочные материалы по проектированию. Полный технический каталог / ОВО «BATTERMANN», 2006. – 225 с.
44. Федоров, А. Установка устройств защиты от импульсных перенапряжений на основе искрового промежутка перед счетчиками электроэнергии / А. Федоров, В. Сацок // Рынок электроэнергетики. – 2009. – № 1. – с. 15–18.
45. ГОСТ Р 50571.19-2000. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования к обеспечению безопасности. Глава 44. Защита от перенапряжений. Раздел 443. Защита электроустановок от грозовых и коммутационных перенапряжений – Введен 01.01.2004. – Москва : Издательство стандартов, 2002. – 7 с.
46. Шварц, Г. К. О применении устройств для защиты от импульсных перенапряжений в электроустановках жилых и общественных зданий [Электронный ресурс]: / “Coogole”: Формат файла: PDF/Adobe Acrobat. – В виде HTML. – Режим доступа: [www.Energomera.ru/documentation/primenenit.pdf](http://www.Energomera.ru/documentation/primenenit.pdf). – Дата доступа 15.08.2009.
47. Низковольтные коммутационные аппараты : технический каталог NS K, главы 4-7/ SIEMENS, 2000/01. – 250 с.
48. Производство электротехнической продукции: технический каталог совместного белорусско-польского предприятия «Евроавтоматика Ф+Ф», Лида : Плутос-инфо, 2004. – 37 с.
49. Нечаев, И. Автомат защиты сетевой аппаратуры от “скачков” напряжения / И. Нечаев // Радио. – 1996. – № 10. – с. 48–49.
50. Озолин, М. Устройство защиты аппаратуры от аномального напряжения сети / М. Озолин // Радио. – 2007. – № 6. – с. 36–37.

51. Долин, П. А. Основы техники безопасности в электроустановках : учебное пособие для вузов / П. А. Долин. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

52. Методические рекомендации по монтажу и эксплуатации аппаратов защитного отключения по току утечки на землю : методические рекомендации ВЛЭСХ. – Москва : ВЛЭСХ, 1981. – 19 с.

53. Грундулис, А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве / А. О. Грундулис. – 2-е изд. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 111 с.

54. ГОСТ Р 50807-95 (МЭК 755-83). Устройства защитные, управляемые дифференциальным (остаточным) током. Общие требования и методы испытаний [Электронный ресурс]: / “Coogole”: электронная библиотека. – Режим доступа: [www.elec.ru/library/gost\\_e71/gost\\_r\\_50807-95.pdf](http://www.elec.ru/library/gost_e71/gost_r_50807-95.pdf). – Дата доступа 15.08.2009.

55. УЗО – устройства защитного отключения : учебно-справочное пособие / составители : Н. Д. Душкин, В. К. Монаков, В. А. Старшинов. – Москва : Энергосервис, 2003. – 232 с.

56. Штепан, Ф. Устройства защитного отключения, управляемые дифференциальным током : руководство для обучения / Ф. Штепан. – Прага, 2004. – 90 с.

Учебное издание

Гурин Владимир Владимирович

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Учебно-методическое пособие

В двух частях

Часть 1

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Ответственный за выпуск В. А. Дайнеко  
Редактор Ю. П. Каминская  
Компьютерная верстка Ю. П. Каминской

Подписано в печать 16.09.2010 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 20,93. Уч.-изд. л. 20,88. Тираж 150 экз. Заказ 396.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.