

**В.Г. ФРОЛКИН**

---

**РУДНИЧНАЯ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ  
КОММУТАЦИОННАЯ  
И ЗАЩИТНАЯ  
АППАРАТУРА**

---



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
МИНИСТЕРСТВО УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР  
Ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
институт горного дела им. А. А. Скочинского

В. Г. ФРОЛКИН

РУДНИЧНАЯ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ  
КОММУТАЦИОННАЯ  
И ЗАЩИТНАЯ  
АППАРАТУРА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1983

Фролкин В. Г. Рудничная быстродействующая коммутационная и защитная аппаратура. М.: Наука, 1983.

Рассмотрены основные вопросы разработки быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры для электроснабжения выбросоопасных шахт. Даны рекомендации по созданию и применению быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры, а также изложена методика выбора параметров кабельной сети участка.

Книга рассчитана на специалистов, разрабатывающих или внедряющих искробезопасное оборудование в промышленности.

Ил. 48. Табл. 1. Библиогр. 48 назв.

Ответственный редактор

профессор, доктор технических наук

Н. Ф. Ш И Ш К И Н

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» предусмотрено дальнейшее развитие подземной добычи угля, особенно для коксования<sup>1</sup>. Подземная добыча коксующегося угля, как правило, осуществляется на крутых пластах маломощными машинами с пневматическим приводом. Последнее связано с проблемой безопасного применения электрической энергии во взрывоопасных средах, над решением которой многие годы работают ведущие научно-исследовательские институты и производственные объединения.

Исследованиями ИГД им. А. А. Скочинского и ВостНИИ, а также опытом эксплуатации специальной быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры установлено, что безопасное применение электрической энергии (предупреждение взрывов, пожаров метано-воздушной смеси и электротравматизма) в условиях угольных шахт обеспечивается, если полное время защитного отключения сети не превышает времени развития аварии. В связи с этим в настоящее время изменен параграф 389 действующих «Правил безопасности в угольных и сланцевых шахтах» и на крутых пластах, опасных по внезапным выбросам угля и газа, разрешено применение электрооборудования в исполнении РВ с автоматическим защитным отключением источников электрической энергии за время не более  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с.

На крутых пластах электрическая энергия позволит осуществить комплексную механизацию и автоматизацию производственных процессов с использованием высокопроизводительной угледобывающей техники, что резко увеличит объем добычи коксующегося угля и улучшит технико-экономические показатели шахт.

В настоящей книге обобщены исследования по созданию и совершенствованию быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры для безопасных систем электроснабжения, проведенные с участием автора в ИГД им. А. А. Скочинского.

---

<sup>1</sup> Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981. 223 с.

# **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ**

## **1.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ШАХТНЫХ СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ**

В СССР на шахтах, разрабатывающих крутые пласты, добывается около 11% от общего количества угля, производимого подземным способом.

За последние годы проведена значительная работа по техническому перевооружению угольной промышленности. Однако в технике и технологии разработки крутых пластов не было достигнуто существенного прогресса: уровень механизированной выработки угля практически остается неизменным и составляет около 35%. Добыча угля, как правило, осуществляется вручную отбойными молотками или маломощными машинами с пневматическим приводом.

Применение пневматической энергии на крутых пластах объясняется возможностью возникновения взрывов и пожаров метано-воздушной среды при механических повреждениях электрического кабеля в случаях внезапных выбросов угля и газа, повышенной повреждаемостью электрооборудования падающими кусками угля и породы, более тяжелыми последствиями поражения обслуживающего персонала электрическим током.

По своим технико-экономическим показателям пневматическая энергия значительно уступает электрической и не может служить основой для высокопроизводительной техники. Поэтому дальнейшее развитие шахт, разрабатывающих крутые пласты, возможно только на основе электрической энергии и важнейшей проблемой в области электрификации угольных шахт является проблема безопасного применения электрической энергии на выбросоопасных пластах крутого падения.

Анализ обширного статистического материала о причинах возникновения аварий в подземных электроустановках показал, что наиболее уязвимым звеном электрической сети является кабель, который не может быть заключен во взрывонепроницаемую оболочку, подобно другим видам рудничного электрооборудования [1].

В общем виде электрическая энергия (Дж), выделяемая в месте механического повреждения кабеля при разрыве цепи тока корот-

кого замыкания, определяется как

$$W = \int_0^t ui \, dt,$$

где  $u, i$  — соответственно напряжение (В) и ток (А) в месте повреждения;  $t$  — время действия электрической дуги в месте разрыва цепи тока, с. Экспериментальные исследования механических повреждений кабеля во взрывоопасной среде, проведенные ИГД им. А. А. Скочинского и ВостНИИ, показали, что безопасное применение электрической энергии обеспечивается, если полное время защитного отключения сети  $t_{\text{отк}}$  меньше времени развития аварии  $t_{\text{р.а}}$  [2—5]. При этом полное время защитного отключения и время развития аварии (с) определяются из следующих выражений:

$$t_{\text{отк}} = t_{\text{з.у}} + t_{\text{к.а}} \quad (1.1)$$

(здесь  $t_{\text{з.у}}$  — время срабатывания защитного устройства от токов короткого замыкания и утечек на землю, с;  $t_{\text{к.а}}$  — время срабатывания коммутационного аппарата, с),

$$t_{\text{р.а}} = h/v$$

(здесь  $h$  — геометрический размер кабеля по линии повреждения, м;  $v$  — скорость движения повреждающего тела, м/с).

Согласно [4, 5], время развития аварии (время от момента короткого замыкания до момента разрыва цепи тока) в шахтных участках сетей может составлять  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с, т. е. для обеспечения условия взрывобезопасности в системе электроснабжения должно соблюдаться неравенство  $t_{\text{отк}} < 2,5 \cdot 10^{-3}$  с. При этом взрывобезопасная система электроснабжения будет также безопасной в отношении пожаров и электротравматизма.

На рис. 1.1 показана принципиальная схема взрывобезопасной системы электроснабжения участка шахты, отличительной особенностью которой от обычной является применение специальной быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры. Схема содержит передвижную трансформаторную подстанцию ТУ (источник питания), быстродействующий автоматический фидерный выключатель АБВ, устройство быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечки на землю БЗУ, экранированный кабель ЭК и моторные короткозамыкатели МК, подключенные к электродвигателям ЭД.

При механических повреждениях кабеля с образованием токов короткого замыкания или утечки на землю через сопротивление экрана устройство защиты выдает сигнал на срабатывание фидерного автоматического выключателя и моторных короткозамыкателей. При этом фидерный автоматический выключатель отключает источник питания, а моторные короткозамыкатели закорачивают ЭДС электродвигателей, и, таким образом, место аварии энергетически изолируется как со стороны источника питания, так и со стороны потребителей.

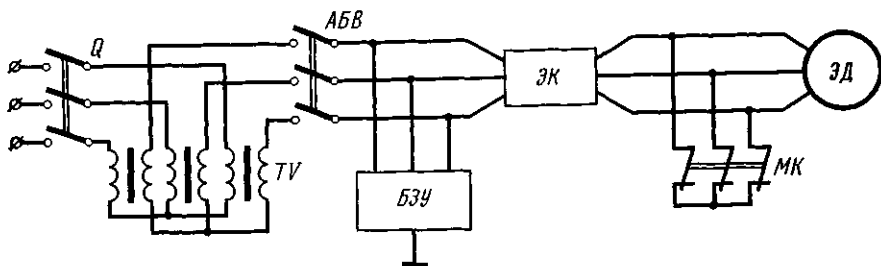


Рис. 1.1. Принципиальная схема безопасного электроснабжения участка шахты

Осуществить энергетическую изоляцию при помощи серийной рудничной аппаратуры не представляется возможным, так как время ее срабатывания в десятки раз превышает время развития аварии. Поэтому техническое решение проблемы безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах в первую очередь требует создания быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры, способной осуществить энергетическую изоляцию места повреждения силовой электрической цепи.

## 1.2. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА НА НАПРЯЖЕНИЕ 380/660 В

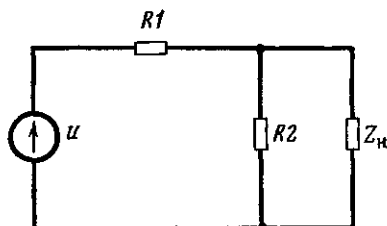
Согласно действующим «Правилам безопасности в угольных и сланцевых шахтах» [6] защита шахтных участков сетей от токов короткого замыкания осуществляется автоматическими выключателями с максимальной токовой защитой, а от утечек на землю — автоматическими выключателями в комплексе с реле утечки. Собственное время срабатывания серийных рудничных выключателей типа АВ и АФВ около 0,015—0,05 с и не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к коммутационной аппаратуре для взрывобезопасных систем электроснабжения.

Длительные поиски принципов создания быстродействующей коммутационной аппаратуры привели к разработке комбинированного способа коммутации в силовых электрических цепях [7]. Сущность этого способа заключается в том, что в коммутируемую цепь (рис. 1.2) одновременно вводятся два сопротивления: первое  $R_1$ , стремящееся в конце периода коммутации к бесконечности (выключатель), подключается последовательно нагрузке  $Z_n$ , а второе  $R_2$ , по величине близкое к нулю (короткозамыкатель), параллельно нагрузке. При этом короткозамыкатель из-за небольших межконтактных расстояний и малого веса подвижных частей позволяет значительно снизить время отключения нагрузки.

В 60-е годы на основе комбинированного способа коммутации

ИГД им. А. А. Скочинского совместно с заводом «Кузбассэлектромотор» были разработаны и испытаны в шахтных условиях опытные образцы быстродействующих фидерных автоматических выключателей типа АБВ [8] и моторные короткозамыкатели типа МК-1. Общий вид автоматического выключателя АБВ-380 на номинальный ток 200 А и напряжение 380 В показан на рис. 1.3, а его структурная электрическая схема (рис. 1.4) содержит блокировочный разъединитель  $Q$ , быстродействующий электромеханический коммутатор (выключатель — короткозамыкатель)  $QF$  —  $QS$ , устройство быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечек на землю БЗУ, блок управления моторными короткозамыкателями БУ и блокировочное реле утечки БРУ.

Рис. 1.2. Схема комбинированного способа коммутации силовой электрической цепи



Основным элементом рассматриваемого выключателя является быстродействующий электромеханический коммутатор (рис. 1.5), предназначенный для коммутации электрического тока в силовой цепи и энергетической изоляции места повреждения со стороны источника питания (силового трансформатора). Коммутатор состоит из трех основных узлов: контактной группы с дутогасительным устройством, пружинномагнитного механизма с удерживающим электромагнитом и механизма взвода.

Контактная группа смонтирована на изоляционном основании и имеет две контактные системы — размыкающую и закорачивающую. Размыкающая контактная система каждой фазы состоит из подвижного контактного моста 1 и двух неподвижных контактов 2. Закорачивающая контактная система имеет три неподвижных контакта 3 (по одному на фазу) и подвижной контактный мост 4, который несет на себе три контакта 5, электрически соединенных между собой. Подвижные контакты обеих систем связаны между собой общей тягой 6. Включение коммутатора (замыкание размыкающей и размыкание закорачивающей контактных систем) производится взводным электромагнитом 7 через рамку 8. При этом пружина 9 возвращает рамку в исходное положение после снятия напряжения с катушки взводного электромагнита. Во включенном состоянии подвижные контакты обеих систем удерживаются электромагнитом 10.

Отключение коммутатора осуществляется путем размагничивания удерживающего электромагнита при подаче импульса тока в цепь катушки 11. Под действием пружины 12 подвижные контакты приходят в движение и происходит разрыв цепи тока с од-



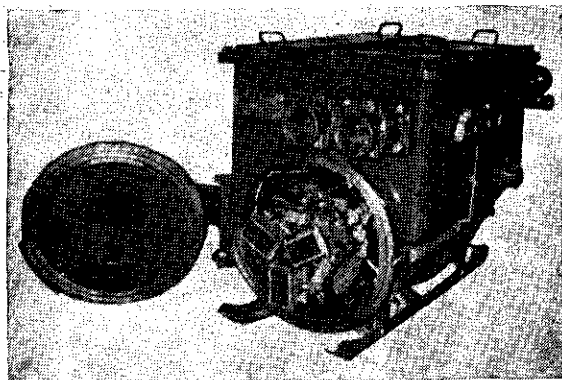
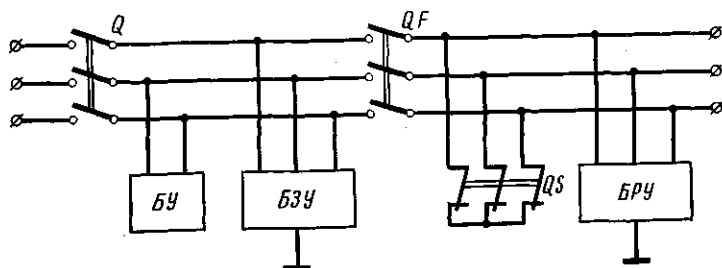


Рис. 1.3. Общий вид автоматического выключателя АБВ-380

Рис. 1.4. Структурная электрическая схема автоматического выключателя АБВ-380



новременным закорачиванием выводных зажимов. Следует отметить сложность конструкции рассматриваемого коммутатора по сравнению с конструкцией обычного серийного автоматического выключателя.

Исследования взрывобезопасных свойств системы электроснабжения, содержащей опытные образцы указанной быстродействующей аппаратуры [9], показали, что полное время защитного отключения при механических повреждениях экранированного кабеля с низким (до 30 Ом) сопротивлением экрана составляет  $6 \cdot 10^{-3}$  с, и взрывобезопасность системы электроснабжения с вероятностью взрыва метано-воздушной смеси  $\bar{P} = 1 \cdot 10^{-3}$  обеспечивается при скорости движения повреждающего тела до 5 м/с. Последнее является недостаточным для условий шахт, разрабатывающих выбросоопасные крутые пласты.

ИГД им. А.А. Скочинского проведены исследования по совершенствованию быстродействующей коммутационной аппаратуры, в результате которых разработаны модернизированный вариант быстродействующего автоматического выключателя типа АБВ-380 и полупроводниковые моторные короткозамыкатели [10].

С целью уменьшения собственного времени срабатывания автоматического выключателя после линейных размыкающих контактов коммутатора параллельно закорачивающим подключен

полупроводниковый короткозамыкатель (рис. 1.6). Полупроводниковый короткозамыкатель состоит из трехфазного двух-полупериодного моста  $VД1$  —  $VД6$ , на выходе которого в проводящем направлении включен тиристор  $VT1$ , отпираемый при одновременной подаче сигналов на короткозамыкатель и электромеханический коммутатор. Собственное время срабатывания полупроводникового короткозамыкателя равно времени включения тиристора и не превышает  $50 \cdot 10^{-8}$  с.

Срабатывание полупроводникового короткозамыкателя вызывает трехфазное короткое замыкание на выходных зажимах автоматического выключателя. При этом время, в течение которого через полупроводниковые приборы протекает ток, равно времени замыкания закорачивающих контактов коммутатора и не превышает  $3.5 \cdot 10^{-3}$  с. Указанный режим работы короткозамыкателя является импульсным, и основными параметрами, характеризующими работу его полупроводниковых приборов, являются: защитный показатель  $\int i^2 dt$ , ударный ток  $I_{уд}$ , скорость нарастания прямого тока  $di/dt$ , скорость нарастания прямого напряжения  $du/dt$ , величина повторяющегося напряжения  $U_{п}$ .

Рассмотрим работу полупроводниковых приборов головного (фидерного) короткозамыкателя. По условиям эксплуатации автоматический выключатель устанавливается вблизи силового трансформатора (не более 5 м), и фазные токи короткого замыкания ( $A$ ), возникающего при срабатывании короткозамыкателя, определяются соотношениями

$$i_A^{(3)} = -\frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{\nu t}],$$

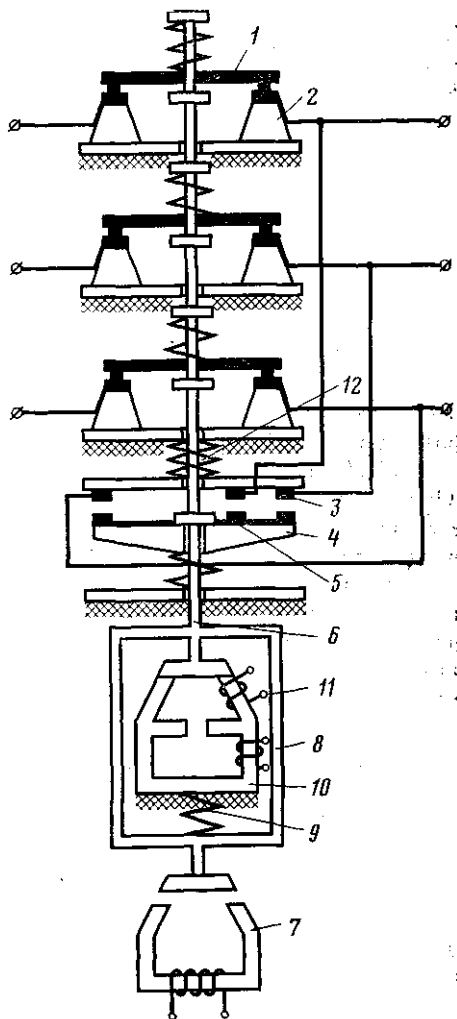


Рис. 1.5. Конструктивная схема электромеханического коммутатора

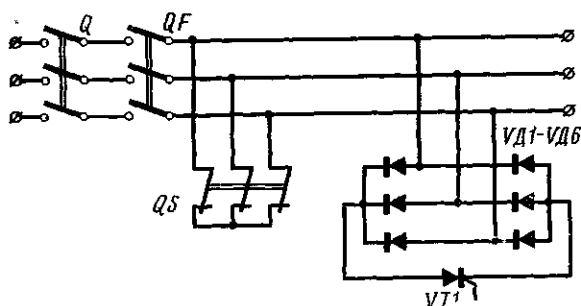


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема модернизированного коммутатора

$$i_{B,C}^{(3)} = \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t + \psi \mp 120^\circ - \varphi) - \sin(\psi \mp 120^\circ - \varphi) e^{pt}],$$

где  $U_m$  — амплитуда фазного напряжения силового трансформатора, В;  $Z = \sqrt{R_T^2 + (\omega L_T)^2}$ ;  $\varphi = \arctg(\omega L_T/R_T)$ ;  $p = -(R_T/L_T)$ ;  $R_T$ ,  $L_T$  — соответственно активное сопротивление (Ом) и индуктивность (Г) фазы силового трансформатора;  $\omega$  — угловая частота (314 1/с);  $t$  — время действия, с;  $\psi$  — начальная фаза, электрический градус.

Кривая тока, протекающего через тиристор короткозамыкателя, является огибающей амплитудных значений выпрямленных фазных токов короткого замыкания, и, как показывают исследования [11], интересующие нас параметры могут быть определены из выражений

$$\int i^2 dt = [U_m^2 (2t_{K.A} - \sin 2\omega t_{K.A})] / (4\omega Z^2), \quad (1.2)$$

$$I_{уд} = (U_m \sin \omega t_{K.A}) / Z, \quad (1.3)$$

$$di/dt = U_m / L_T, \quad (1.4)$$

где  $t_{K.A}$  — собственное время срабатывания электромеханического коммутатора (время замыкания закорачивающих контактов), с.

Скорость нарастания прямого напряжения  $du/dt$  на тиристоре короткозамыкателя при включении электромеханического коммутатора определим из схемы замещения, показанной на рис. 1.7. В рассматриваемой схеме с целью снижения скорости нарастания прямого напряжения тиристор шунтирован цепочкой  $R - C$ , параметры которой выбираются из условия возникновения колебательного процесса при подаче напряжения на короткозамыкатель, т. е.

$$[1/(2L_T C)] - [R^2/(16L_T^2)] > 0,$$

где  $R$  — активное сопротивление шунтирующей цепи (активным сопротивлением фазы силового трансформатора пренебрегаем), Ом;  $C$  — емкость конденсатора шунтирующей цепи, Ф.

Расчеты показывают, что прямое напряжение на тиристоре определяется по формуле

$$u_T = \sqrt{3}U_m [\sin(\omega t + \psi) - e^{-bt} (1 - bRC) \sin \psi \times \\ \times \cos \omega_0 t + e^{-bt} \omega_0 RC \sin \psi \sin \omega_0 t],$$

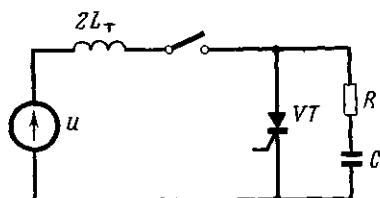
где  $b = R/(4L_T)$ ;  $\omega_0 = \sqrt{[1/(2L_T C)] - b^2}$ .

При этом максимально возможная величина скорости нарастания прямого напряжения на тиристоре

$$du_T/dt = \sqrt{3}U_m [\omega \cos \psi + b(1 - bRC) \sin \psi + \omega_0^2 RC \sin \psi]. \quad (1.5)$$

Под величиной повторяющегося напряжения обычно понимают максимально допустимое мгновенное напряжение, прикладываемое к полупроводниковому прибору. При этом учитываются все

Рис. 1.7. Расчетная схема скорости нарастания напряжения на тиристоре полупроводникового короткозамыкателя



повторяющиеся переходные напряжения. В рассматриваемой схеме полупроводникового короткозамыкателя за величину повторяющегося напряжения будем считать максимальное напряжение, возникающее на выходе моста ВД1—ВД6 (см. рис. 1.6), в процессе коммутации наиболее мощного электродвигателя. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что величина повторяющегося напряжения, прикладываемого к тиристору полупроводникового короткозамыкателя, может быть принята равной  $3U_m$ .

Рассмотрим на примере выбор полупроводниковых приборов головного короткозамыкателя автоматического выключателя типа АБВ-380.

Номинальному напряжению ( $U_n = 380$  В) и току выключателя ( $I_n = 200$  А) соответствует трансформаторная подстанция типа ТКШВП-180 мощностью 180 кВ·А ( $U_m = 326$  В,  $Z_T = 0,0309$  Ом,  $\omega L_T = 0,0294$  Ом,  $R_T = 0,01$  Ом). Согласно выражениям (1.2)—(1.4) для указанных параметров силового трансформатора и  $t_{к.а} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  с имеем  $\int i^2 dt = 122,5 \cdot 10^3$  А<sup>2</sup>с,  $I_{уд} = 9,35 \cdot 10^3$  А,  $di/dt = 3,65 \cdot 10^6$  А/с,  $U_n = 1000$  В. Для параметров шунтирующей цепи ( $C = 10 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R = 3,9$  Ом) из выражения (1.5) имеем  $du/dt = 12,9 \cdot 10^6$  В/с. Используя справочные данные на силовые диоды и тиристоры [12], выбираем тиристор типа Т500 ( $\int i^2 dt = 160 \cdot 10^3$  А<sup>2</sup>с,  $I_{уд} = 9,5 \cdot 10^3$  А,  $di/dt = 20 \cdot 10^6$  А/с,  $du/dt = 20 \cdot 10^6$  В/с) и силовые диоды типа В500 ( $\int i^2 dt = 270 \cdot 10^3$  А<sup>2</sup>с,  $I_{уд} = 12,5 \cdot 10^3$  А) десятого класса ( $U_n = 1000$  В).

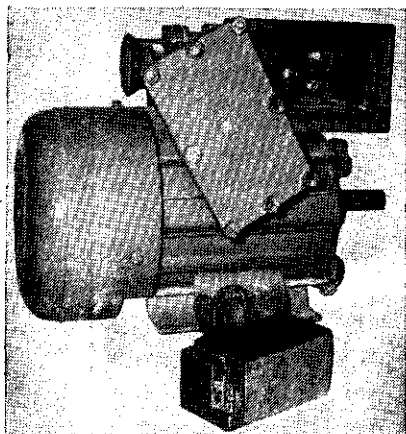


Рис. 1.8. Общий вид моторного полупроводникового короткозамыкателя

## Полупроводниковый моторный короткозамыкатель

Энергетическая изоляция места повреждения со стороны потребителей электрической энергии осуществляется при помощи моторных короткозамыкателей, которые закорачивают ЭДС электродвигателей и, как правило, встраиваются в их вводные устройства (рис. 1.8). Силовая часть схемы полупроводникового моторного короткозамыкателя типа ПМК аналогична схеме головного (фидерного) короткозамыкателя. Однако в отличие от последней время протекания тока через полу-

проводниковые приборы определяется временем затухания ЭДС и зависит от режима работы электродвигателя, его типа и мощности.

В случае закорачивания заторможенного синхронного электродвигателя фазные токи статора ( $A$ ) определяются выражениями

$$i_A = I_m \sin \psi e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad i_{B,C} = I_m \sin (\psi \pm 120^\circ) e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $I_m$  — амплитуда тока, протекающего через статорную обмотку заторможенного электродвигателя до момента его закорачивания,  $A$ ;  $\tau = L_{\text{дв.п}}/R_{\text{дв.п}}$  — постоянная времени,  $c$ ;  $R_{\text{дв.п}}$ ,  $L_{\text{дв.п}}$  — соответственно активное сопротивление (Ом) и индуктивность фазы ( $\Gamma$ ) электродвигателя в пусковом (заторможенном) режиме. При этом длительность протекания тока через полупроводниковые приборы короткозамыкателя может быть принята равной  $4\tau$ .

Исследования показывают, что наиболее тяжелым режимом с точки зрения работы моторного короткозамыкателя является закорачивание электродвигателя, работающего вхолостую.

Согласно [13], статорный ток ( $A$ ) асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, работающего вхолостую, при внезапном трехфазном коротком замыкании на его вводных зажимах определяется формулой

$$i_{\text{ст}} = \frac{U_m}{X'_{\text{ст}}} \left[ e^{-\frac{t}{T_{\text{ст}}}} \cos \psi - (1 - G) e^{-\frac{t}{T_p}} \cos (\omega t + \psi) \right],$$

где  $X'_{\text{ст}} = \omega L_{\text{дв.п}}$  — переходное индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом;  $G$  — коэффициент рассеяния магнитного по-

тока электродвигателя;  $T'_{ст} = L_{дв.п}/R_{дв.п}$  — переходная постоянная времени статора, с;  $T'_p$  — переходная постоянная времени ротора, с.

Для электродвигателей угольных комбайнов коэффициент рассеяния магнитного потока и переходная постоянная времени ротора могут быть соответственно приняты равными  $G = 0,08$ ,  $T'_p = 0,025$  с, и токи статора определяются из выражений

$$i_A = \frac{U_m}{\omega L_{дв.п}} [e^{-\frac{t}{T}} \cos \psi - 0,92e^{-40t} \cos(\omega t + \psi)], \quad (1.6)$$

$$i_{B,C} = \frac{U_m}{\omega L_{дв.п}} [e^{-\frac{t}{T}} \cos(\psi \pm 120^\circ) - 0,92e^{-40t} \cos(\omega t + \psi \pm 120^\circ)]. \quad (1.7)$$

Рассмотрим выбор силовых полупроводниковых приборов моторного короткозамыкателя для электродвигателя типа ЭДКО4-2М мощностью 115 кВт на номинальное напряжение 380 В ( $U_m = 326$  В,  $\omega L_{дв.п} = 0,238$  Ом,  $R_{дв.п} = 0,112$  Ом).

Согласно соотношениям (1.6), (1.7) имеем

$$i_A = 1370 [e^{-150t} \cos \psi - 0,92e^{-40t} \cos(\omega t + \psi)] \text{ А},$$

$$i_{B,C} = 1370 [e^{-150t} \cos(\psi \mp 120^\circ) - 0,92e^{-40t} \cos(\omega t + \psi \mp 120^\circ)] \text{ А}.$$

При помощи полученных соотношений предварительно определяем величину угла  $\psi$  ( $\psi = 45^\circ$ ), при которой ток в одной из фаз достигает своего максимально возможного значения, и далее рассчитываем мгновенные значения фазных токов статора для интервала времени  $4T'_p = 0,1$  с. Ниже приводим полученные результаты расчетов, мгновенные значения фазных токов статора и значения импульса мощности для тиристора типа ТЗ20:

| $t, 10^{-3}$ с         | 0    | 2,5  | 5    | 7,5  | 10    | 12,5 | 15   | 17,5 | 100 |
|------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-----|
| $i_A, \text{ А}$       | 80   | 665  | 1190 | 1220 | 810   | 150  | -385 | -555 | -16 |
| $i_B, \text{ А}$       | 30   | -740 | -830 | -360 | 290   | 720  | 705  | 340  | -6  |
| $i_C, \text{ А}$       | -110 | 75   | -360 | -860 | -1100 | -870 | -320 | 215  | 22  |
| $I_m, \text{ А}$       | 110  | 740  | 1190 | 1122 | 1100  | 870  | 705  | 555  | 22  |
| $U_0, \text{ В}$       | 1,0  | 1,8  | 2,3  | 2,3  | 2,25  | 2,0  | 1,75 | 1,7  | 1,0 |
| $\Delta P, \text{ Вт}$ | 100  | 1330 | 2750 | 2800 | 2400  | 1740 | 1230 | 940  | 22  |

Учитывая, что кривая тока, протекающего через тиристор короткозамыкателя, является огибающей амплитудных значений выпрямленных фазных токов, даем также отдельную графу для амплитудных значений  $I_m$  фазных токов. Для каждого значения  $I_m$  при помощи вольт-амперной характеристики определяем величину падения напряжения на тиристоре  $U_0$  и величину импульса мощности  $\Delta P = I_m U_0$ , выделяемой на тиристоре. Затем на основе этих расчетов строим кривую зависимости  $\Delta P = f(t)$  (рис. 1.9). Из рисунка видно, что график мощности представляет собой однократный импульс.

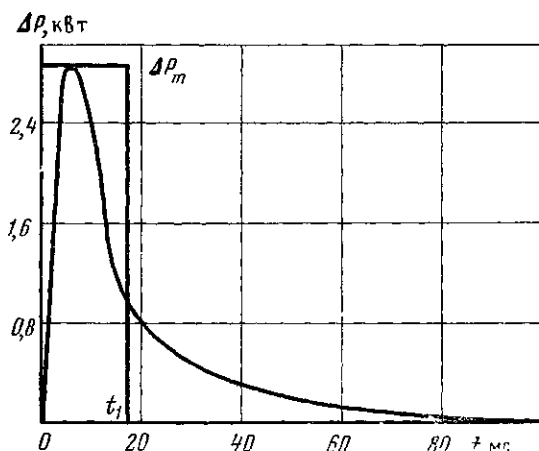
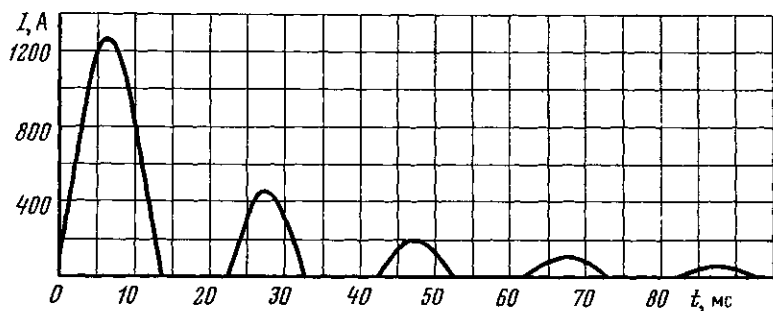


Рис. 1.9. Зависимость мощности, выделяемой на тиристоре, от времени импульса, а также эквивалентный однократный прямоугольный импульс

Рис. 1.10. Зависимость величины тока, протекающего через силовой диод короткозамыкателя, от времени затухания ЭДС электродвигателя



Согласно [14], для однократного прямоугольного импульса мощности температура полупроводниковой структуры тиристора определяется выражением

$$\Theta_{pn} = \Theta_c + \Delta P r_1, \quad (1.8)$$

где  $\Theta_c$  — температура окружающей среды, °С;  $\Delta P$  — однократный прямоугольный импульс мощности, Вт;  $r_1$  — внутреннее переходное тепловое сопротивление тиристора для  $t = t_1$ , °С/Вт;  $t_1$  — длительность импульса мощности, с.

Определив площадь фигуры, ограниченной кривой  $\Delta P = f(t)$ , и разделив ее на амплитуду импульса  $\Delta P_m = 2850$  Вт (рис. 1.9), получим длительность эквивалентного прямоугольного импульса  $t_1 = 18 \cdot 10^{-3}$  с.

Согласно [12], для  $t_1 = 18 \cdot 10^{-3}$  величина внутреннего переходного сопротивления тиристора ТЗ20  $r_1 = 0,015$  °С/Вт.

Принимая температуру окружающей среды (температуру внутри вводного устройства электродвигателя)  $\Theta_c = 80$  °С, из формулы (1.8) получим

$$\Theta_{pn} = 80 + 2850 \cdot 0,015 = 123$$
 °С.

Максимальная допустимая температура полупроводниковой структуры тиристора Т320 равна  $125^{\circ}\text{C}$ , т. е. тиристор, установленный в схеме короткозамыкателя, работает без перегрузок. Через силовые диоды короткозамыкателя протекают затухающие импульсы тока, форма которых близка к синусоидальной (рис. 1.10). Для этого случая в справочных данных приводятся зависимости перегрузочной способности диодов от времени. Например, для диода типа В2-320 при  $t = 0,1$  с максимальная допустимая амплитуда импульса равна 3700 А. Из рис. 1.10 видно, что только амплитуда первого импульса достигает значения 1250 А, т. е. диоды типа В2-320, установленные в схеме моторного короткозамыкателя, работают без перегрузок.

Усовершенствованные на базе силовых полупроводниковых приборов быстродействующие автоматические выключатели АБВ-380 в комплексе с полупроводниковыми моторными короткозамыкателями типа ПМК испытаны в шахтных условиях [15] и демонстрировались на Международной выставке «Уголь-75» [16]. С учетом замечаний Межведомственной комиссии ИГД им. А. А. Скочинского совместно с ВНИИВЭ разработан быстродействующий автоматический выключатель АБВ-250У5 на номинальный ток 250 А и напряжение 380/660 В (ТУ 16.522.126—81).

В отличие от выключателя АБВ-380 в конструкции и электрической схеме АБВ-250У5 применены унифицированные элементы (взрывонепроницаемая оболочка, разъединитель, блокировочное реле утечки, блок дистанционного отключения и т. д.) и электро-механический коммутатор с индукционно-динамическим приводом.

Кроме быстрого действия к коммутационной аппаратуре предъявляются требования достаточной надежности. Согласно расчетным данным [17], наработка на отказ функциональных цепей выключателя АБВ-250У5 совместно с полупроводниковыми моторными короткозамыкателями в режиме защитного отключения равна 15 423 ч.

### **1.3. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА НА НАПРЯЖЕНИЕ 127 В**

Электроснабжение ручного электроинструмента и сетевого освещения в угольных шахтах осуществляется напряжением 127 В при помощи пусковых агрегатов типа АП, АПБ и АБК, полное время срабатывания которых при механических повреждениях кабеля в десятки раз превышает время развития аварии. Кроме того, электрооборудование сетей 127 В эксплуатируется в очистных и подготовительных забоях, для которых характерны наиболее высокая вероятность внезапных выбросов угля и газа и механические повреждения кабеля. В связи с этим необходимо создание быстродействующей аппаратуры на напряжение 127 В.

На основе комбинированного способа коммутации электрических цепей и силовых полупроводниковых приборов нами раз-



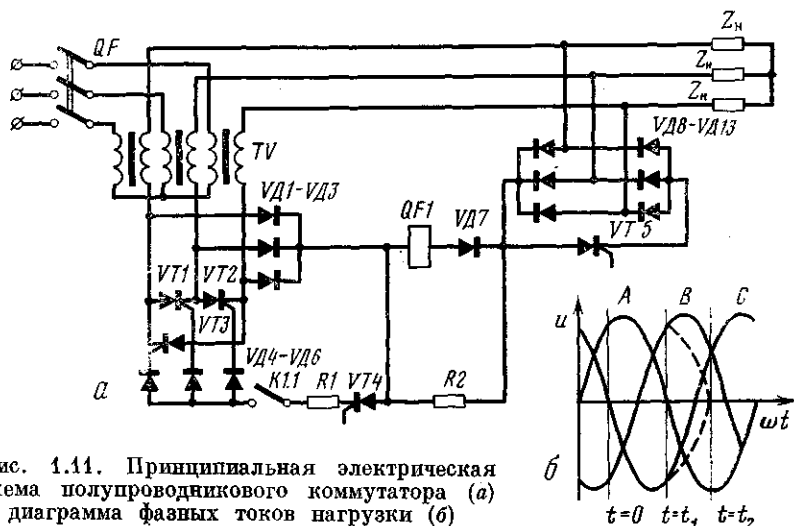


Рис. 1.11. Принципиальная электрическая схема полупроводникового коммутатора (а) и диаграмма фазных токов нагрузки (б)

работан быстродействующий, бесконтактный коммутатор [18], принципиальная электрическая схема которого показана на рис. 1.11, а. Из рис. 1.11, а видно, что бесконтактный коммутатор представляет собой тиристорный пускатель  $VT1-VT3$ , включенный на входе вторичных обмоток силового трансформатора  $TV$ , и головной полупроводниковый короткозамыкатель  $VД8-VД13$ ,  $VT5$ , включенный на выходе вторичных обмоток силового трансформатора.

Оперативное включение и отключение нагрузки осуществляется тиристорным пускателем, а защитное отключение — путем закорачивания выходных зажимов вторичных обмоток силового трансформатора при помощи головного полупроводникового короткозамыкателя с последующим отключением токов короткого замыкания тиристорным пускателем. При этом время защитного отключения равно времени включения тиристора  $VT5$  (несколько микросекунд).

Отключение токов короткого замыкания, образующихся при срабатывании короткозамыкателя, происходит следующим образом. В случае закорачивания выходных зажимов вторичных обмоток силового трансформатора прерывается ток, протекающий через вспомогательный тиристор  $VT4$  от анодной группы трехфазного моста  $VД8-VД13$  через резисторы  $R1, R2$  в цепь управления тиристорами  $VT1-VT3$ , и тиристор  $VT4$  запирается, разрывая цепь управления тиристорами  $VT1-VT3$ .

Процесс оперативного отключения нагрузки осуществляется путем разрыва указанной цепи контактом  $K1.1$  реле дистанционного управления. Допустим, что разрыв цепи управления осуществлен в момент времени  $t = 0$  (рис. 1.11, б), последовавший непосредственно после включения тиристора  $VT2$  (см. рис. 1.11, а). Согласно графику мгновенных значений фазных токов (рис. 1.11, б)

в интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$ , где  $t_1$  — момент перехода тока фазы  $A$  через нуль, ток проводят тиристоры  $VT1$  и  $VT2$ . В момент времени  $t_1$  происходит запираание тиристора  $VT1$  и должен вступить в работу тиристор  $VT3$ , но из-за разрыва цепи управления последний не включается. В результате этого трехфазная система переходит в двухфазную и, начиная с момента времени  $t_1$ , в течение 90 электрических градусов ток проводит только тиристор  $VT2$ . В момент времени  $t_2$  ток, протекающий через тиристор  $VT2$ , снижается до нуля, происходит запираание указанного тиристора, и прерывается ток нагрузки.

Из графика, показанного на рис. 1.11, б, видно, что максимальное время оперативного отключения нагрузки равно  $11,67 \cdot 10^{-3}$  с ( $\omega t = 120$  электрических градусов). В случае защитного отключения нагрузки из-за возникающего переходного процесса трехфазного короткого замыкания время, в течение которого происходит разрыв тока нагрузки, несколько увеличивается и, как показывают экспериментальные исследования, не превышает  $13 \cdot 10^{-3}$  с.

Основным недостатком рассматриваемого быстродействующего бесконтактного коммутатора является то, что в случае защитного отключения к месту аварии со стороны источника питания прикладывается напряжение, обусловленное падением напряжения на полупроводниковых приборах короткозамыкателя. Однако из-за небольшой мощности силового трансформатора ( $S \leq 4$  кВ·А) величина падения напряжения незначительна и применение дополнительного контактного короткозамыкателя не требуется.

Другим способом энергетической изоляции места повреждения от источника питания является разрыв трехфазной электрической цепи за время, меньшее времени развития аварии. Осуществить последнее при помощи контактной коммутационной аппаратуры из-за возникающих в сети больших перенапряжений не представляется возможным. Автором предложено бесконтактное коммутационное устройство для отключения трехфазной цепи [19], позволяющее создать на его основе быстродействующий бесконтактный выключатель, осуществляющий разрыв трехфазной цепи за время не более  $1,0 \cdot 10^{-3}$  с.

На рис. 1.12 показана принципиальная электрическая схема бесконтактного выключателя, используемого в схеме быстродействующего аппарата бесконтактной коммутации типа АББК [20].

Быстродействующий бесконтактный выключатель состоит из трехфазного двухполупериодного выпрямительного моста  $VT1-VT3-VD1-VD3$ , включенного на входе вторичных обмоток силового трансформатора  $TV1$ , закорачивающего тиристора  $VT4$ , блока принудительной коммутации тиристора  $VT4$  ( $C_K, L_K, VT5$ ) и блока управления ( $VD4-VD7, R1-R2, C1-C2, K1.1$ ).

Включение бесконтактного выключателя осуществляется подачей от блока управления импульсов тока в цепи управляющих электродов тиристоров  $VT1-VT4$ . В результате происходит короткое замыкание на входе вторичных обмоток силового транс-



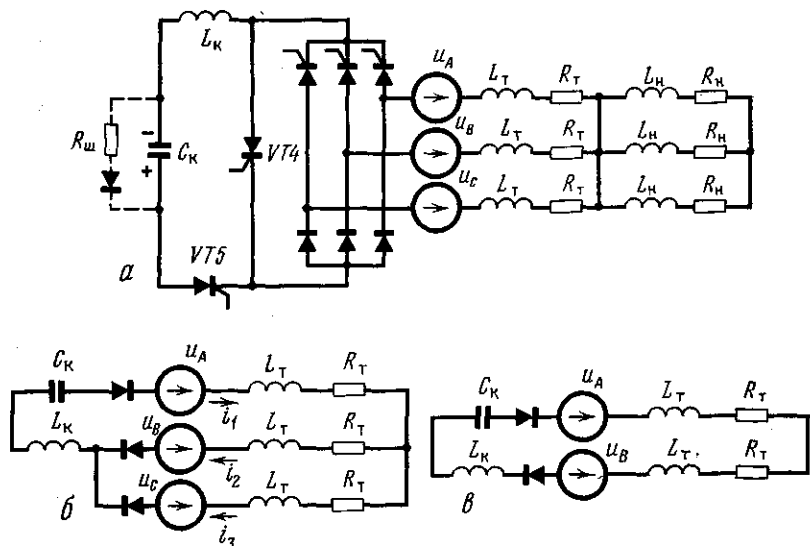


Рис. 1.13. Расчетная схема (а) и схемы замещения (б, в) переходного процесса аварийного отключения сети

На рис. 1.13, а показана расчетная схема переходного процесса аварийного отключения (процесса энергетической изоляции места повреждения со стороны источника питания), в которой из контура коммутации исключены индуктивность и активное сопротивление нагрузки, так как последние зашунтированы полупроводниковым моторным короткозамыкателем, время срабатывания которого практически равно нулю (несколько микросекунд).

На рис. 1.13 приняты следующие обозначения:  $L_T$ ,  $R_T$  — соответственно индуктивность и активное сопротивление фазы силового трансформатора;  $C_K$  — емкость коммутирующего конденсатора;  $L_K$  — индуктивность, ограничивающая скорость нарастания тока, протекающего через тиристор VT5;  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  — фазные напряжения силового трансформатора.

В процессе аварийного отключения источника питания число одновременно открытых полупроводниковых приборов трехфазного моста меняется, поскольку меняются величина зарядного тока и полярность напряжения коммутирующего конденсатора. В начале процесса открыты три полупроводниковых прибора (см. рис. 1.13, б), а в интервале времени от момента перехода напряжения на конденсаторе через нуль до момента перехода тока, протекающего через тиристор VT5, через нуль можно считать, что открыты два полупроводниковых прибора моста (режим выпрямителя, см. рис. 1.13, в).

При подаче импульса тока в цепь управляющего электрода тиристора VT5 ( $t = 0$ ) происходит разряд коммутирующего конденсатора навстречу анодному току тиристора VT4. Величина

разрядного тока и напряжение коммутирующего конденсатора определяются следующим образом:

$$i_p = (U_C(0) \sqrt{L_K C_K} \sin \omega_0 t) / L_K, \quad (1.9)$$

$$u_C = U_C(0) \cos \omega_0 t, \quad (1.10)$$

где  $U_C(0)$  — напряжение предварительного заряда коммутирующего конденсатора;  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_K C_K}$ .

Как только величина разрядного тока достигнет значения величины тока  $I(0)$ , протекающего через тиристор  $VT4$ , происходит запираание тиристора  $VT4$  ( $t = t_1$ ). При этом остаточное напряжение на коммутирующем конденсаторе  $u_C(t_1) = U_C(0) \cos \omega_0 t_1$ , где  $t_1$  — момент времени запираания тиристора  $VT4$ :

$$t_1 = \frac{1}{\omega_0} \arcsin \{ [I(0) L_K] / [U_C(0) \sqrt{L_K C_K}] \}. \quad (1.11)$$

В интервале времени  $t_1 \leq t \leq t_2$ , где  $t_2$  — момент перехода напряжения на коммутирующем конденсаторе через нуль, для схемы, показанной на рис. 1.13, б, справедливы уравнения

$$L_T \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right) + L_K \frac{di_1}{dt} + R_T (i_1 + i_2) + \frac{1}{C_K} \int i_1 dt = u_A - u_B, \quad (1.12)$$

$$L_T \left( \frac{di_3}{dt} - \frac{di_2}{dt} \right) + R_T (i_3 - i_2) = u_B - u_C, \quad (1.13)$$

$$i_1 = i_2 + i_3, \quad (1.14)$$

где  $i_1, i_2, i_3$  — мгновенные значения фазных токов;  $u_A, u_B, u_C$  — мгновенные значения фазных напряжений.

Решая совместно уравнения (1.12)–(1.14) относительно тока  $i_1$ , протекающего через тиристор  $VT5$  и характеризующего процесс перезаряда коммутирующего конденсатора, получим

$$(1,5L_T + L_K) \frac{di_1}{dt} + 1,5R_T i_1 + \frac{1}{C_K} \int i_1 dt = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 60^\circ).$$

Считая в интервале времени  $t_1 \leq t \leq t_2$  величину напряжения источника питания постоянной, получим следующее уравнение:

$$L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i + \frac{1}{C_K} \int i dt = 1,5 U_m,$$

где  $L_1 = 1,5 L_T + L_K$ ;  $R_1 = 1,5 R_T$ ;  $i$  — ток, протекающий через тиристор  $VT5$ . Решение приведенного выше уравнения имеет вид

$$i = \frac{I(0)}{\sin \varphi_1} e^{-b_1 t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (1.15)$$

где  $I(0)$  — амплитуда фазного тока нагрузки, предшествующего моменту аварийного отключения;

$$\varphi_1 = \arctg \{ [I(0) L_1 \omega_1] / [1,5 U_m + u_C(t_1) - 0,5 R_1 I(0)] \};$$

$$b_1 = R_1 / (2 L_1); \quad \omega_1 = \sqrt{[1 / (L_1 C_K)] - b_1^2}.$$

При этом напряжение на коммутирующем конденсаторе имеет вид

$$u_C = 1,5U_m - A_1 e^{-b_1 t} \sqrt{(0,5R_1)^2 + \omega_1^2 L_1^2} \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1), \quad (1.16)$$

где  $A_1 = I(0)/\sin \varphi_1$ ;  $\alpha_1 = \arctg [\omega_1 L_1 / (0,5R_1)]$ .

В интервале времени  $t > t_2$  для схемы, показанной на рис. 1.13, в, справедливо уравнение

$$(2L_T + L_K) \frac{di}{dt} + 2R_T i + \frac{1}{C_K} \int i dt = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

решением которого для постоянной величины напряжения источника питания, равной  $\sqrt{3}U_m$ , является

$$i = \frac{i(t_2)}{\sin \varphi_2} e^{-b_2 t} \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (1.17)$$

где  $i(t_2)$  — значение величины тока, протекающего через тиристор VT5 в момент времени, когда напряжение на коммутирующем конденсаторе переходит через нуль;

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \arctg \{ [i(t_2) \omega_2 L_2] / [\sqrt{3} U_m - 0,5R_2 i(t_2)] \}; & L_2 &= 2L_T + L_K; \\ R_2 &= 2R_T; & b_2 &= R_2 / (2L_2); & \omega_2 &= \sqrt{[1 / (L_2 C_K)] - b_2^2}. \end{aligned}$$

Напряжение на коммутирующем конденсаторе в указанном интервале времени находится из соотношения

$$u_C = \sqrt{3} U_m - A_2 e^{-b_2 t} \sqrt{(0,5R_2)^2 + \omega_2^2 L_2^2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2), \quad (1.18)$$

где  $\alpha_2 = \arctg [(\omega_2 L_2) / (0,5R_2)]$ ;  $A_2 = i(t_2) / \sin \varphi_2$ .

При переходе тока, протекающего через тиристор VT5 и определяемого выражением (1.17), через нуль ( $t = t_3$ ) происходит заширение тиристора VT5 и прерывание тока нагрузки.

Рассмотрим на примере выбор параметров элементов быстродействующего бесконтактного выключателя для системы электропитания шахтного ручного электроинструмента. Питание ручных горных электросверл осуществляется от понизительных силовых трансформаторов типа ТСШ мощностью от 2,5 до 4 кВ·А. Наиболее тяжелым случаем с точки зрения работы бесконтактного выключателя является отключение тока короткого замыкания.

Исследования показывают, что максимально возможная величина тока короткого замыкания в зависимости от времени срабатывания комбинированного быстродействующего защитного устройства [21] может быть определена из следующих выражений:

при трехфазных коротких замыканиях ( $t_{3.у} \leq 0,2 \cdot 10^{-3}$  с)

$$I_m^{(3)} = I_{н.м} + [U_m t_{3.у} / L_T];$$

при двухфазных коротких замыканиях в экранированном кабеле с низким (до 100 Ом) сопротивлением экрана, а также при двухфазных коротких замыканиях, не связанных с землей,

и времени срабатывания защитного устройства  $t_{з.у} \leq 1 \cdot 10^{-3}$  с

$$I_m^{(2)} = I_{н.м} + [\sqrt{3} U_m t_{з.у} / (2L_T)]; \quad (1.19)$$

при двухфазных коротких замыканиях, не связанных с землей, и времени срабатывания защитного устройства  $1 \cdot 10^{-3} \leq t_{з.у} \leq 2,5 \cdot 10^{-3}$  с

$$I_m^{(2)} = I_{н.м} + [(\sqrt{3} U_m \sin \omega t_{з.у}) / (2Z_K)],$$

где  $I_{н.м}$  — амплитуда фазного тока нагрузки, А;  $Z_K$  — сопротивление короткого замыкания, Ом;  $t_{з.у}$  — собственное время срабатывания защитного устройства, с.

В конкретной системе электроснабжения, содержащей силовой трансформатор мощностью 2,5 кВ·А ( $U_m = 108$  В,  $L_T = 0,72 \cdot 10^{-3}$  Г,  $R_T = 0,165$  Ом), экранированный кабель с сечением рабочих жил 4 мм<sup>2</sup> длиной 130 Ом ( $L_K = 0,04 \cdot 10^{-3}$  Г,  $R_K = 0,55$  Ом) и электродвигатель ручного электроинструмента мощностью 1,6 кВт ( $L_{дв.п} = 1,9 \cdot 10^{-3}$  Г,  $R_{дв.п} = 1,0$  Ом), наиболее тяжелым режимом является отключение не связанного с землей тока двухфазного короткого замыкания, возникающего на выходных зажимах вторичных обмоток силового трансформатора. Для указанных параметров системы электроснабжения

$$I_m^{(2)} = I(0) = 85 + \frac{1,73 \cdot 108}{2 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 150 \text{ А.}$$

Величину индуктивности цепи принудительной коммутации тиристора VT4 определяем из выражения

$$\frac{U_C(0)}{L_K} \leq \frac{di_T}{dt}, \quad (1.20)$$

где  $di_T/dt$  — максимально допустимое значение скорости тока, протекающего через тиристор VT5.

Для тиристора VT5 типа ТЧ ( $di/dt = 100 \cdot 10^6$  А/с) и  $U_C(0) = 200$  В принимаем  $L_K = 5 \cdot 10^{-6}$  Г. Согласно выражению (1.9) минимальная величина емкости коммутирующего конденсатора равна

$$C_K = [I^2(0)L_K] / [U_C^2(0)] = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 150^2 / 200^2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

В процессе принудительного запираания на тиристоре VT4 должно поддерживаться обратное смещение в течение времени его выключения  $t_b$ . Используя в схеме в качестве тиристора VT4 тиристор типа ТБ ( $t_b = 0,05 \cdot 10^{-3}$  с), выбираем коммутирующий конденсатор емкостью  $50 \cdot 10^{-6}$  Ф. Тогда согласно выражению (1.9) величина разрядного тока (А) коммутирующего конденсатора

$$i_p = \frac{U_C(0) \sqrt{L_K C_K}}{L_K} \sin \omega_0 t = 632 \sin \omega_0 t,$$

где  $\omega_0 = 6,32 \cdot 10^4$  1/с.

При этом длительность интервала  $0 < t < t_1$ , в течение которого разрядный ток достигает величины начального  $I(0)$ , и остаточное напряжение на конденсаторе соответственно равны

$$t_1 = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}, u_C(t_1) = U_C(0) \cos \omega_0 t_1 = 194 \text{ В}.$$

В интервале времени  $t_1 \leq t \leq t_2$  в соответствии с выражениями (1.15), (1.16) разрядный ток и напряжение на коммутирующем конденсаторе

$$\begin{aligned} i &= 167 e^{-0,114 \cdot 10^8 t} \sin(\omega_1 t + 64,2^\circ) \text{ А}, \\ u_C &= 162 - 780 e^{-0,114 \cdot 10^8 t} \sin(\omega_1 t + 152,7^\circ) \text{ В}, \end{aligned} \quad (1.21)$$

где  $\omega_1 = 4,3 \cdot 10^8 \text{ 1/с}$ .

Из кривой  $u_C = f(t)$ , построенной при помощи соотношения (1.21), определяем величину  $t_2$ . В нашем случае  $t_2 = 0,06 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , при этом  $i(t_2) = 163 \text{ А}$ . Пренебрегая падением напряжения на  $L_k$  ( $L_k \ll 1,5 L_T$ ), можно считать, что на тиристоре VT4 в течение  $0,06 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  поддерживается обратное смещение, т. е. условия запертирования тиристора соблюдаются ( $t_2 > t_b$ ). В том случае, когда падением напряжения на  $L_k$  пренебречь нельзя, величина напряжения на тиристоре VT4 определяется из формулы

$$u_T = 1,5 U_m - 1,5 A_1 e^{-b_1 t} \sqrt{(R_T - b_1 L_T)^2 + \omega_1^2 L_T^2} \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha'_1), \quad (1.22)$$

где  $\alpha'_1 = \arctg[(\omega_1 L_T)/(R_T - b_1 L_T)]$ .

В течение следующего интервала времени  $t_2 \leq t \leq t_3$  разрядный ток и напряжение на коммутирующем конденсаторе согласно выражениям (1.17), (1.18) соответственно равны

$$\begin{aligned} i &= 166 e^{-0,114 \cdot 10^8 t} \sin(3,72 \cdot 10^3 \cdot 57,2 t + 79,7^\circ) \text{ А}, \\ u_C &= 187 - 935 e^{-0,114 \cdot 10^8 t} \sin(3,72 \cdot 10^3 \cdot 57,2 t + 168,5^\circ) \text{ В}. \end{aligned}$$

Момент перехода тока, протекающего через тиристор VT5 через нуль, определяем из соотношения

$$t_3 = \frac{1}{\omega_2} \left( \pi - \arctg \frac{i(t_2) \omega_2 L_2}{\sqrt{3} U_m - 0,5 R_2 i(t_2)} \right). \quad (1.23)$$

В рассматриваемом примере  $t_3 = 0,471 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , и собственное время срабатывания бесконтактного выключателя при аварийном отключении сети

$$t_{k,a} = t_1 + t_2 + t_3 = 0,0038 \cdot 10^{-3} + 0,06 \cdot 10^{-3} + 0,471 \cdot 10^{-3} = 0,5348 \cdot 10^{-3} \text{ с (рис. 1.14, кривая I)}.$$

При этом  $t_3$  составляет 88,3% от общего времени, и выражение (1.23) может быть принято для ориентировочного расчета времени аварийного отключения сети. Согласно выражению (1.18) в процессе отключения величина напряжения на коммутирующем конденсаторе непрерывно возрастает. В рассматриваемом примере при  $t = t_3$   $u_C(t_3) = 1062 \text{ В}$  (рис. 1.14, кривая 3). Величина ука-



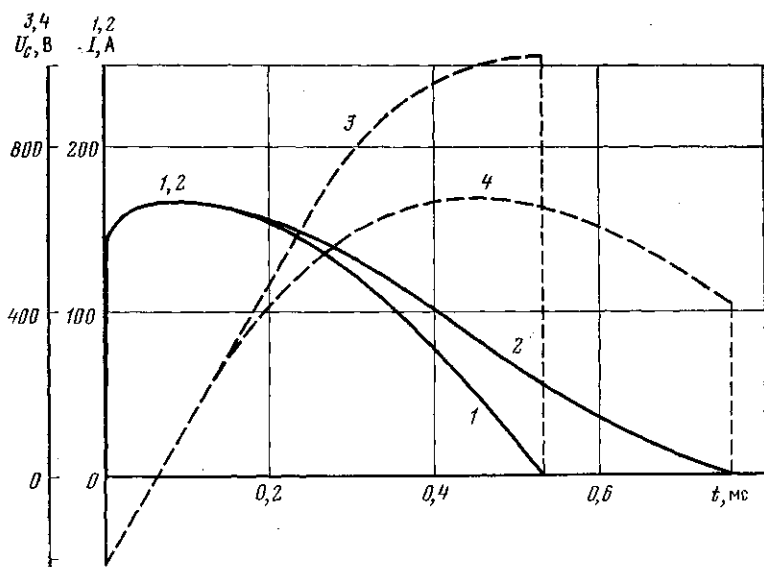


Рис. 1.14. Зависимость величин тока (1, 2) и напряжения (3, 4) коммутирующего конденсатора от времени отключения сети

званного напряжения может быть снижена за счет увеличения емкости (уменьшения частоты собственных колебаний контура коммутации) или путем шунтирования конденсатора цепочкой резистор—диод (на рис. 1.13 показано пунктиром).

Расчет переходного процесса при шунтировании коммутирующего конденсатора показывает, что в интервале времени  $t > t_2$  (до момента  $t_2$  шунтирующий диод закрыт) ток, протекающий через тиристор  $VT5$ , и напряжение на конденсаторе определяются из следующих выражений:

$$i = \frac{i(t_2)(R_2 + R_m) - \sqrt{3}U_m}{(R_2 + R_m) \sin \varphi_3} e^{-b_3 t} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + \frac{\sqrt{3}U_m}{R_2 + R_m}, \quad (1.24)$$

$$u_C = \frac{\sqrt{3}U_m R_m}{R_2 + R_m} - A_3 e^{-b_3 t} \sqrt{(R_2 - b_3 L_2)^2 + \omega_3^2 L_2^2} \times \sin(\omega_3 t + \varphi_3 + \alpha_3), \quad (1.25)$$

где  $R_m$  — величина сопротивления резистора, шунтирующего коммутирующий конденсатор;

$$b_3 = R_2/(2L_2) + 1/(2C_K R_m); \quad \omega_3 = \sqrt{[(R_2 + R_m)/(L_2 C_K R_m)] - b_3^2};$$

$$A_3 = [i(t_2)(R_2 + R_m) - \sqrt{3}U_m]/[(R_2 + R_m) \sin \varphi_3];$$

$$\alpha_3 = \arctg [(\omega_3 L_2)/(R_2 - b_3 L_2)].$$

В случае шунтирования коммутирующего конденсатора резистором, сопротивление которого равно 7 Ом, в рассматриваемом примере согласно выражениям (1.24), (1.25) имеем

$$i = 25,5 + 159 e^{-1,5 \cdot 10^3 t} \sin(3,65 \cdot 10^3 \cdot 57,2t + 59,2^\circ) \text{ A},$$

$$u_c = 187 - 930 e^{-1,5 \cdot 10^3 t} \sin(3,65 \cdot 10^3 \cdot 57,2t + 168,4^\circ) \text{ В}.$$

На рис. 1.14 показаны кривые изменения во времени тока, протекающего через тиристор  $VT5$ , и напряжения на коммутирующем конденсаторе. Из рис. 1.14 видно, что время аварийного отключения сети  $t_{\text{отк}} = 0,76 \cdot 10^{-3}$  с (кривая 2), а максимальная величина напряжения на коммутирующем конденсаторе не превышает 700 В (кривая 4). Максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе характеризует величину повторяющегося напряжения  $U_n$ , которое согласно схеме, показанной на рис. 1.13, прикладывается к каждому тиристорам  $VT1-VT4$  и силовому диоду  $VD1-VD3$  трехфазного двухполупериодного моста. В связи с этим в электрической схеме быстродействующего бесконтактного аппарата должны быть приняты тиристоры  $VT1-VT4$  на рекомендуемое рабочее напряжение 560 В ( $U_n = 700$  В), диоды  $VD1-VD3$  на рекомендуемое рабочее напряжение 470 В ( $U_n = 700$  В). При этом величину номинального напряжения коммутирующего конденсатора ( $C_k = 50 \cdot 10^{-6}$  Ф) принимаем равной 1000 В.

На основании вышеизложенного можно рекомендовать следующую методику выбора оптимальных параметров элементов электрической схемы быстродействующего бесконтактного выключателя.

Зная параметры системы электроснабжения, при помощи выражения (1.19) определяем максимальную величину тока  $I(0)$ , отключаемого выключателем.

Задаваясь величиной напряжения  $U_c(0)$  предварительного заряда коммутирующего конденсатора при помощи выражения (1.9) для принятого типа тиристора ( $di_T/dt$ ), управляющего разрядом коммутирующего конденсатора, определяем величину  $L_k$  и емкость  $C_k$ .

Используя выражение (1.16), путем последовательных приближений выбираем емкость коммутирующего конденсатора, обеспечивающую надежное запирающее закорачивающего тиристора ( $t_2 \geq t_B$ ).

Для выбранной емкости при помощи выражений (1.24), (1.25) из условий  $t_{\text{отк}} \leq 0,8 \cdot 10^{-3}$  с,  $U_{c.m} \leq 700$  В, определяем величину сопротивления резистора, шунтирующего коммутирующий конденсатор.

По максимальному значению величины напряжения перезаряда коммутирующего конденсатора, определяемой выражением (1.25), проводим выбор рекомендуемого рабочего напряжения полупроводниковых приборов, установленных в схеме.

## Устройство управления моторным полупроводниковым короткозамыкателем

Составной частью общей электрической схемы быстродействующего коммутационного аппарата является устройство для управления моторным короткозамыкателем. Управление полупроводнико-

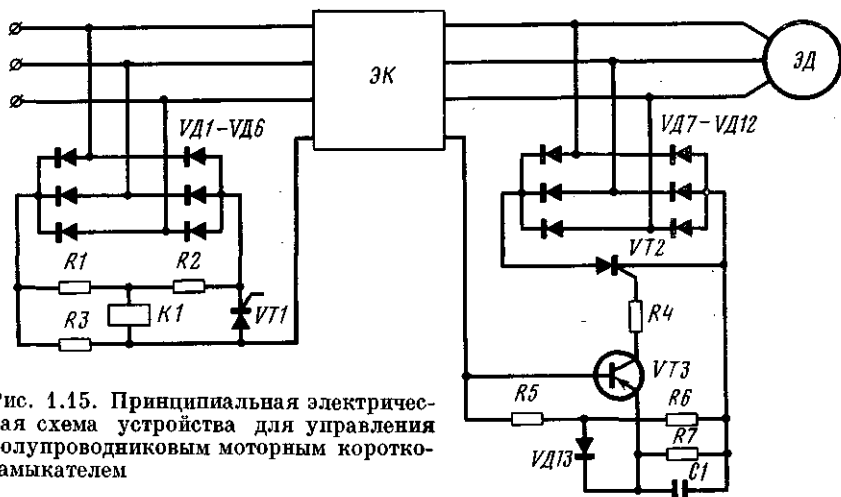


Рис. 1.15. Принципиальная электрическая схема устройства для управления полупроводниковым моторным короткозамыкателем

выми моторными короткозамыкателями в системе электроснабжения напряжением 380/660 В осуществляется по двум дополнительным жилам, конструктивно расположенным в центре кабеля. Кабели, применяемые для питания ручного электроинструмента, должны иметь простую конструкцию и небольшой вес на единицу длины. На рис. 1.15 показана электрическая схема устройства, которое осуществляет управление моторным полупроводниковым короткозамыкателем по одной дополнительной жиле, конструктивно расположенной в любом месте по сечению кабеля.

Устройство содержит: трехфазный двухполупериодный мост  $VD1-VD6$ , подключенный к сети в начале кабельной линии (на выходе вторичных обмоток силового трансформатора), резисторы  $R1-R3$ , электромеханическое реле  $K1$  и тиристор  $VT1$ , включенные на выходе указанного моста, одну дополнительную жилу кабеля и подключенные к схеме полупроводникового короткозамыкателя ( $VD7-VD12$ ,  $VT2$ ) резисторы  $R4-R7$ , диод  $VD13$ , конденсатор  $C1$  и триод  $VT3$ .

Управление короткозамыкателем осуществляется следующим образом. В случае аварийного отключения сети от устройства быстродействующей защиты одновременно поступают сигналы в цепь управления быстродействующим бесконтактным аппаратом и в цепь управляющего электрода тиристора  $VT1$  (см. рис. 1.15). Последний открывается и прерывает ток, протекающий по жиле управления от анодной группы моста  $VD1-VD6$  к катодной группе мос-

та  $VD7-VD12$ . В результате напряжение на резисторах  $R5, R6$  становится равным нулю и происходит разряд конденсатора  $C1$  в начале по цепи эмиттер — база триода  $VT3$ , резисторы  $R5, R6$ , а затем — эмиттер — коллектор триода  $VT3$ , резистор  $R4$ , управляющий электрод — катод тиристора  $VT2$ . Аналогичное срабатывание моторного короткозамыкателя происходит при обрыве жилы управления во включенном состоянии сети. При этом из-за возникающего трёхфазного короткого замыкания устройство защиты выдает сигнал на срабатывание быстродействующего бесконтактного аппарата.

При разрыве жилы управления аппарат не включается, так как к обмотке электромагнитического реле  $K1$  (реле включено в диагональ моста, составленного из резисторов  $R1-R3, R5-R6$ ) прикладывается напряжение. В результате этого реле  $K1$  срабатывает и разрывает цепь оперативного включения аппарата.

На основании проведенных исследований ИГД им. А. А. Скочинского совместно с Прокопьевским заводом шахтной автоматики (ПЗША) разработан и испытан в шахтных условиях быстродействующий бесконтактный аппарат АББК-2,5 [20].

# ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И УТЕЧЕК НА ЗЕМЛЮ

В настоящее время для участков сетей шахт, разрабатывающих крутые пласты, серийно изготавливается гибкий экранированный кабель марки ГВШОП, отличающийся устойчивостью к механическим воздействиям падающих кусков породы и имеющий низкое (до 0,1 кОм) сопротивление экрана (ТУ 16-505.826-75). Кабель марки ГВШОП (рис. 2.1) содержит одиннадцать жил: шесть основных и пять вспомогательных для цепей управления. Оболочка кабеля армирована металлическим кордом или стальными канатами, а все его жилы, кроме заземляющей, изолированы поливинилхлоридным пластиком и покрыты графитополимерным экраном.

Конструктивное исполнение кабеля таково, что любые его повреждения металлическим клином вызывают однофазную утечку на землю через сопротивление экрана или двух- и трехфазные короткие замыкания силовых жил с одновременной утечкой на землю. Поэтому в качестве датчика, фиксирующего момент механического повреждения кабеля, может быть использовано устройство защиты от токов короткого замыкания и утечек на землю. Согласно техническим требованиям, предъявляемым к быстродействующей

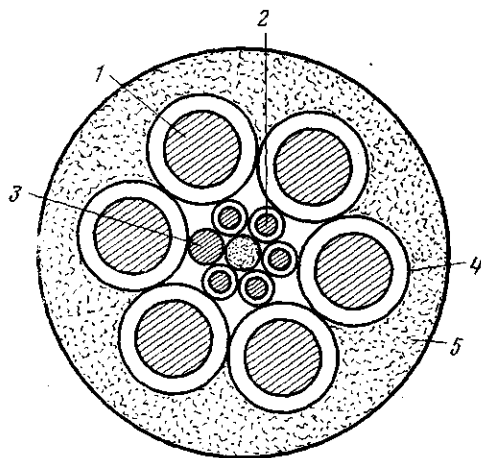


Рис. 2.1. Конструкция кабеля марки ГВШОП

1 — жилы основные; 2 — жилы вспомогательные; 3 — жила заземляющая; 4 — экран графитовый; 5 — оболочка

щей аппаратуре, полное время защитного отключения поврежденной кабельной сети не должно превышать  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с [5]. С учетом собственного времени срабатывания головного полупроводникового короткозамыкателя ( $t_{к.а} \leq 0,1 \cdot 10^{-3}$  с) из формулы (1.1) имеем  $t_{з.у} = 2,4 \cdot 10^{-3}$  с.

## 2.1. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

Существующая рудничная защитная аппаратура от утечки тока на землю типа УАКИ, АЗАК, АЗПБ имеет время срабатывания около 0,05—0,01 с и не может быть использована в качестве быстродействующей защиты в участковых сетях шахт, разрабатывающих крутые пласты. Поэтому необходимо создание специального устройства защиты, отвечающего указанному времени срабатывания.

### 2.1.1. Анализ схемных решений устройств защиты от утечек на землю с точки зрения их быстродействия

В настоящее время широкое применение в качестве аппаратуры защиты от токов утечки на землю получили устройства, использующие токи и напряжения защищаемой сети [22, 23]. Например, шахтные аппараты общесетевой защиты типа УАКИ, АЗАК для целей контроля активного сопротивления изоляции используют оперативный постоянный ток, источником которого является трехфазный однополупериодный выпрямитель, подключенный к фазам контролируемой сети.

На рис. 2.2 приведены типовые принципиальные схемы защитных устройств, использующих токи и напряжения защищаемой сети. Основными из них являются устройство, выполненное по схеме 3В (три полупроводниковых диода подключены к фазам контролируемой сети, а их общая точка через нагрузку соединена с землей), и фильтр напряжения нулевой последовательности (три равных по величине резистора или конденсатора одинаковой емкости соединены в звезду и подключены к фазам контролируемой сети, а их общая точка через двухполупериодный выпрямительный мост и нагрузку соединена с землей). Остальные, например устройство с делителем выпрямленного напряжения (см. рис. 2.2, г), являются комбинированными, так как содержат трехфазный однополупериодный выпрямитель и фильтр напряжения нулевой последовательности.

Определим время срабатывания указанных защитных устройств при механических повреждениях экранированного кабеля марки ГВШОП. При этом будем считать, что емкость сети относительно земли равна нулю и устройства используют безынерционный исполнительный орган (реагируют на мгновенные значения напряжения на нагрузке или тока, протекающего через нагрузку).

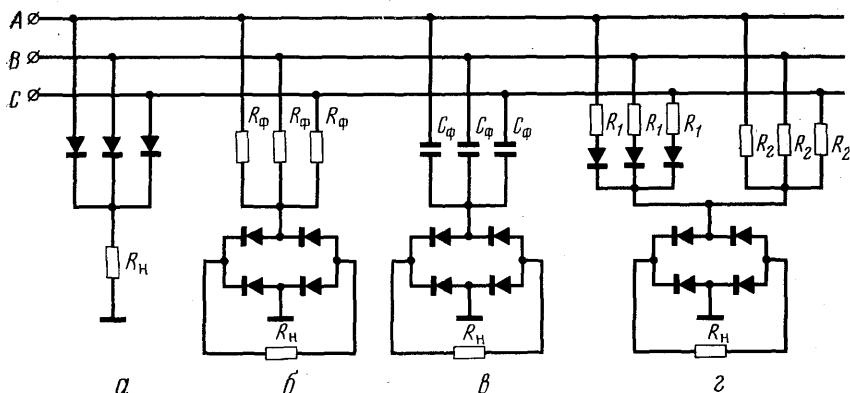


Рис. 2.2. Принципиальные схемы защитных устройств от токов утечки на землю

### Защитное устройство, выполненное по схеме 3В

При возникновении тока утечки на землю напряжение на нагрузке защитного устройства (см. рис. 2.2, а) может быть определено из схем замещения, составленных для интервалов времени проводимости диодов трехфазного выпрямителя.

Например, при однофазной утечке на землю в интервале проводимости диода, подключенного к фазе А (рис. 2.3, а), мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки равно

$$u_H = u_A - (G_H u_A + G_Y u_C) / (G_A + G_B + G_C + G_H + G_Y), \quad (2.1)$$

где  $u_A, u_C$  — мгновенные значения потенциалов фаз сети;  $G_A = 1/R_A$ ,  $G_B = 1/R_B$ ,  $G_C = 1/R_C$  — проводимость изоляции фаз сети;  $G_H = 1/R_H$ ,  $G_Y = 1/R_Y$  — соответственно проводимость сопротивления нагрузки и сопротивления утечки на землю.

Расчеты показывают, что потенциал точки сети в месте образования двухфазного короткого замыкания и возникновения утечки на землю равен половине противоположного значения потенциала неповрежденной фазы. При этом в интервале проводимости диода, подключенного к неповрежденной фазе (рис. 2.3, б), мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки равно

$$u_H = u_A - (G_H - 0,5 G_3) u_A / (G_H + G_3 + 3G_{из}),$$

где  $G_3 = 1/R_3$  — проводимость экрана кабеля;  $G_{из} = G_A = G_B = G_C$ .

Учитывая, что  $u_A = U_m \sin(\omega t + \psi)$ , получим

$$u_H = [1,5 R_H (R_{из} + 2R_3) U_m \sin(\omega t + \psi)] / [R_{из} R_3 + R_H (R_{из} + 3R_3)], \quad (2.2)$$

где  $U_m$  — амплитуда фазного напряжения сети;  $\psi$  — начальный угол фазного напряжения;  $\omega$  — угловая частота ( $\omega = 314$  1/с).

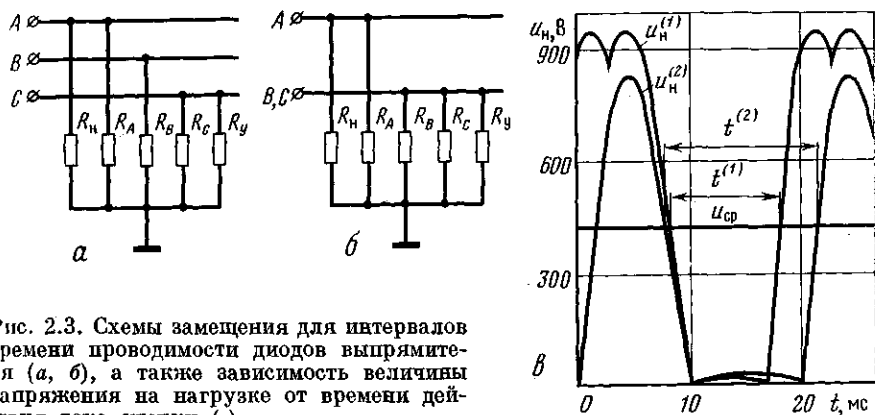


Рис. 2.3. Схемы замещения для интервалов времени проводимости диодов выпрямителя (а, б), а также зависимость величины напряжения на нагрузке от времени действия тока утечки (в)

По аналогии с предыдущим для интервала проводимости диодов, подключенных к замкнутым между собой фазам сети, имеем

$$u_n = 1,5 R_0 R_n U_m \sin(\omega t + \psi - 180^\circ) / [R_{нз} R_0 + R_n (R_{нз} + 3R_0)]. \quad (2.3)$$

При помощи выражений (2.1)–(2.3), задаваясь произвольно значениями величин  $R_n = 10$  кОм,  $R_{нз} = 50$  кОм и  $U_m = 565$  В (амплитуда фазного напряжения сети 660 В), строим кривые зависимости  $u_n = f(t)$  при однофазной утечке на землю и двухфазном коротком замыкании с одновременной утечкой на землю через  $R_0 = 0,1$  кОм.

Время срабатывания защиты определяем по точкам пересечения указанных кривых с прямой, ордината которой равна максимальному значению напряжения на нагрузке ( $U_{cp}$ ) при однофазной утечке на землю через сопротивление, равное уставке. При этом величина сопротивления однофазной уставки  $R_Y^{(1)}$  определяется требованиями ПИВРЭ [24] и для шахтных участков сетей напряжением 660 В равна 15 кОм. Из рис. 2.3, в видно, что время срабатывания защитного устройства, выполненного по схеме 3В, при однофазной утечке на землю  $t^{(1)} = 9,7 \cdot 10^{-3}$  с, а при двухфазном коротком замыкании с одновременной утечкой на землю  $t^{(2)} = 13,3 \cdot 10^{-3}$  с. Последнее не удовлетворяет требованиям быстродействия ( $t_{з.у} \leq 2,4 \cdot 10^{-3}$  с).

При применении в схеме 3В ограничительных резисторов (рис. 2.4, а) в течение некоторого времени имеет место одновременная проводимость двух диодов выпрямителя (угол коммутации диодов). Рассмотрим, какое влияние оказывает угол коммутации на время срабатывания защитного устройства при утечках на землю через низкое сопротивление экрана кабеля. На рис. 2.4, б, в показаны схемы замещения для интервалов проводимости соответственно одного и двух диодов трехфазного однополупериодного выпрямителя. Переход тока с одного диода на другой происходит



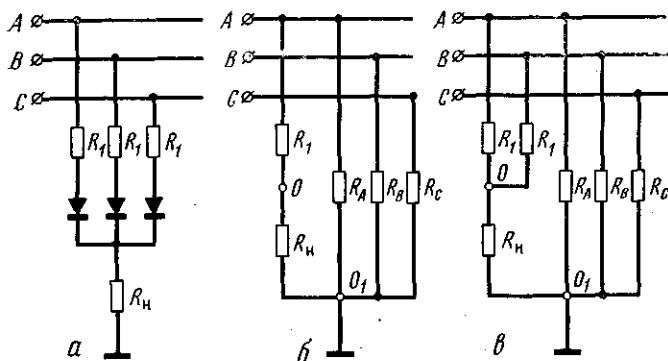


Рис. 2.4. Электрическая схема защитного устройства типа ЗВ, использующего ограничительные резисторы (а), и схемы замещения для интервалов времени проводимости диодов выпрямителя (б, в)

в тот момент времени, когда потенциал точки  $O$  (см. рис. 2.4, б) становится равным потенциалу фазы, к которой подключен диод, вступающий в работу ( $u_O = u_B$ ), и заканчивается, когда потенциал точки  $O$  (см. рис. 2.4, в) равен потенциалу фазы, к которой подключен выключаемый из работы диод ( $u_O = u_A$ ).

Мгновенное значение потенциала точки  $O$  в момент вступления в работу очередного диода (см. рис. 2.4, б) может быть определено из выражений

$$u_O = (G_1 u_A + G_N u_{O1}) / (G_1 + G_N), \quad (2.4)$$

$$u_{O1} = (G_A u_A + G_B u_B + G_C u_C + G_N u_O) / (G_A + G_B + G_C + G_N), \quad (2.5)$$

где  $u_{O1}$  — мгновенное значение потенциала точки  $O1$ ;  $G_1 = 1/R_1$  — проводимость ограничительного резистора.

Введем обозначения:  $G_{вз} = G_A = G_B = G_C$ ,  $A = G_N \cdot G_A + G_1 \times (G_{вз} + G_N)$ ,  $B = (G_1 + G_N) (G_{вз} + G_N) - G_N (C_N + G_B)$ ,  $C = G_C G_N$ . С учетом того, что  $u_A = U_m \sin \omega t$ ,  $u_B = U_m \sin (\omega t - 120^\circ)$ ,  $u_C = U_m \sin (\omega t + 120^\circ)$ , при совместном решении уравнений (2.4) и (2.5) получим

$$(A - 0,5C + 0,5B) \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} (C + B) \cos \omega t = 0.$$

Решение полученного уравнения и определит момент начала работы очередного диода выпрямителя, т. е.

$$\omega t = k\pi - \arctg \{ \sqrt{3} (C + B) / [2A - (C - B)] \}, \quad (2.6)$$

где  $k$  — любое целое положительное число.

По аналогии с предыдущим момент времени окончания работы первого диода равен

$$\omega t = k\pi - \arctg \{ \sqrt{3} (B' - C') / (2A' + B' + C') \}, \quad (2.7)$$

где  $A' = (G_{из} + G_H)(2G_1 + G_H) - G_H(G_H + G_A)$ ;  $B' = G_B G_H$ ;  $C' = G_C G_H - G_1(G_{из} + G_H)$ , т. е. искомый угол коммутации  $\gamma$  заключен в следующих пределах:

$$k\pi - \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{B+C}{A+0,5(B+C)} \leq \gamma \leq k\pi - \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{B'-C'}{A'+0,5(B'+C')}.$$

Определим на конкретном примере время срабатывания защитного устройства, выполненного по схеме ЗВ с ограничительными резисторами, при однофазной утечке на землю через  $R_2 = 0,1$  кОм.

Дано:  $U_m = 565$  В,  $R_1 = 5$  кОм,  $R_H = 10$  кОм,  $R_A = R_B = R_C = R_{из} = 50$  кОм,  $R_y^{(1)} = 15$  кОм.

Считаем, что при  $t = 0$  (рис. 2.5, а) проводит диод, подключенный к фазе А. Тогда в интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$ , где  $t_1$  — начало проводимости диода, подключенного к фазе В, согласно схеме замещения (рис. 2.5, б) мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки имеет вид

$$u_H = \left[ u_A - \frac{G'_H u_A + G_3 u_C}{G_A + G_B + G_C + G_3 + G'_H} \right] \frac{R_H}{R_H + R_1}, \quad (2.8)$$

где  $G'_H = 1/(R_H + R_1)$ .

При этом момент времени  $t_1$  определяем из выражения (2.6)

$$\omega t_1 = \pi - \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{B+C}{A+0,5(B-C)} = 131^\circ,$$

где  $A = 2,034$ ;  $B = 3,036$ ;  $C = 1,002$ .

В интервале времени  $t_1 \leq t \leq t_2$  (здесь  $t_2$  — момент времени окончания работы диода, подключенного к фазе А) проводят ток оба диода. Согласно выражению (2.7) имеем

$$\omega t_2 = \pi - \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{B'-C'}{A'+0,5(B'+C')} = 169^\circ,$$

т. е. в течение 38 электрических градусов ( $\omega t_2 - \omega t_1$ ) одновременно проводят ток оба диода. В указанном интервале времени справедлива схема замещения, показана на рис. 2.5, в, и величина мгновенного значения напряжения на резисторе нагрузки может быть определена как разность потенциалов в точках О и О<sub>1</sub>:

$$\begin{aligned} u_O &= (G_H u_{O1} - G_2 u_C) / (2G_1 + G_H) = (0,1 u_{O1} - 0,2 u_C) / 0,5, \\ u_{O1} &= (G_H u_O + G_A u_A + G_B u_B + G_C u_C + G_3 u_C) / (G_A + G_B + G_C + \\ &\quad + G_H + G_3) = (0,1 u_O - 10 u_C) / 10,16. \end{aligned}$$

После соответствующих преобразований получим

$$u_H = u_O - u_{O1} = -1,18 u_C. \quad (2.9)$$

В интервале времени  $t_2 \leq t \leq t_3$ , где  $t_3$  — момент времени начала работы диода, подключенного к фазе С, ток проводит диод,

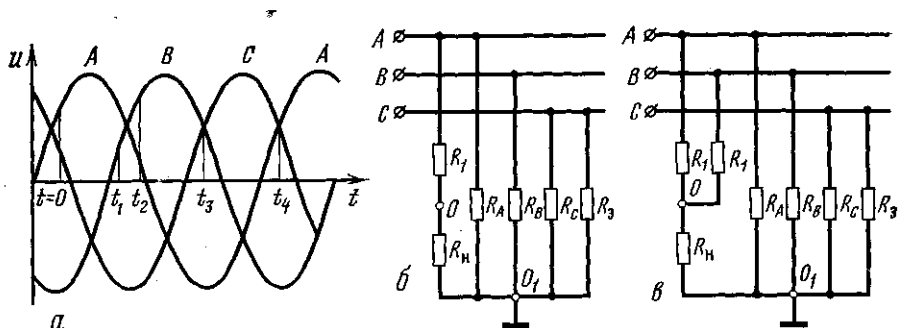


Рис. 2.5. Изменение мгновенных значений фазных напряжений во времени (а), зависимость величины напряжения на нагрузке (г) от времени действия тока утечки, а также схемы замещения для интервалов времени проводимости диодов (б, в)

подключенный к фазе  $B$ , и мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки равно

$$u_H = \left[ u_B - \frac{G'_H u_B + G_3 u_C}{G_A + G_B + G_C + G'_H + G_3} \right] \frac{R_H}{R_H + R_1}. \quad (2.10)$$

Момент времени  $t_3$  определяем из условия равенства потенциалов точки  $O$  и фазы  $C$

$$u_O = (G_1 u_B + G_H u_{O1}) / (G_1 + G_H) = (0,2 u_B + 0,1 u_{O1}) / 0,3 = u_C,$$

где

$$\begin{aligned} u_{O1} &= (G_H u_O + G_3 u_C) / (G_A + G_B + G_C + G_H + G_3) = \\ &= (0,1 u_O + 10 u_C) / 10,16. \end{aligned}$$

После соответствующих преобразований  $u_B = 20,38 u_C / 20,32 = 1,001 u_C$ , т. е. переход тока с диода, подключенного к фазе  $B$ , на диод, подключенный к фазе  $C$ , происходит в момент равенства потенциалов указанных фаз (угол коммутации равен нулю).

В интервале проводимости диода, подключенного к фазе  $C$ , мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки равно

$$u_H = \left[ u_C - \frac{(G'_H + G_3) u_C}{G_A + G_B + G_C + G'_H + G_3} \right] \frac{R_H}{R_H + R_1}. \quad (2.11)$$

Момент времени  $t_4$  начала работы диода, подключенного к фазе  $A$ , определяем из условия равенства потенциалов точки  $O$  и

фазы А:

$$u_0 = (G_1 u_C + G_H u_{O1}) / (G_1 + G_H) = (0,2 u_C + 0,1 u_{O1}) / 0,3 = u_A,$$

где

$$\begin{aligned} u_{O1} &= (G_H u_0 + G_B u_C) / (G_A + G_B + G_C + G_H + G_B) = \\ &= (0,1 u_0 + 10 u_C) / 10,16. \end{aligned}$$

После соответствующих преобразований  $u_C = 1,001 u_A$ , т. е. переход тока с диода, подключенного к фазе С, на диод, подключенный к фазе А, происходит в момент равенства потенциалов указанных фаз. Используя график мгновенных значений фазных напряжений (см. рис. 2.5, а), при помощи выражений (2.8)–(2.11) строим кривую изменения во времени напряжения на резисторе нагрузки  $u_H = f(t)$  (рис. 2.5, в). На график наносим прямую, ордината которой равна максимальному значению напряжения ( $U_{CP}$ ) на резисторе нагрузки при однофазной утечке на землю через  $R_y^{(1)} = 15 \text{ кОм}$ :

$$\begin{aligned} u_H &= \left[ u_A - \frac{G'_H u_A + G_y u_C}{G_A + G_B + G_C + G'_H + G_y} \right] \frac{R_H}{R_H + R_1} = \\ &= \left[ 488 - \frac{0,0666 \cdot 448 - 0,0666 \cdot 488}{0,1933} \right] \frac{10}{15} = 326 \text{ В} \end{aligned}$$

и по точкам ее пересечения с кривой  $u_H = f(t)$  определяем время срабатывания защитного устройства. В нашем случае оно ( $t^{(1)}$ ) равно  $10,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  и весьма незначительно отличается от времени, определенного без учета ограничительных резисторов. Таким образом, при утечках на землю через низкое сопротивление экрана угол коммутации можно не учитывать.

### *Фильтр напряжения нулевой последовательности*

Проведем анализ работы активного фильтра напряжения нулевой последовательности, составленного из трех равных по величине резисторов, соединенных звездой и подключенных к трехфазной сети (см. рис. 2.2, б).

На рис. 2.6, а показана схема замещения при однофазной утечке на землю, согласно которой ток, протекающий через резистор нагрузки, равен

$$i_H^{(1)} = [U_m \sin(\omega t + \psi)] / (R_\Phi / 3 + R_H + R_y), \quad (2.12)$$

где  $R_\Phi$  — сопротивление резистора фильтра.

При двухфазном коротком замыкании с одновременной утечкой на землю через сопротивление экрана кабеля ток, протекающий через резистор нагрузки, находится из соотношения

$$i_H^{(2)} = [0,5 U_m \sin(\omega t + \psi - 180^\circ)] / (R_\Phi / 3 + R_H + R_y). \quad (2.13)$$

При помощи выражений (2.12) и (2.13) для  $U_m = 565 \text{ В}$ ,  $R_\Phi = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_H = 0,51 \text{ кОм}$ ,  $R_B = 0,1 \text{ кОм}$  строим кривые изменения во времени тока, протекающего через резистор нагрузки

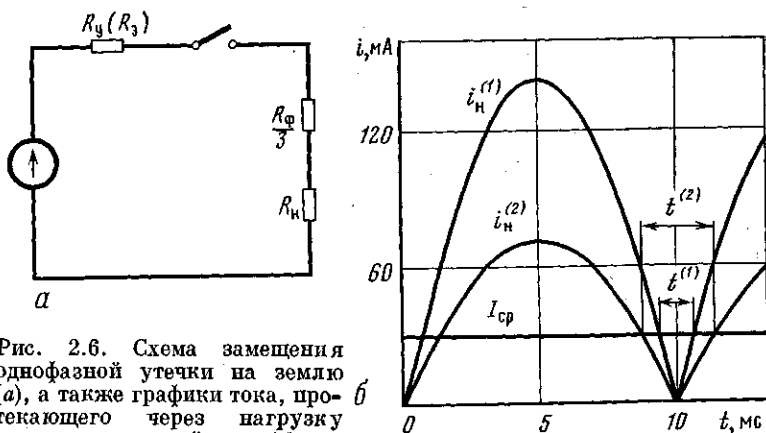


Рис. 2.6. Схема замещения однофазной утечки на землю (а), а также графики тока, протекающего через нагрузку защитного устройства (б)

(рис. 2.6, б). Время срабатывания защитного устройства определяем по точкам пересечения указанных кривых с прямой, ордината которой равна максимальному значению тока ( $I_{cp}$ ), протекающего через резистор нагрузки при однофазной утечке на землю через  $R_y^{(1)} = 15 \text{ кОм}$ . Из рис. 2.6, б видно, что время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности в случае однофазной утечки на землю через сопротивление экрана кабеля  $t^{(1)} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , а при двухфазном с одновременной утечкой  $t^{(2)} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Разновидностью фильтра напряжения нулевой последовательности является фильтр, составленный из трех конденсаторов одинаковой емкости, соединенных звездой и подключенных к фазам сети (рис. 2.2, в).

Ток, протекающий через резистор нагрузки емкостного фильтра в случае однофазной утечки на землю, определяется выражением

$$i_n^{(1)} = I_m [\sin(\omega t + \psi + \varphi) - \operatorname{tg} \varphi \cos(\psi + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}], \quad (2.14)$$

где  $I_m = U_m / \sqrt{R^2 + [1/(\omega C)]^2} = U_m / Z$ ;  $R = R_n + R_y$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 1/(\omega CR)$ ;  $\tau = RC$ ;  $C = 3C_\phi$ .

Для определения времени срабатывания защитного устройства необходимо знать максимальную величину тока, протекающего через резистор нагрузки при однофазной утечке через сопротивление, равное уставке. В связи с этим исследуем выражение (2.14) на максимум.

Приравняв к нулю частные производные:

$$\frac{\partial i}{\partial t} = I_m [\omega \cos(\omega t + \psi + \varphi) + \tau \operatorname{tg} \varphi \cos(\psi + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}] = 0,$$

$$\frac{\partial i}{\partial \varphi} = I_m [\cos(\omega t + \psi + \varphi) + \operatorname{tg} \varphi \sin(\psi + \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}] = 0,$$

решим полученную систему уравнений и найдем с точностью, до-

статочной для практических расчетов, условия, соответствующие экстремальному значению тока нагрузки:

$$\psi = 0, t = (1,5 \pi - \varphi) / \omega.$$

Подставив полученные значения в выражение (2.14), получим зависимость абсолютной величины экстремального тока от величины угла  $\varphi$ :

$$i_{н. экст} = I_m [1 + \sin \varphi e^{-\frac{1,5\pi - \varphi}{\omega t}}].$$

Затем согласно выражению (2.14) при  $t = 0$  имеем

$$i_n(0) = U_m \sin \psi / (Z \cos \varphi).$$

Построив кривые  $i_{н. экст} = f(\varphi)$  и  $i_n(0) = f(\varphi)$ , видим (рис. 2.7, а), что максимально возможное значение величины тока, протекающего через резистор нагрузки, соответствует экстремальному току  $i_{н. экст}$  для  $\varphi \leq 20,5^\circ$  и начальному  $i_n(0)$  для  $\varphi \geq 20,5^\circ$ .

Задаваясь величиной сопротивления резистора нагрузки и принимая согласно ПИВРЭ [24]  $R_y^{(1)} = 15$  кОм, из выражения  $C_\Phi = 1/(3\omega R \operatorname{tg} \varphi)$  определяем величину емкости конденсатора фильтра. Например, для  $R_n = 3,3$  кОм и  $\varphi = 7,5^\circ$   $C_\Phi = 0,44 \cdot 10^{-6}$  Ф. Ближайшей по ГОСТу является величина  $C_\Phi = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф, и угол  $\varphi$  будет равен  $6,6^\circ$ . Согласно выражению (2.14) для  $C_\Phi = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_n = 3,3$  кОм и  $R_y = R_a = 0,1$  кОм имеем

$$i_n = 144,5 [\sin(\omega t + \psi + 32^\circ) - 0,625 \cos(\psi + 32^\circ) e^{-136t}] \text{ мА.}$$

При этом согласно рис. 2.7, б время срабатывания защитного устройства не превышает  $1,4 \cdot 10^{-3}$  с (из рис. 2.7, а видно, что  $I_{ср} = 1,062 I_m$ , т. е.  $I_{ср} = 31$  мА).

Рассмотрим совместную работу активного и емкостного фильтров. На рис. 2.8, а показана расчетная схема, а на рис. 2.8, б — схема замещения для случая однофазной утечки на землю. Введем обозначения:  $R_1 = R_y$ ,  $R_2 = R_{н1}$ ,  $R_3 = R_\Phi/3 + R_{н2}$ ,  $C = 3C_\Phi$ . Затем, рассмотрев переходный процесс однофазной утечки на землю, получим следующие выражения для токов, протекающих через резисторы нагрузок защитных устройств:

$$i_{н1} = \frac{\omega C R_3 U_m}{\sqrt{(R_1 + R_3)^2 + \omega^2 C^2 A^2}} [\sin(\omega t + \psi + 90^\circ - \varphi_1) - \sin(\psi + 90^\circ - \varphi_1) e^{pt}] + \frac{R_3 U_m \sin \psi}{A} e^{pt}, \quad (2.15)$$

$$i_{н2} = \frac{R_2 U_m}{\sqrt{A^2 + \omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2 R_3^2}} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_2) - \sin(\psi - \varphi_2) e^{pt}] + \frac{R_2 U_m \sin \psi}{A} e^{pt}, \quad (2.16)$$

где  $A = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3$ ;  $\varphi_1 = \operatorname{arctg}[\omega AC/(R_1 + R_3)]$ ;  $\varphi_2 = \operatorname{arctg}(R_1 R_2 R_3 \omega C/A)$ ;  $p = -(R_1 + R_3)/(AC)$ .

Для принятых ранее параметров ( $C_\Phi = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_\Phi = 10$  кОм,

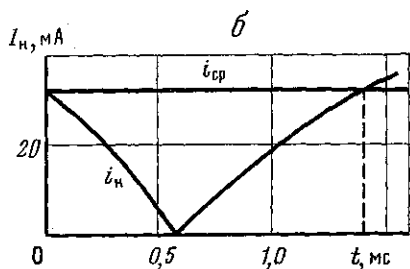
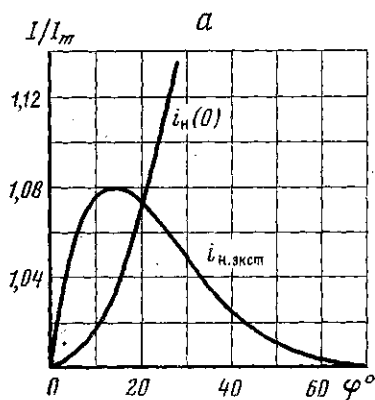


Рис. 2.7. Зависимости величины тока нагрузки от угла  $\varphi$  (а) и времени действия тока утечки (б)

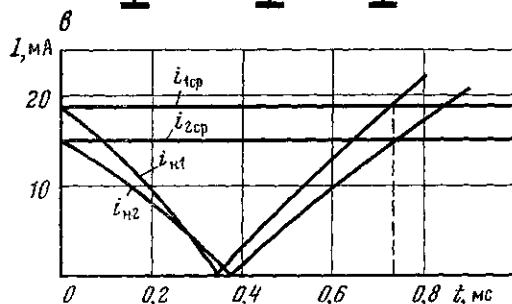
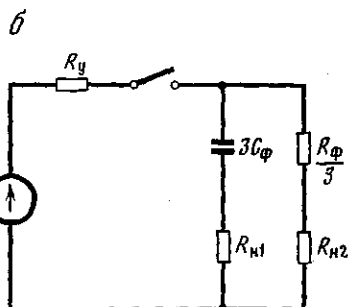
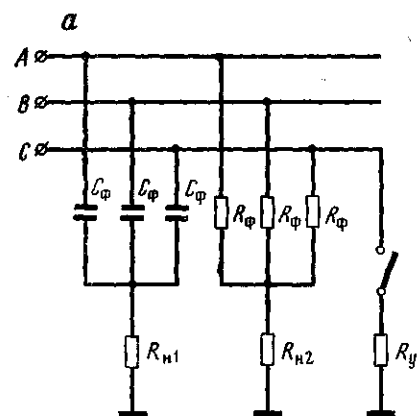


Рис. 2.8. Расчетная схема совместной работы активного и емкостного фильтров напряжения нулевой последовательности (а), схема замещения для случая однофазной утечки (б), а также зависимость величины токов, протекающих через нагрузку от времени действия тока утечки (в)

$R_{n1} = 3,3 \text{ кОм}$ ,  $R_{n2} = 0,51 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 0,1 \text{ кОм}$ ) согласно выражениям (2.15), (2.16) имеем (мА)

$$i_{n1} = 138 [\sin(\omega t + \psi + 32^\circ) - \sin(\psi + 32^\circ) e^{-196t}] + 162 e^{-196t} \sin \psi. \quad (2.17)$$

$$i_{n2} = 139 [\sin(\omega t + \psi - 2,6^\circ) - \sin(\psi - 2,6^\circ) e^{-196t}] + 139 e^{-196t} \sin \psi. \quad (2.18)$$

Определив максимально возможные значения токов, протекающих через резисторы нагрузок при однофазной утечке через  $R_y^{(1)} = 15 \text{ кОм}$  ( $I_{1cp} = 18,1 \text{ мА}$ ,  $I_{2cp} = 15,5 \text{ мА}$ ), из соотношений (2.17) и (2.18) находим начальные значения углов  $\psi$ , определяющих максимально возможное время срабатывания. Для емкостного фильтра  $\psi_1 = \arcsin (18,1/162) = 173,6^\circ$ , а для активного —  $\psi_2 = \arcsin (15,5/139) = 173,4^\circ$ , поэтому можно считать, что  $\psi_1 = \psi_2$ .

Подставляя полученное значение угла  $\psi$  в соотношения (2.17) и (2.18), строим кривые изменения  $i_{n1} = f(t)$  и  $i_{n2} = f(t)$  и по точкам их пересечения с прямыми, ординаты которых соответственно равны 18,1 и 15,5 мА, определяем время срабатывания рассматриваемых защитных устройств. В нашем случае  $t_{3,y.1} = t_{3,y.2} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  (рис. 2.8, в). По сравнению с предыдущим снизилось время срабатывания, что объясняется шунтирующим действием активного фильтра (для одной и той же уставки  $R_y^{(1)} = 15 \text{ кОм}$  произошло снижение величины тока срабатывания емкостного фильтра от 31 до 18,1 мА). Аналогичный результат имеет место при шунтировании активного фильтра сопротивлением изоляции.

### *Защитное устройство с делителем выпрямленного напряжения*

На рис. 2,2, г показана принципиальная электрическая схема устройства, из которой видно, что при  $R_1 = 0$  устройство эквивалентно схеме ЗВ, а при  $R_1 = \infty$  — фильтру напряжения нулевой последовательности. Пренебрегая коммутацией диодов трехфазного однополупериодного выпрямителя, определим время срабатывания рассматриваемого защитного устройства при однофазной утечке на землю через сопротивление экрана кабеля. В интервале проводимости диода, подключенного к фазе А (рис. 2.9, а), мгновенное значение напряжения на резисторе нагрузки определяется из выражения

$$u_n = \frac{G_1(G_n + G_3)u_A + G_3G_n u_C}{(G_1 + G_n + 3G_2)(G_n + G_3) - G_n^2} \left[ 1 - \frac{G_n}{G_n + G_3} \right] - \frac{G_3 u_C}{G_n + G_3}, \quad (2.19)$$

где  $G_1 = 1/R_1$ ;  $G_2 = 1/R_2$ .

Аналогично в интервале проводимости диода, подключенного к фазе В, имеем

$$u_n = \frac{G_1(G_n + G_3)u_B + G_3G_n u_C}{(G_1 + G_n + 3G_2)(G_n + G_3) - G_n^2} \left[ 1 - \frac{G_n}{G_n + G_3} \right] - \frac{G_3 u_C}{G_n + G_3} \quad (2.20)$$

и в интервале проводимости диода, подключенного к фазе С, имеем

$$u_n = \frac{[G_1(G_n + G_3) + G_3G_n]u_C}{(G_1 + G_n + 3G_2)(G_n + G_3) - G_n^2} \left[ 1 - \frac{G_n}{G_n + G_3} \right] - \frac{G_3 u_C}{G_n + G_3}. \quad (2.21)$$



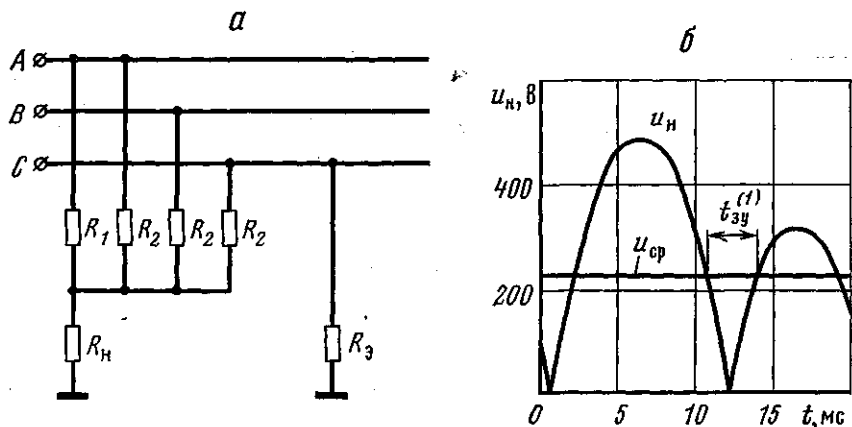


Рис. 2.9. Схема замещения для интервала времени проводимости диода выпрямителя (а) и зависимость величины напряжения на нагрузке от времени действия тока утечки (б)

При помощи выражений (1.19)–(1.21) и принятых произвольно параметров защитного устройства ( $R_1 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_H = 10 \text{ кОм}$ ) строим кривую изменения для случая однофазной утечки на землю через сопротивление экрана кабеля и по точкам пересечения этой кривой с прямой, ордината которой равна максимальному значению напряжения на нагрузке ( $U_{cp}$ ) при  $R_y^{(1)} = 15 \text{ кОм}$ , определяем время срабатывания защитного устройства ( $t_{з.у}^{(1)} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , см. рис. 2,9, б).

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что из рассмотренных защитных устройств наиболее полно удовлетворяет требованиям быстродействия фильтр напряжения нулевой последовательности, который может быть рекомендован в качестве устройства быстродействующей защиты от токов утечки на землю.

### 2.1.2. Выбор минимальной величины уставки фильтра напряжения нулевой последовательности

В шахтных участковых сетях безопасность обслуживающего персонала от поражения электрическим током обеспечивается применением общесетевой защиты от токов утечки на землю. При этом уровень электробезопасности определяется величиной и длительностью протекания тока через тело человека.

Величина действующего значения тока, протекающего через тело человека при его прикосновении с одной из фаз сети, при  $R_{из} = \infty$  определяется выражением

$$I_{\phi} = U_{\phi} / \sqrt{R_{\phi}^2 + [1/(3\omega C)]^2},$$

где  $U_{\phi}$  — действующее значение фазного напряжения сети, В;

$R_{\text{ч}}$  = активное сопротивление тела человека, Ом;  $C$  — емкость фазы сети относительно земли, Ф.

Емкость шахтных участковых сетей относительно земли достигает величины 1 мкФ на фазу. Пренебрегая емкостной составляющей полного сопротивления, получим

$$I_{\text{ч}} = U_{\text{ф}}/R_{\text{ч}}. \quad (2.22)$$

Сопротивление тела человека зависит от многих факторов и колеблется в широких пределах. Минимальная величина сопротивления тела человека для шахтных сетей напряжением до 1000 В принята равной 1 кОм. Согласно выражению (2.22) величина действующего значения тока, протекающего через тело человека при его прикосновении к фазе сети с линейным напряжением 660 В, равна 400 мА.

По данным [25], допустимая безопасная величина действующего значения тока, при длительности его протекания через тело человека от 0,01 до 0,08 с, равна 650 мА. Поэтому можно считать, что в шахтных участковых сетях напряжением 660 В с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой обеспечиваются условия электробезопасности, если полное время отключения сети при однофазной утечке на землю через сопротивление 1 кОм не превышает 0,08 с. Учитывая, что сопротивление тела человека может значительно превышать 1 кОм, а величина однофазной уставки фильтра напряжения нулевой последовательности ограничена отстройкой от переходных процессов, способных вызвать его ложные срабатывания, определим величину однофазной уставки фильтра напряжения нулевой последовательности  $R_{\text{у}}^{(1)}$  при его совместной работе с аппаратом общесетевой защиты от утечек на землю. Далее считаем, что при однофазной утечке на землю через сопротивление, величина которого превышает уставку фильтра, будет срабатывать аппарат общесетевой защиты, воздействующий на независимый расцепитель фидерного автоматического выключателя, отключающего силовой трансформатор.

Согласно [26], критерием электробезопасности при длительности протекания тока через тело человека от 0,1 с и более является соотношение

$$I_{\text{ч}}(t_{\text{отк}} + 0,3) \leq 50 \text{ мАс}, \quad (2.23)$$

где 0,3 — время действия опасной ЭДС вращающихся по инерции электродвигателей, с;  $t_{\text{отк}}$  — полное время отключения силового трансформатора, с.

Решая совместно уравнения (2.22) и (2.23), получим формулу, определяющую величину однофазной уставки (кОм) фильтра напряжения нулевой последовательности при его совместной работе с аппаратом общесетевой защиты:

$$R_{\text{у}}^{(1)} = [U_{\text{ф}}(t_{\text{отк}} + 0,3)]/50. \quad (2.24)$$

Минимальная величина уставки фильтра напряжения нулевой последовательности, при которой еще обеспечиваются условия

электробезопасности, определяется из выражения (2.24) для  $t = 0,08$  с. Например, для шахтных участков сетей напряжением 660 В  $R_{y.m.n}^{(1)} = 3$  кОм. При этом полное время защитного отключения сети в зависимости от величины сопротивления однофазной утечки на землю не должно превышать следующих значений:

|                   |      |      |     |       |      |      |
|-------------------|------|------|-----|-------|------|------|
| $R_y^{(1)}$ , кОм | 3,0  | 3,5  | 4,0 | 5,0   | 10,0 | 15,0 |
| $t_{отк.}$ , с    | 0,08 | 0,14 | 0,2 | 0,325 | 0,95 | 1,57 |

### 2.1.3. Выбор типа фильтра напряжения нулевой последовательности

Совместная работа фильтра напряжения нулевой последовательности и аппарата общесетевой защиты от утечек тока на землю необходима также с целью контроля симметричной трехфазной утечки на землю. Рассмотрим их совместную работу с точки зрения обеспечения требуемого по условиям взрывобезопасности времени защитного отключения сети. Фильтр напряжения нулевой последовательности может быть выполнен как на основе резисторов (активный), так и с использованием конденсаторов (емкостной).

На рис. 2.10, а показана расчетная схема совместной работы активного фильтра напряжения нулевой последовательности с аппаратом общесетевой защиты от утечек тока на землю типа УАКИ. До возникновения утечки на землю через резистор нагрузки фильтра  $R_n$  протекает ток (обусловленный работой трехфазного выпрямителя  $VД1-VД3$ ), максимальная величина которого

$$I_{н.m(xx)} = 3U_m / (3R_n + R_\phi + 3R_{вн}),$$

где  $R_{вн}$  — внутреннее сопротивление постоянному току аппарата УАКИ.

При этом с целью исключения ложных срабатываний фильтр напряжения нулевой последовательности должен быть отстроен от указанной величины тока. Далее максимально возможная величина тока, протекающего через резистор нагрузки фильтра, имеет место при однофазном глухом ( $R_y = 0$ ) замыкании на землю:

$$I_{н.m} = 3U_m / (R_\phi + 3R_n).$$

Расчеты показывают, что требуемое быстродействие фильтра напряжения нулевой последовательности ( $t_{з.у} \leq 2,4 \cdot 10^{-3}$  с) обеспечивается, если величина отношения

$$I_{н.m} / I_{н.m(xx)} = 1 + 3R_{вн} / (R_\phi + 3R_n) \geq 4.$$

Величина внутреннего сопротивления аппарата общесетевой защиты от утечек тока на землю выбирается из условия максимальной чувствительности к токам утечки и, как правило, в сетях напряжением 660 В не превышает 15 кОм, т. е. в рассматриваемых условиях должно выполняться неравенство  $R_n + R_\phi / 3 \leq 5$  кОм. Последнее, во-первых, требует большой мощности резисторов фильтра ( $P = U_\phi^2 / R_\phi$ ) и, во-вторых, сравнимо с величиной сим-

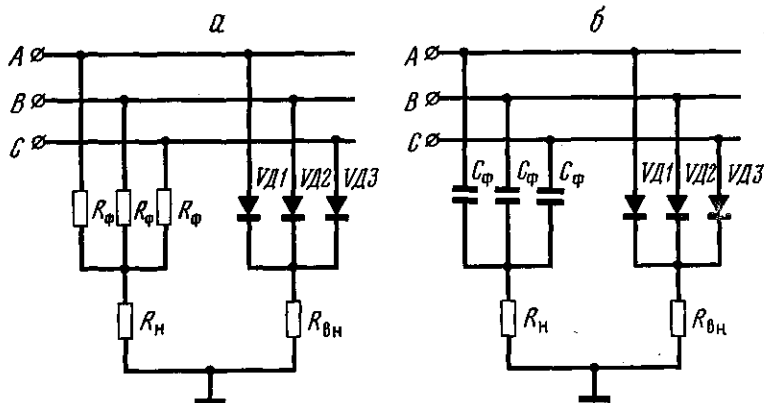


Рис. 2.10. Расчетная схема совместной работы фильтра напряжения нулевой последовательности и аппарата общесетевой защиты

метричной уставки аппарата общесетевой защиты, что вызовет затруднение при настройке фильтра напряжения нулевой последовательности и может служить причиной его ложных срабатываний.

Простейшим способом разделения цепей постоянного и переменного тока, как известно, является применение конденсаторов. В нашем случае это использование емкостного фильтра напряжения нулевой последовательности. На рис. 2.10, б показана расчетная схема, из которой видно, что трехфазный выпрямитель аппарата общесетевой защиты вызывает заряд конденсаторов фильтра напряжения нулевой последовательности и емкости сети до напряжения, равного амплитудному значению напряжения холостого хода выпрямителя [ $U_C(0) = U_m$ ].

Рассмотрев переходный процесс, возникающий при однофазной утечке на землю через сопротивление  $R_y$  (см. рис. 2.10, б), получим следующее выражение для тока, протекающего через резистор нагрузки емкостного фильтра напряжения нулевой последовательности:

$$i_n = \frac{3\omega C_\Phi U_d}{M} \sin(\omega t + \psi + \varphi) - \frac{C_\Phi U_d}{N} \left[ \frac{p_1}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_1) e^{p_1 t} - \frac{p_2}{\sqrt{p_2^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_2) e^{p_2 t} \right] - \frac{C_\Phi U_C(0)}{N} [e^{p_2 t} - e^{p_1 t}], \quad (2.25)$$

где  $U_d$  — амплитудное значение потенциала точки сети в месте возникновения тока утечки на землю;

$$M = \sqrt{(1 - 9\omega^2 C_\Phi C R_n R_y)^2 + 9\omega^2 [C R_y + C_\Phi (R_y + R_n)]^2};$$

$$N = \sqrt{R_y^2 (C + C_\Phi)^2 + C_\Phi^2 R_n (2R_y + R_n) - 2C_\Phi C R_n R_y};$$

$$p_{1,2} = \frac{-[CR_y + C_\phi(R_y + R_H)]}{6C_\phi CR_y R_H} \pm \pm \sqrt{\left[ \frac{CR_y + C_\phi(R_y + R_H)}{6C_\phi CR_y R_H} \right]^2 - \frac{1}{9C_\phi CR_y R_H}};$$

$$\varphi = \arctg \{ (1 - 9\omega^2 C_\phi CR_y R_H) / 3\omega [CR_y + C_\phi(R_y + R_H)] \};$$

$$\gamma_1 = \arctg (\omega / |p_1|); \quad \gamma_2 = \arctg (\omega / |p_2|);$$

$C_\phi$  — емкость конденсатора фильтра;  $C$  — емкость фазы сети относительно земли;  $U_C(0)$  — величина постоянной составляющей напряжения на конденсаторах фильтра и емкости сети, обусловленного работой выпрямителя аппарата общесетевой защиты от утечек.

Выбираем произвольно параметры фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\phi = 0,25 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_H = 5,1$  кОм) и при помощи выражения (2.25) для  $U_d = U_C(0) = 565$  В,  $C = 2 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_\phi = 0,1$  кОм определяем ток (мА), протекающий через резистор нагрузки  $R_H$ :

$$i_H = 83 \sin(\omega t + \psi + 28,4^\circ) + 80 \sin(\psi - 50,8^\circ)e^{-256t} - 126 \sin(\psi - 10,5^\circ)e^{-1704t} - 127(e^{-1704t} - e^{-256t}). \quad (2.26)$$

За величину тока срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности принимаем максимально возможное значение тока, протекающего через резистор нагрузки  $R_H$  при однофазной утечке на землю через  $R_y = 5$  кОм. Согласно формуле (2.25)  $I_{ср} = 10$  мА. Время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности определяем по точке пересечения кривой  $i_H = f(t)$ , построенной при помощи соотношения (2.26), с прямой, ордината которой равна 10 мА. В рассматриваемом случае максимальное время срабатывания составляет  $3,7 \cdot 10^{-3}$  с (рис. 2.11, кривая 1). Последнее не удовлетворяет требованию быстрогодействия ( $t_{з.у} \leq 2,4 \cdot 10^{-3}$  с).

Согласно ГОСТ 22929—78 величина напряжения холостого хода источника оперативного постоянного тока аппарата общесетевой защиты от утечек тока на землю может быть принята равной 50 В. В этом случае  $U_C(0) = \sqrt{2} \cdot 50 = 70$  В и ток (мА), протекающий через резистор нагрузки указанного фильтра напряжения нулевой последовательности, равен

$$i_H = 83 \sin(\omega t + \psi + 28,4^\circ) + 80 \sin(\psi - 50,8^\circ)e^{-256t} - 126 \sin(\psi - 10,5^\circ)e^{-1704t} - 15,8(e^{-1704t} - e^{-256t}),$$

а максимально возможное время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности имеет место для  $\psi = 173,6^\circ$  и не превышает  $1,6 \cdot 10^{-3}$  с (рис. 2.11, кривая 2).

Таким образом, совместная работа емкостного фильтра напряжения нулевой последовательности с аппаратом общесетевой защиты возможна, если величина напряжения холостого хода ис-

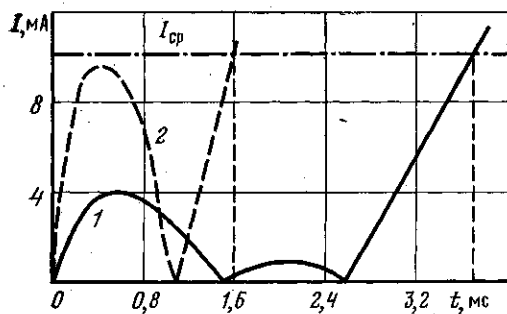


Рис. 2.11. Зависимость величины токов, протекающих через резистор нагрузки емкостного фильтра, от времени действия тока утечки

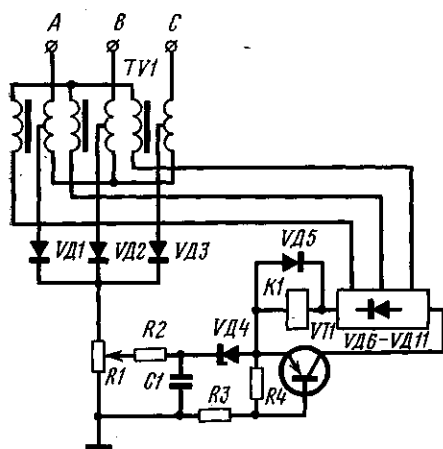
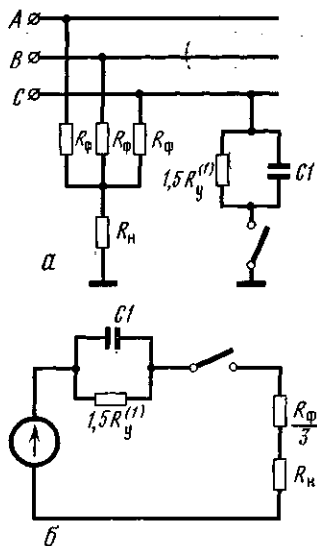


Рис. 2.12. Принципиальная электрическая схема аппарата общесетевой защиты с низким напряжением источника постоянного тока

Рис. 2.13. Расчетная схема (а) и схема замещения однофазной утечки на землю (б)



точника оперативного постоянного тока аппарата общесетевой защиты от утечек на землю не превышает 50 В.

На рис. 2.12 показана принципиальная электрическая схема аппарата общесетевой защиты от утечек на землю с низким напряжением холостого хода ( $U_{xx} = 50$  В) оперативного источника постоянного тока. Аппарат состоит из трехфазного трансформатора  $TV$ , оперативного источника постоянного тока (однополупериодный трехфазный выпрямитель  $VD1-VD3$ , подключенный к отпайкам первичной обмотки), измерительного ( $R1-R4$ ,  $C1$ ,  $VD4$ ) и исполнительного ( $VT1$ ,  $VD5$ ,  $VD6-VD11$ ,  $K1$ ) органов.

## 2.1.4. Выбор оптимальных параметров фильтра напряжения нулевой последовательности

Параметры фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\Phi$ ,  $R_\Phi$ ) должны обеспечивать, с одной стороны, требуемое быстроедействие и необходимую с точки зрения электробезопасности величину однофазной уставки, а с другой — устойчивость фильтра к переходным процессам в сети. Согласно ГОСТ 22929—78 устойчивость защитной аппаратуры к переходным процессам проверяется включением и отключением кабеля с емкостью  $0,15 \cdot 10^{-6}$  Ф на фазу и заторможенного электродвигателя наибольшей мощности при наличии в сети однофазной утечки через сопротивление, равное  $1,5R_y^{(1)}$ , где  $R_y^{(1)}$  — величина сопротивления однофазной уставки аппарата общесетевой защиты от утечек тока на землю.

Определим условия устойчивой работы фильтра напряжения нулевой последовательности при указанных выше переходных процессах в сети. При этом из всего многообразия возможных вариантов рассмотрим случай возникновения однофазной утечки на землю через сопротивление  $1,5R_y^{(1)}$ , зашунтированное конденсатором, емкость которого равна  $0,15 \cdot 10^{-6}$  Ф. Последнее имеет место при одновременном замыкании контактов магнитного пускателя и вызывает наибольшее возмущение (наибольшую величину напряжения нулевой последовательности). На рис. 2.13, а показана расчетная схема для активного фильтра напряжения нулевой последовательности. Активный фильтр при этом принят для упрощения расчетов. Согласно схеме замещения (рис. 2.13, б) максимальная величина тока, протекающего через резистор нагрузки фильтра напряжения нулевой последовательности, имеет место для  $t = 0$  (в момент включения конденсатор как бы замкнут и все напряжение приложено к фильтру) и равна

$$i_n = 3U_m/R_\Phi + 3R_n + 3R_k, \quad (2.27)$$

где  $R_k$  — сопротивление фазы кабеля, питающего электродвигатель.

При однофазной утечке на землю через сопротивление экрана максимальная величина тока, протекающего через резистор нагрузки, равна

$$i_n = 3U_m/R_\Phi + 3R_n + 3R_k + 3R_e. \quad (2.28)$$

Сравнивая выражения (2.27) и (2.28), видим, что величина тока при утечке на землю через сопротивление экрана меньше, чем в случае переходного процесса, способного вызвать ложные срабатывания, т. е. фильтр напряжения нулевой последовательности не работоспособен.

Единственным способом отстройки от указанных переходных процессов является шунтирование фильтра напряжения нулевой последовательности конденсаторами  $C_2$ , соединенными в звезду и подключенными к фазам защищаемой сети и к земле (рис. 2.14, а). При этом ток, протекающий через резистор нагрузки активного

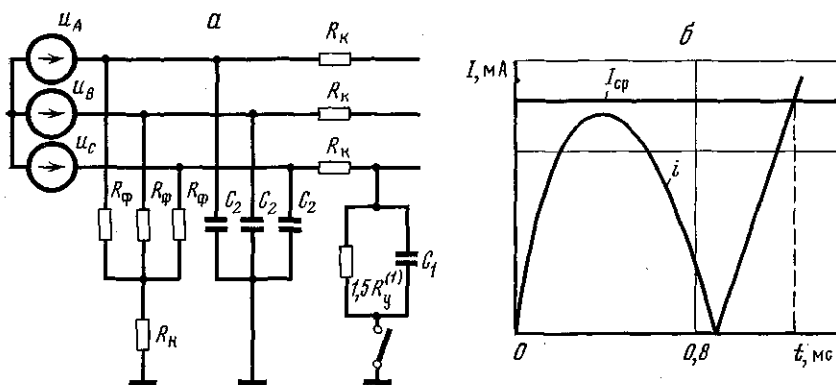


Рис. 2.14. Расчетная схема однофазной утечки (а) и зависимость величины тока, протекающего через резистор нагрузки, от времени действия тока утечки (б)

фильтра в случае однофазной утечки на землю через сопротивление  $1,5R_y^{(1)} = R_y$ , шунтированное конденсатором  $C_1$ , определяется выражением

$$i_H = \frac{U_m \sqrt{1 + \omega^2 \tau_1^2}}{\tau_1 \tau_2 R_K \sqrt{(p_1^2 + \omega^2)(p_2^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t + \psi + \varphi_1 - \alpha) - \frac{U_m}{\tau_1 \tau_2 R_K (p_1 - p_2)} \left[ \frac{1 + p_1 \tau_1}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_1) e^{p_1 t} + \frac{1 + p_2 \tau_1}{\sqrt{p_2^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_2) e^{p_2 t} \right], \quad (2.29)$$

где

$$\begin{aligned} \tau_1 &= C_1 R_y; \quad \tau_2 = C_2 (R_H + R_\Phi/3); \\ p_{1,2} &= \frac{-[(R_H + R_\Phi/3) \tau_1 + R_y \tau_2]}{2 \tau_1 \tau_2 R_K} \pm \frac{\sqrt{[(R_H + R_\Phi/3) \tau_1 + R_y \tau_2]^2 - 4 \tau_1 \tau_2 R_K (R_y + R_H + R_\Phi/3)}}{2 \tau_1 \tau_2 R_K}; \\ \gamma_1 &= \arctg(\omega / |p_1|); \quad \gamma_2 = \arctg(\omega / |p_2|); \quad \varphi_1 = \arctg[1/(\omega \tau_1)]; \\ \alpha &= \arctg \frac{\omega \left[ R_y \tau_2 + \left( R_H + \frac{R_\Phi}{3} \tau_1 \right) \right]}{R_y + R_H + R_\Phi/3 - \omega^2 \tau_1 \tau_2 R_K}; \end{aligned}$$

$C_1$  — емкость конденсатора, шунтирующего сопротивления утечки;  $C_2$  — суммарная емкость конденсаторов, шунтирующих фильтр напряжения нулевой последовательности.

При утечке на землю через сопротивление экрана (сопротивлением кабельной линии пренебрегаем, так как  $R_K \ll R_0$ ) ток, протекающий через резистор нагрузки фильтра, находится по



формуле

$$i_n = I_m [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{pt}], \quad (2.30)$$

где

$$I_m = U_m / \sqrt{(R_n + R_\phi/3 + R_0)^2 + \omega^2 C_2^2 R_0 (R_n + R_\phi/3)^2};$$

$$\varphi = \arctg \{[\omega C_2 R_0 (R_n + R_\phi/3)] / (R_n + R_\phi/3 + R_0)\};$$

$$p = -\{(R_0 + R_n + R_\phi/3) / [R_0 C_2 (R_n + R_\phi/3)]\}.$$

Рассмотрим на конкретном примере отстройку от переходных процессов при помощи шунтирующих конденсаторов.

Дано:  $C_1 = 0,15 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_y = 20$  кОм,  $R_n + R_\phi/3 = 10$  кОм,  $R_0 = 0,1$  кОм,  $C_2 = 3 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_k = 0,5$  Ом.

При однофазной утечке на землю через сопротивление  $R_y$ , шунтированное конденсатором  $C_1$ , ток (мА), протекающий через  $R_n$ , согласно выражению (2.29) равен

$$i_n = 3,92 \sin(\omega t + \psi - 38^\circ) - 2,21 \sin(\psi - 81,6^\circ) e^{-4st} - 2,7 \sin \psi e^{-14 \cdot 10^4 t},$$

его максимально возможное значение, равное 5,15 мА имеет место при  $\psi = 38^\circ$ .

При однофазной утечке на землю через  $R_0$  ток (мА), протекающий через  $R_n$ , согласно выражению (2.30) равен

$$i_n = 52,7 [\sin(\omega t + \psi - 5,3^\circ) - \sin(\psi - 5,3^\circ) e^{-3360t}]. \quad (2.31)$$

При этом время срабатывания защитного устройства, определенное по точке пересечения кривой [построенной при помощи соотношения (2.31) для  $\psi = 168,3^\circ$ ] с прямой, ордината которой равна 5,15 мА, составляет  $1,25 \cdot 10^{-3}$  с (рис. 2.14, б). Таким образом, шунтирование фильтра напряжения нулевой последовательности относительно земли дополнительными конденсаторами позволяет отстроиться от переходных процессов и сохранить требуемое быстродействие.

Определив способ отстройки от переходных процессов, проведем выбор параметров емкостного фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\phi$ ,  $R_\phi$ ).

Максимальное значение установившегося тока, протекающего через резистор нагрузки фильтра напряжения нулевой последовательности при однофазной утечке на землю, согласно выражению (2.25) равно

$$I_m = \frac{3\omega C_\phi U_d}{\sqrt{(1 - 9\omega^2 C_\phi C R_n R_y)^2 + 9\omega^2 [C R_y + C_\phi (R_n + R_y)]^2}},$$

где  $C$  — суммарная емкость фазы сети относительно земли, в том числе и емкость конденсатора, шунтирующего емкостный фильтр.

Величина этого тока при прочих постоянных в основном зависит от  $C_\phi$ ,  $R_n$ . Считая, что  $C = 2 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_0 = 0,1 \cdot 10^3$  Ом,  $9\omega^2 = 0,89 \cdot 10^6$ ,  $R_y = R_y \cdot 10^3$  Ом,  $R_n = R_n \cdot 10^3$  Ом,  $C_\phi = C_\phi \cdot 10^{-6}$  Ф, получим следующие значения знаменателя:

в случае однофазной утечки через  $R_0$ ,

$$\sqrt{(1 - 0,178 C_\Phi R_H)^2 + 0,89 [0,2 + C_\Phi (0,1 + R_H)]^2},$$

в случае однофазной утечки через  $R_Y$

$$\sqrt{(1 - 1,78 C_\Phi R_H R_Y)^2 + 0,89 [2R_Y + C_\Phi (R_Y + R_H)]^2}.$$

Введем обозначение:  $k = I_0/I_Y$ . Здесь  $I_0$  — амплитуда установившегося тока, протекающего через  $R_H$  при однофазной утечке на землю через  $R_0$ ;  $I_Y$  — амплитуда установившегося тока, протекающего через  $R_H$  при однофазной утечке через  $R_Y$ .

Тогда получим

$$\begin{aligned} (1 - 1,78 C_\Phi R_H R_Y)^2 + 0,89 [2R_Y + C_\Phi (R_Y + R_H)]^2 = \\ = k^2 \{(1 - 0,178 C_\Phi R_H)^2 + 0,89 [0,2 + C_\Phi (0,1 + R_H)]^2\}, \end{aligned}$$

где неизвестными величинами являются  $C_\Phi$ ,  $R_H$ ,  $R_Y$ .

Выбрав из условия обеспечения электробезопасности величину сопротивления однофазной установки фильтра  $R_Y = 5 \cdot 10^3$  Ом, получим квадратное уравнение с двумя неизвестными

$$(1 - 8,9 C_\Phi R_H)^2 + 0,89 [10 + C_\Phi (5 + R_H)]^2 = k^2 \{(1 - 0,178 C_\Phi R_H)^2 + 0,89 [0,2 + C_\Phi (0,1 + R_H)]^2\}.$$

Задаваясь одной из неизвестных, решаем это квадратное уравнение. Например, для  $C_\Phi = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф имеем

$$20,022R_H^2 + 2,25R_H + 140 = k^2 (0,23R_H^2 + 0,044R_H + 1,055), \quad (2.32)$$

где  $20,022/0,23 \leq k^2 \leq 140/1,055$ . Решением указанного уравнения будет  $0 < R_H \leq 30 \cdot 10^3$  Ом.

Из решения уравнения (2.32) видно, что единственному значению величины емкости конденсатора фильтра соответствует множество значений величины сопротивления резистора нагрузки. Оптимальное значение величины сопротивления резистора нагрузки определим путем анализа времени срабатывания защитного устройства при утечках на землю через сопротивление экрана кабеля. С этой целью в пределах интервала  $0 < R_H \leq 30 \cdot 10^3$  Ом задаемся величиной сопротивления резистора нагрузки и при помощи выражения (2.25) вначале определяем величину тока срабатывания  $I_{ср}$  (максимально возможная величина тока, протекающего через резистор нагрузки при однофазной утечке на землю через сопротивление, равное уставке), а затем находим зависимость  $i_H = f(t)$  при утечке на землю через сопротивление экрана кабеля. Графоаналитическое исследование зависимости  $i_H = f(t)$  для различных значений угла  $\psi$  определит искомую величину максимально возможного времени срабатывания.

Например, для  $R_H = 5,1 \cdot 10^3$  Ом и принятых ранее значений  $C_\Phi = 0,5 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $C = 2 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $U_m = 565$  В,  $U_C(0) = 70$  В согласно выражению (2.25) в случае однофазной утечки на землю

через сопротивление, равное уставке  $R_y = 5 \cdot 10^3$  Ом, ток, протекающий через резистор нагрузки, равен (мА)

$$i_H = 10,2 \sin(\omega t + \psi - 57^\circ) + 2,06 \sin(\psi - 85,3^\circ)e^{-25,5t} - 12,2 \sin(\psi - 61,5^\circ)e^{-171,5t} - 3,14(e^{-171,5t} - e^{-25,5t})$$

и его максимально возможное значение, принимаемое за величину тока срабатывания ( $I_{cp}$ ), равно 12 мА.

В случае однофазной утечки на землю через сопротивление экрана  $R_0 = 100$  Ом ток (мА), протекающий через резистор на-

грузки, определяется соотношением

$$i_H = 98,7 \sin(\omega t + \psi + 11,7^\circ) + 44 \sin(\psi - 68^\circ)e^{-127t} - 115,8 \sin(\psi - 10,5^\circ)e^{-1703t} - 14,6(e^{-1703t} - e^{-127t}). \quad (2.33)$$

Время срабатывания защитного устройства определяем по точке пересечения кривой  $i_H = f(t)$ , построенной при помощи соотношения (2.33), с прямой, ордината которой равна 12 мА. Графоаналитическое исследование показывает, что максимально возможное время срабатывания имеет место для  $\psi = 174^\circ$  и соста-

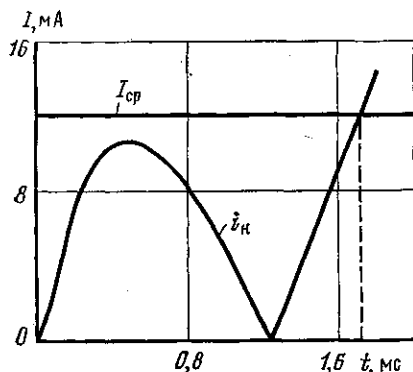


Рис. 2.15. Зависимость величины тока, протекающего через резистор нагрузки, от времени действия тока утечки

вляет  $1,72 \cdot 10^{-3}$  с (рис. 2.15).

Ниже приведены результаты расчета максимально возможного времени срабатывания для различных параметров фильтра напряжения нулевой последовательности, выбранных согласно изложенной методике:

|                          |                     |                      |                      |                     |
|--------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| $C_\Phi$ , $10^{-6}\Phi$ | 0,25                | 0,25                 | 0,5                  | 0,5                 |
| $R_H$ , кОм              | 5,1                 | 10,0                 | 5,1                  | 10,0                |
| $R_y$ , кОм              | 5,0                 | 5,0                  | 5,0                  | 5,0                 |
| $I_{cp}$ , мА            | 10,0                | 6,5                  | 12,0                 | 7,0                 |
| $t$ , с                  | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | $1,75 \cdot 10^{-3}$ | $1,72 \cdot 10^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-3}$ |

Видно, что все выбранные параметры удовлетворяют требованию быстродействия ( $t_{з.у} \leq 2,4 \cdot 10^{-3}$  с). Поэтому окончательный выбор оптимальных параметров фильтра напряжения нулевой последовательности для безопасной системы электроснабжения на напряжение 660 В осуществлен путем экспериментальных исследований на натурном макете шахтной участковой сети.

Нами приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на натурном макете шахтной участковой сети, содержащей силовой трансформатор мощностью 320 кВ·А ( $U_m =$

= 565 В), электродвигатель мощностью 115 кВт, аппарат общесетевой защиты от утечек тока на землю ( $U_{xx} = 50$  В), гибкий экранированный кабель и необходимую пусковую и измерительную аппаратуру. Устойчивость фильтра напряжения нулевой последовательности к ложным срабатываниям проверялась согласно ГОСТ 22929—78 при  $C = 1 \cdot 10^{-6}$  Ф на фазу, а время срабатывания определялось путем осциллографирования процессов однофазной утечки на землю через сопротивление, равное 100 Ом, и  $C = 2 \cdot 10^{-6}$  Ф на фазу. Результаты экспериментальных исследований фильтра напряжения нулевой последовательности см. ниже:

|                          |                     |                     |                     |                     |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $C_{\Phi}$ , $10^{-6}$ Ф | 0,25                | 0,25                | 0,5                 | 0,5                 |
| $R_n$ , кОм              | 5,1                 | 10,0                | 5,1                 | 10,0                |
| $R_y^{(1)}$ , кОм        | 5,9                 | 6,3                 | 5,5                 | 5,8                 |
| $t$ , с                  | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | $2,2 \cdot 10^{-3}$ |

Здесь  $R_y^{(1)}$  — фактическая величина однофазной уставки фильтра напряжения нулевой последовательности, отстроенного от переходных процессов, при  $C = 2 \cdot 10^{-6}$  Ф на фазу.

На основании проведенных аналитических и экспериментальных исследований нами принят для использования в шахтных участковых сетях напряжением 660 В фильтр напряжения нулевой последовательности с параметрами  $C_{\Phi} = 0,25 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $R_n = 5,1$  кОм, максимально возможное время срабатывания которого равно:

при однофазных утечках на землю через сопротивление 100 Ом —  $1,8 \cdot 10^{-3}$  с;

при однофазных утечках на землю через сопротивление 1 кОм —  $5,0 \cdot 10^{-3}$  с;

при однофазных утечках на землю через сопротивление, равное уставке, —  $30 \cdot 10^{-3}$  с.

## 2.2. Быстродействующая защита от токов короткого замыкания

Защита шахтных участковых сетей от токов короткого замыкания осуществляется при помощи устройств максимальной токовой защиты, встраиваемых во взрывонепроницаемые оболочки автоматических выключателей и магнитных пускателей. При этом наиболее совершенными являются устройства типа ПМЗ и УМЗ, реагирующие на величину тока короткого замыкания [27—29].

Согласно техническим требованиям [30], при токах короткого замыкания, превышающих величину уставки в 1,25 раза, полное время защитного отключения сети не должно превышать 0,1 с для автоматических выключателей и 0,2 с для магнитных пускателей. При этом величина уставки защиты должна удовлетворять условию [6]

$$I_y = I_{кз}^{(2)} / k_{\eta}, \quad (2.34)$$

где  $I_{кз}^{(2)}$  — действующее значение тока двухфазного короткого замыкания, определенного в наиболее удаленной от источника питания точке сети;  $k_т$  — коэффициент чувствительности, для шахтных сетей равный 1,5.

Однако выполнение указанных технических требований не обеспечивает безопасного применения электрической энергии на выбросоопасных пластах, в связи с чем необходима разработка более быстродействующих защитных устройств от токов короткого замыкания.

### 2.2.1. Анализ защитных устройств от токов короткого замыкания с точки зрения их быстродействия

Считая, что защитное устройство, реагирующее на величину тока короткого замыкания, использует безынерционный исполнительный орган (реагирует на мгновенное значение тока), определим время его срабатывания для условий шахтной участковой сети, содержащей трансформаторную подстанцию типа ТКШВП-240 ( $U_m = 565$  В,  $\omega L_T = 0,07$  Ом,  $R_T = 0,022$  Ом), кабель с сечением рабочих жил 50 мм<sup>2</sup> и длиной 500 м ( $\omega L_K = 0,04$  Ом,  $R_K = 0,212$  Ом) и электродвигатель типа ЭДК04-4М мощностью 115 кВт ( $\omega L_{дв.л} = 0,485$  Ом,  $R_{дв.л} = 0,248$  Ом).

Мгновенное значение тока (А) двухфазного короткого замыкания (фазы В и С замкнуты между собой) определяется выражением

$$i_{кз}^{(2)} = I_m [\sin(\omega t + \psi - 90^\circ - \varphi) - \sin(\psi - 90^\circ - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}], \quad (2.35)$$

где

$$I_m = \sqrt{3}U_m/(2Z); \quad Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad R = R_T + R_K; \\ L = L_T + L_K; \quad \varphi = \arctg[\omega L/R];$$

$R_T, R_K$  — соответственно активное сопротивление фазы силового трансформатора и кабеля, Ом;  $L_T, L_K$  — соответственно индуктивность фазы силового трансформатора и кабеля, Г.

Для указанных параметров шахтной участковой сети согласно выражениям (2.35) и (2.34) имеем

$$i_{кз}^{(2)} = 1900 [\sin(\omega t + \psi - 115,4^\circ) - \sin(\psi - 115,4^\circ) e^{-562t}], \quad (2.36)$$

$$I_{ym} = I_m/1,5 = 1270 \text{ А.}$$

Время срабатывания защитного устройства определим по точке пересечения кривой  $i_{кз}^{(2)} = f(t)$  с прямой, ордината которой равна 1270 А. Графоаналитическое исследование соотношения (2.36) показывает, что максимальное время срабатывания имеет место для  $\psi = 206^\circ$  и составляет  $7,3 \cdot 10^{-3}$  с (рис. 2.16).

Кроме защит, реагирующих на величину тока, в настоящее время находят применение защиты, реагирующие на первую производную тока по времени (скорость изменения тока) [31]. Определим время срабатывания максимальной токовой защиты,

реагирующей на скорость изменения тока, для условий шахтных участковых сетей.

Взяв первую производную от  $i_{\text{кз}}^{(2)} = f(t)$ , получим

$$\frac{di_{\text{кз}}^{(2)}}{dt} = I_m \omega [\cos(\omega t + \psi - 90^\circ - \varphi) + \operatorname{ctg} \varphi \sin(\psi - 90^\circ - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}] \quad (2.37)$$

и при  $t = 0$

$$\frac{di_{\text{кз}}^{(2)}}{dt}(0) = \frac{\sqrt{3} U_m}{2L} \sin(\psi - 90^\circ). \quad (2.38)$$

За величину уставки максимальной токовой защиты, реагирующей на скорость изменения тока, принимаем максимальную величину скорости изменения тока, которая имеет место при пуске наиболее мощного электродвигателя.

Максимальная величина скорости изменения пускового тока определяется выражением

$$\frac{dI_{\text{п. м}}}{dt} = k \frac{U_m}{L + L_{\text{дв. п}}}, \quad (2.39)$$

где  $k$  — коэффициент запаса, учитывающий повторные пуски электродвигателя ( $k = 1,2 \div 1,6$ );  $L_{\text{дв. п}}$  — индуктивность фазы электродвигателя в пусковом (заторможенном) режиме.

Для указанных параметров шахтной участковой сети с учетом формул (2.38) и (2.39) имеем

$$\frac{di_{\text{кз}}^{(2)}}{dt}(0) = 1,4 \cdot 10^6 \sin(\psi - 90^\circ) \text{ А/с},$$

$$\frac{dI_{\text{п. м}}}{dt} = 0,39 \cdot 10^6 \text{ А/с}.$$

Величина угла  $\psi$ , при которой имеет место максимально возможное время срабатывания определяется выражением

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \{(2kL)/[\sqrt{3}(L + L_{\text{дв. п}})]\}.$$

Время срабатывания защитного устройства определяем по точке пересечения кривой  $di_{\text{кз}}^{(2)}/dt = f(t)$ , построенной при помощи выражения (2.37) для  $\psi = 73,8^\circ$ , с прямой, ордината которой равна  $0,39 \cdot 10^6$  А/с (рис. 2.17). Из рис. 2.17 видно, что время срабатывания равно  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с, и можно считать, что для одних и тех же условий максимальная токовая защита, реагирующая на скорость изменения тока, является более быстроедействующей.

Из выражения (2.38) видно, что величина первой производной тока двухфазного короткого замыкания равна нулю, если в момент замыкания линейное напряжение равно нулю ( $\psi = 90^\circ$ ).

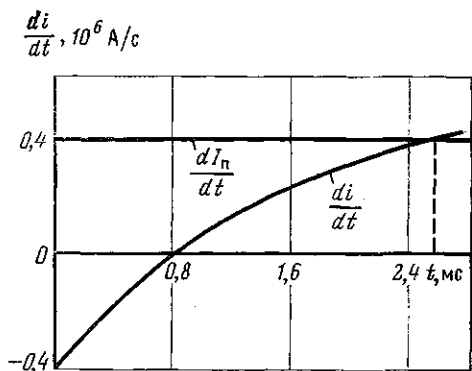
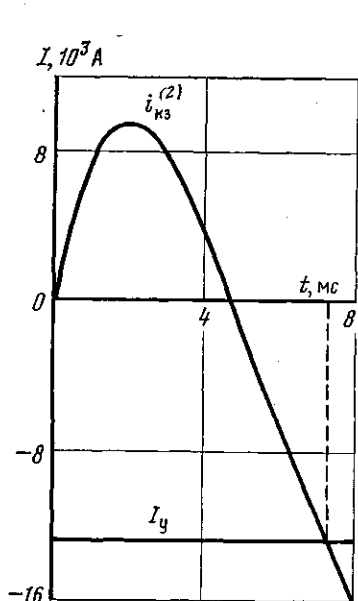


Рис. 2.16. Изменение тока двухфазного короткого замыкания во времени

Рис. 2.17. Изменение скорости тока двухфазного короткого замыкания во времени

Далее для  $\psi = 90^\circ$  величина второй производной тока по времени отлична от нуля:

$$\frac{d^2 i_{k3}^{(2)}}{dt^2}(0) = \frac{\sqrt{3} \omega U_m}{2L}.$$

Последнее, по данным работы [32], предлагается использовать при создании устройств быстросействующей защиты от токов короткого замыкания. Действительно, при  $t = 0$  и  $\psi = 90^\circ$  величина отношения второй производной тока двухфазного короткого замыкания ко второй производной пускового тока определяется выражением

$$k = [(L + L_{дв.п}) \sin \varphi_n] / (2L),$$

где

$$\varphi_n = \arctg \{[\omega (L + L_{дв.п})] / (R + R_{дв.п})\}$$

и для шахтных участков сетей всегда больше единицы ( $k = 2 \div 3$ ), т. е. существует теоретическая возможность использования второй производной тока по времени в устройствах быстросействующей защиты.

В действительности вторая производная непрерывной функции может быть выделена только путем последовательного дифференцирования. При этом в качестве дифференцирующих устройств используются цепочки  $R - L$  и  $R - C$ .

Рассмотрим возможность использования второй производной тока по времени в реальных устройствах защиты. На рис. 2.18, а показана расчетная схема, согласно которой на вход дифферен-

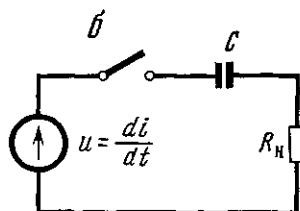
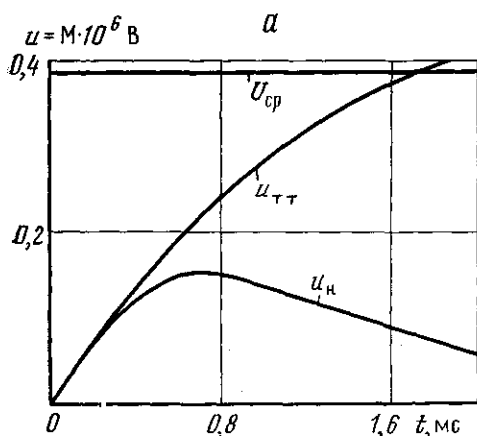


Рис. 2.18. Изменение величины напряжений на выходе трансформатора тока и дифференцирующего звена (а) и расчетная схема переходного процесса (б)

пирующего звена  $R_n - C$  подается напряжение, пропорциональное первой производной тока двухфазного короткого замыкания.

Для напряжений в схеме справедливо следующее дифференциальное уравнение:

$$u_C + R_n C \frac{du_C}{dt} = M I_m \omega [\cos(\omega t + \psi - 90^\circ - \varphi) + \operatorname{ctg} \varphi \sin(\psi - 90^\circ - \varphi) e^{-\frac{R}{L} t}],$$

где  $u_C$  — мгновенное значение напряжения на конденсаторе;  $R_n$  — сопротивление нагрузки дифференцирующего звена;  $M$  — коэффициент взаимной индуктивности между обмотками трансформатора тока. Решение уравнения относительно напряжения на нагрузке имеет вид

$$u_n = \omega M I_m \cos \varphi_1 [\cos(\omega t + \psi - 90^\circ - \varphi + \varphi_1) + \operatorname{tg} \varphi_1 \sin(\psi - 90^\circ - \varphi + \varphi_1) e^{-t/R_n C}] + \frac{\omega M I_m \operatorname{ctg} \varphi \sin(\psi - 90^\circ - \varphi)}{(1/R_n C - R/L)} \left( \frac{1}{R_n C} e^{-t/R_n C} - \frac{R}{L} e^{-R t/L} \right), \quad (2.40)$$

где  $\varphi_1 = \arctg [1/(\omega R_n C)]$ . Для указанных выше параметров шахтной сети и  $\psi = 90^\circ$  согласно выражениям (2.37) и (2.40) напряжения на выходе трансформатора тока  $u_{тт}$  и дифференцирующего звена  $u_n$  ( $R_n = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ) соответственно равны

$$u_{тт} = 0,596 \cdot 10^6 M [\cos(\omega t - 25,4^\circ) - 0,9e^{-562t}] \text{ В},$$

$$u_n = 0,0923 \cdot 10^6 M [\cos(\omega t + 55,7^\circ) + 5,25e^{-2000t}] - 0,373 \cdot M \cdot 10^3 (2 \cdot 10^3 \cdot e^{-2000t} - 562e^{-562t}).$$

Максимально возможная величина напряжения на выходе трансформатора тока в режиме пуска электродвигателя  $U_{т.п} =$



$= M \cdot 0,39 \cdot 10^6$  В. При  $t = 0$  конденсатор как бы закорочен, поэтому указанная величина будет приложена к резистору нагрузки  $R_n$  дифференцирующего звена, т. е. защитное устройство, реагирующее на вторую производную тока по времени, должно быть отстроено от этой величины напряжения ( $U_{cp}$ ). Нанеся на график кривые  $u_{тг} = f(t)$ ,  $u_n = f(t)$  и прямую, ордината которой равна  $M \cdot 0,39 \cdot 10^6$  В (рис. 2.18, б), видим, что кривая  $u_n = f(t)$  и прямая не пересекаются, т. е. сигнал на выходе дифференцирующего звена  $R_n - C$  явно недостаточен для срабатывания.

Таким образом, использование второй производной тока короткого замыкания в устройствах быстродействующей защиты нецелесообразно, и в качестве устройства быстродействующей защиты от токов короткого замыкания следует рекомендовать защиту, реагирующую на скорость изменения тока.

### 2.2.2. Выбор дифференцирующего трансформатора тока

В качестве дифференцирующего звена в устройстве максимальной токовой защиты, реагирующей на скорость изменения тока, может быть использован трансформатор тока с воздушным зазором в магнитной системе (трансреактор). Основным требованием, которому он должен удовлетворять, является пропорциональность напря-

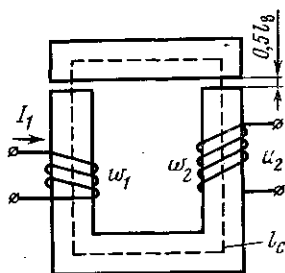


Рис. 2.19. Принципиальная схема трансформатора тока с воздушным зазором в стальном сердечнике

жения на выходе вторичной обмотки скорости изменения первичного тока. Последнее имеет место при отсутствии насыщения стального сердечника.

На рис. 2.19 показана принципиальная схема трансформатора тока, состоящая из П-образного стального сердечника с воздушным зазором, первичной  $w_1$  и вторичной  $w_2$  обмоток. Определим длину воздушного зазора стального сердечника и величину напряжения холостого хода на выходе вторичной обмотки. Воздушный зазор в рассматриваемой магнитной цепи является участком с наибольшим магнитным сопротивлением, которое во много раз превышает магнитное сопротивление стального сердечника. Поэтому можно считать, что

$$I_1 w_1 = H_{\delta} l_{\delta},$$

где  $I_1$  — ток, протекающий через первичную обмотку, А;  $w_1$  —

число витков первичной обмотки;  $H_B$  — напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, А/м;  $l_B$  — длина воздушного зазора, м.

С учетом того, что

$$H_B = B_B / \mu_0$$

(здесь  $B_B$  — индукция в воздушном зазоре, Т;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м), длина воздушного зазора стального сердечника может быть найдена из выражения

$$l_B = \frac{I_1 w_1}{0,8 B_B} \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Согласно [33], индукция в стальном сердечнике равна индукции в воздушном зазоре, если величина отношения  $l_B / l_{ст} > 0,05$ , где  $l_{ст}$  — длина стального сердечника. Считая, что  $l_B / l_{ст} > 0,05$ , получим

$$l_B = \frac{I_1 w_1}{0,8 B} \cdot 10^{-6} \text{ м,} \quad (2.41)$$

где  $B$  — магнитная индукция в стали, Т.

Напряжение между разомкнутыми обмотками вторичной обмотки определим как ЭДС взаимной индукции

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt},$$

где  $M$  — коэффициент взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками, Г;  $di_1/dt$  — скорость изменения первичного тока, А/с.

Согласно [34], коэффициент взаимной индуктивности равен

$$M = w_2 \Phi_{21} / I_1,$$

где  $\Phi_{21}$  — магнитный поток взаимной индукции, связанный со вторичной обмоткой, Вб.

Пренебрегая для стального сердечника потоками рассеяния, можно считать, что

$$\Phi_{21} = B \cdot S = \frac{I_1 w_1 S}{0,8 l_B} \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$$

(здесь  $S$  — площадь поперечного сечения стального сердечника  $\text{м}^2$ ) и величина напряжения между разомкнутыми зажимами вторичной обмотки может быть определена из выражения

$$u_2 = \frac{w_1 w_2 S}{0,8 l_B} \cdot \frac{di_1}{dt} \cdot 10^{-6} \text{ В.} \quad (2.42)$$

Выбор параметров дифференцирующего трансформатора тока производится следующим образом. Задаемся числом витков первичной обмотки. Из условия отсутствия насыщения стального сердечника в требуемом диапазоне изменения первичного тока при помощи выражения (2.41) выбираем индукцию ( $B$ ) в электротех-

нической стали и определяем длину воздушного зазора ( $l_b$ ). Рассчитав минимальную величину скорости изменения тока короткого замыкания и зная величину напряжения срабатывания исполнительного органа устройства защиты, а также учитывая снижение величины напряжения на выходе вторичной обмотки, нагруженной на активное сопротивление, при помощи выражения (2.42) определяем число витков вторичной обмотки и площадь поперечного сечения стального сердечника. Длину стального сердечника выбираем из отношения  $l_b/l_{ст} > 0,05$ .

Следует отметить, что выражения (2.41) и (2.42) в основном используются для ориентировочного выбора параметров дифференцирующих трансформаторов тока, так как из-за принятых допущений погрешность расчетов составляет не менее 30%.

### 2.2.3. Экспериментальные исследования быстродействующей максимальной токовой защиты

На рис. 2.20 показана разработанная ИГД им. А. А. Скочинского для шахтных участковых сетей принципиальная электрическая схема устройства быстродействующей защиты от токов короткого замыкания (БМЗ).

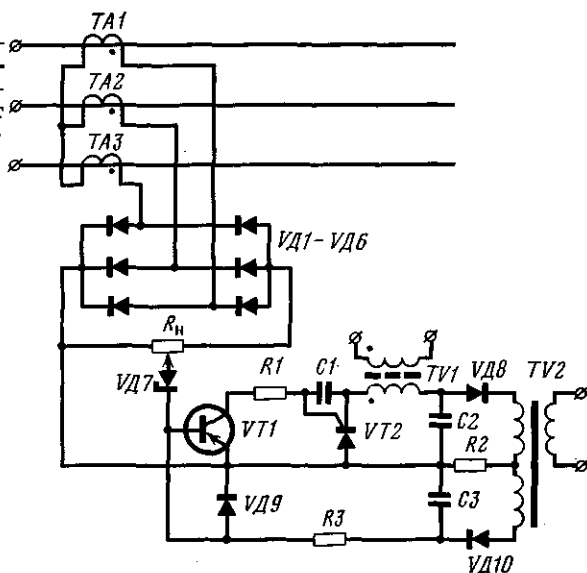
Устройство типа БМЗ состоит: из установленных в трех фазах дифференцирующих трансформаторов тока  $TA1—TA3$ , вторичные обмотки которых соединены в звезду и через трехфазный двухполупериодный выпрямитель  $VD1—VD6$  нагружены на переменный резистор нагрузки  $R_n$ ; измерительного элемента  $VD7$  и безынерционного исполнительного органа ( $VT1, VT2, VD8—VD10, CI—C3, TV1—TV2$ ). Величина сопротивления резистора  $R_n$  выбирается из условия обеспечения минимальной угловой погрешности трансформаторов тока и максимальной чувствительности к токам двухфазного короткого замыкания, а в качестве измерительного элемента в устройстве используется стабилитрон  $VD7$ , включенный в эмиттер — базовый переход транзистора  $VT1$  исполнительного органа.

Действующие Правила безопасности [6] требуют производить проверку выбранных уставок срабатывания по току двухфазного короткого замыкания. Поэтому при помощи вольт-амперной характеристики (зависимости величины напряжения на резисторе  $R_n$  от величины действующего значения тока двухфазного короткого замыкания) отградуирована шкала уставок. При этом уставки срабатывания на шкале нанесены в условных единицах, каждая из которых представляет собой часть полного сопротивления резистора  $R_n$  и определяется выражением

$$R_x = U_{ст} R_n / U_m,$$

где  $U_{ст}$  — напряжение стабилизации (пробоя) стабилитрона, В;  $U_m$  — амплитудное значение падения напряжения на резисторе  $R_n$ , соответствующее заданной величине тока двухфазного короткого замыкания, В.

Рис. 2.20. Принципиальная электрическая схема устройства быстросействующей защиты от токов короткого замыкания



Амплитудное значение падения напряжения на резисторе с учетом принятой схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и схемы выпрямления определяется выражением

$$U_m = 1,41 \frac{U_d}{0,9} = 1,57 U_d,$$

где  $U_d$  — напряжение на вольт-амперной характеристике трансформаторов тока, соответствующее заданному значению тока двухфазного короткого замыкания.

Искомая часть сопротивления имеет вид

$$R_x = U_{ст} R_n / (1,57 U_d).$$

Следует отметить, что принятые нами схема соединения звездой вторичных обмоток трансформаторов тока и схема трехфазного двухполупериодного выпрямления при прочих равных условиях обеспечивают повышение чувствительности защитного устройства к токам двухфазного короткого замыкания в  $2/\sqrt{3}$  раза. Последнее объясняется тем, что в процессе отстройки от пускового тока электродвигателя напряжение, выделяемое на резисторе  $R_n$ , пропорционально  $\sqrt{3} I_{дв.п}$  (здесь  $I_{дв.п}$  — пусковой ток электродвигателя), а в режиме двухфазного короткого замыкания напряжение, выделяемое на резисторе  $R_n$ , пропорционально  $2I_{кз}^{(2)}$ .

При соединении вторичных обмоток трансформаторов тока треугольником или использовании трехфазной однополупериодной схемы выпрямления напряжение, выделяемое на резисторе  $R_n$ , при пуске электродвигателя пропорционально  $I_{дв.п}$ , а при двухфазном коротком замыкании —  $I_{кз}^{(2)}$ .

Технические данные быстродействующей максимальной токовой защиты БМЗ определены путем ее сравнительных испытаний с серийными защитными устройствами УМЗ и ПМЗ на натурном макете шахтной участковой сети. При этом фактический пусковой ток электродвигателя ЭДКО4-4М мощностью 115 кВт составлял 600 А.

Результаты сравнительных испытаний защитных устройств приведены ниже:

При двухфазных коротких замыканиях

|                    |                         |                    |                     |                    |                     |                     |
|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| $I_{кз}^{(2)}$ , А | 680                     | 860                | 1120                | 1300               | 1460                | 1840                |
| $t$ , с (УМЗ)      | $95 \cdot 10^{-3}$      | $48 \cdot 10^{-3}$ | $36 \cdot 10^{-3}$  | $32 \cdot 10^{-3}$ | $30 \cdot 10^{-3}$  | $28 \cdot 10^{-3}$  |
| $t$ , с (ПМЗ)      | Не срабатывает          |                    |                     | $15 \cdot 10^{-3}$ | $12 \cdot 10^{-3}$  | $8 \cdot 10^{-3}$   |
| $t$ , с (БМЗ)      | Пропуски в срабатывании | $15 \cdot 10^{-3}$ | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-3}$  | $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |

При трехфазных коротких замыканиях

|                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $I_{кз}^{(3)}$ , А | 400                 | 600                 | 700                 | 1100                | 1260                | 2500                |
| $t$ , с (УМЗ)      | Не срабатывает      |                     | $65 \cdot 10^{-3}$  | $35 \cdot 10^{-3}$  | $32 \cdot 10^{-3}$  | $29 \cdot 10^{-3}$  |
| $t$ , с (ПМЗ)      | Не срабатывает      |                     |                     |                     | $10 \cdot 10^{-3}$  | $7 \cdot 10^{-3}$   |
| $t$ , с (БМЗ)      | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $0,2 \cdot 10^{-3}$ |

Здесь  $I_{кз}^{(2)}$ ,  $I_{кз}^{(3)}$  — соответственно действующие значения тока двухфазного и трехфазного короткого замыкания;  $t$  — максимально возможное время срабатывания защитного устройства, определенное путем осциллографирования процессов короткого замыкания.

Анализ табличных данных показывает:

величина уставки срабатывания максимальной токовой защиты типа УМЗ (отношение величины тока срабатывания к величине фактического пускового тока электродвигателя)  $I_y = 1,4 I_{п.ф}$ ;

величина уставки срабатывания максимальной токовой защиты типа ПМЗ  $I_y = 2,0 I_{п.ф}$ ;

величина уставки срабатывания максимальной токовой защиты типа БМЗ при двухфазных коротких замыканиях  $I_y^{(2)} = 1,5 I_{п.ф}$ , а трехфазных  $I_y^{(3)} = 0,666 I_{п.ф}$ ;

для одних и тех же условий время срабатывания максимальной токовой защиты типа БМЗ значительно меньше времени срабатывания серийных защитных устройств;

при трехфазных коротких замыканиях (в случаях срабатывания) время срабатывания максимальной токовой защиты типа БМЗ составляет  $0,2 \cdot 10^{-3}$  с. Последнее объясняется инерционностью дифференцирующих трансформаторов тока (угловой погрешностью в переходных режимах).

Зная величины уставок срабатывания рассматриваемых защит-

ных устройств, определим зоны их действия (длину защищаемой кабельной линии). Комплексные значения величин тока двухфазного короткого замыкания и фактического пускового тока электродвигателя могут быть определены из выражений

$$I_{кз}^{(2)} = \sqrt{3} U_{\phi} e^{-j30^{\circ}} / [2 (\underline{Z}_T + \underline{Z}_K)], \quad (2.43)$$

$$I_{п.ф} = U_{\phi} e^{j0^{\circ}} / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_K + \underline{Z}_{дв.п}), \quad (2.44)$$

где  $U_{\phi}$  — действующее значение фазного напряжения сети;  $\underline{Z}_T$ ,  $\underline{Z}_K$ ,  $\underline{Z}_{дв.п}$  — соответственно комплексная величина сопротивления фазы силового трансформатора, кабеля и электродвигателя в пусковом режиме.

Предварительные расчеты показывают, что угол сдвига между векторами  $I_{кз}^{(2)}$  и  $I_{п.ф}$  находится в пределах от 5 до 10 электрических градусов. Учитывая последнее и решая совместно уравнения (2.34), (2.43) и (2.44), получим расчетные выражения, определяющие величину сопротивления защищаемой кабельной линии.

Величина сопротивления кабельной линии, защищаемой устройством типа УМЗ ( $I_y = 1,1 I_{п.ф}$ ), определяется решением уравнения

$$\sqrt{3} U_{\phi} / [2 k_{\phi} (\underline{Z}_T + \underline{Z}_K)] = 1,1 U_{\phi} / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_K + \underline{Z}_{дв.п}) \cos(5 \div 10^{\circ})$$

относительно  $\underline{Z}_K$ .

В нашем случае

$$\underline{Z}_K(\text{УМЗ}) = 1,07 \underline{Z}_{дв.п} - \underline{Z}_T. \quad (2.45)$$

Например, для параметров  $\underline{Z}_T = 0,0732 e^{j73,8^{\circ}}$  (трансформаторная подстанция типа ТКШВП-240) и  $\underline{Z}_{дв.п} = 0,542 e^{j62,8^{\circ}}$  (электродвигатель ЭДКО-4М) с учетом формулы (2.45) имеем

$$\underline{Z}_K = 0,58 e^{j62,8^{\circ}} - 0,0732 e^{j73,8^{\circ}} = 0,503 e^{j62,2^{\circ}},$$

что соответствует 1,165 км кабеля с сечением рабочих жил 50 мм<sup>2</sup>.

Определим величину погрешности, которая имеет место при расчете длины защищаемой кабельной линии при помощи выражения (2.45). Для указанных выше параметров силового трансформатора, электродвигателя и кабеля модули величин тока двухфазного короткого замыкания и фактического пускового тока электродвигателя соответственно равны

$$\begin{aligned} I_{кз}^{(2)} &= \frac{\sqrt{3} U_{\phi}}{2 \sqrt{(R_T + R_K)^2 + (X_T + X_K)^2}} = \\ &= \frac{0,865 \cdot 400}{\sqrt{(0,0204 + 0,494)^2 + (0,0702 + 0,0965)^2}} = 640 \text{ А}, \end{aligned}$$

$$I_{п.ф} = \frac{400}{\sqrt{(R_T + R_K + R_{дв.п})^2 + (X_T + X_K + X_{дв.п})^2}} = 400 \text{ А}.$$

Согласно уравнению (2.34) должно соблюдаться условие

$$I_{кз}^{(2)} = 1,5I_y = 1,5 \cdot 1,1I_{п.ф.}$$

Откуда погрешность расчета длины кабельной линии равна

$$(1,5 \cdot 1,1I_{п.ф.} - I_{кз}^{(2)}) \cdot 100 / (1,5 \cdot 1,1I_{п.ф.}) = (660 - 640) \cdot 100 / 660 = 3\%.$$

Для защитных устройств типа ПМЗ и БМЗ по аналогии с предыдущим получим следующие расчетные выражения, определяющие длину защищаемой кабельной линии при двухфазном коротком замыкании:

$$Z_{к(ПМЗ)} = 0,4Z_{дв.п} - Z_T,$$

$$Z_{к(БМЗ)} = 0,61Z_{дв.п} - Z_T,$$

из которых видно, что для одних и тех же условий зона действия защиты типа БМЗ в 1,5 раза выше, чем ПМЗ.

### 2.3. КОМБИНИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ

Показав целесообразность применения в шахтных участковых сетях фильтра напряжения нулевой последовательности и максимальной токовой защиты, реагирующей на скорость изменения тока, рассмотрим их совместную работу при механических повреждениях экранированного кабеля марки ГВШОП.

На рис. 2.21 показана принципиальная электрическая схема комбинированного устройства быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечки на землю [21]. Устройство содержит фильтр напряжения нулевой последовательности ( $C1-C3$ ,  $VD1-VD5$ ,  $R_{н1}$ ), максимальную токовую защиту, реагирующую на скорость изменения тока ( $TA1-TA3$ ,  $VD6-VD12$ ,  $R_{н2}$ ), безынерционный исполнительный орган ИО ( $VT1$ ,  $VT2$ ). В зависимости от вида повреждения срабатывает фильтр напряжения нулевой последовательности или максимальная токовая защита, а в случае двухфазного короткого замыкания с одновременной утечкой на землю через сопротивление экрана имеет место их совместная работа.

Характерной особенностью шахтных участковых сетей является соотношение мощностей источника питания (силового трансформатора) с мощностью отдельного потребителя электроэнергии (электродвигателя угольного комбайна). Исследования [35] показывают, что в шахтных электрических сетях, нагруженных заторможенным электродвигателем, происходит значительное снижение скорости изменения фазных токов короткого замыкания и величины потенциала точки сети в месте возникновения утечки на землю.

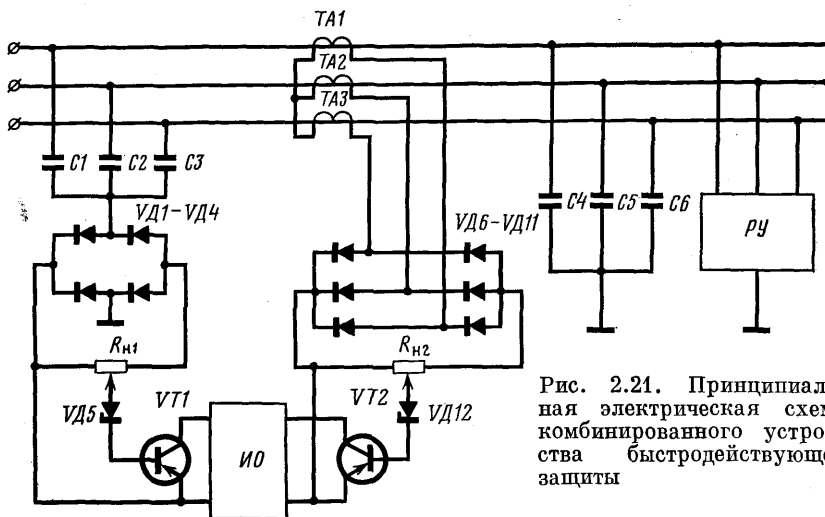


Рис. 2.21. Принципиальная электрическая схема комбинированного устройства быстродействующей защиты

В связи с этим рассмотрим работу комбинированного защитного устройства в двух крайних (предельных) режимах сети: режиме холостого хода и режиме заторможенного электродвигателя наибольшей мощности.

### 2.3.1. Анализ работы защитного устройства в режиме холостого хода сети

В режиме холостого хода сети (без учета присоединенной нагрузки) падение напряжения в кабеле равно нулю. Поэтому величина потенциала в месте возникновения утечки на землю не зависит от длины кабеля (расстояния от силового трансформатора), и время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\Phi = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $R_{н1} = 5,1 \text{ кОм}$ ) в случае однофазной утечки на землю через сопротивление  $R_\Phi = 0,1 \text{ кОм}$ , как показано ранее (см. п. 2.13), не превышает  $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

В случае двухфазного короткого замыкания (фазы *В* и *С* замкнуты между собой) с одновременной утечкой на землю скорость изменения тока короткого замыкания и величина потенциала точки сети в месте возникновения утечки на землю определяются следующим образом:

$$\frac{d i_{\text{кз}}^{(2)}}{dt}(0) = \frac{\sqrt{3} U_m}{2(L_T + L_K)} \sin(\psi - 90^\circ),$$

$$u_d = 0,5 U_m \sin(\omega t + \psi - 180^\circ). \quad (2.46)$$

Ток (мА), протекающий через резистор нагрузки  $R_{н1}$  фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\Phi = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $R_{н1} = 5,1 \text{ кОм}$ ) при утечке на землю через  $R_\Phi = 0,1 \text{ кОм}$  соглас-



но выражениям (2.25) и (2.46) для  $U_m = 565$  В,  $U_C(0) = 70$  В равен

$$i_A = 41,5 \sin(\omega t + \psi - 151,6^\circ) + 40 \sin(\psi - 230,8^\circ) e^{-258t} - 63 \sin(\psi - 190,5^\circ) e^{-1704t} - 15,8 (e^{-1704t} - e^{-258t}). \quad (2.47)$$

Срабатывание защитного устройства происходит в тот момент времени, когда этот ток достигнет величины  $I_{ср} = 10$  мА (см. п. 2.1.3).

Далее происходит срабатывание максимальной токовой защиты, если в момент замыкания величина скорости изменения тока короткого замыкания превышает уставку срабатывания. При этом время срабатывания по данным, приведенным в п. 2.2.3, не превышает  $0,2 \cdot 10^{-3}$  с, а величина уставки максимальной токовой защиты по скорости изменения тока может быть определена из выражения

$$\left[ \frac{di}{dt} \right]_y^{(2)} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \omega I_{н.ф}. \quad (2.48)$$

Кроме того, из выражения (2.39) с учетом схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и схемы выпрямления имеем

$$\left[ \frac{di}{dt} \right]_y^{(2)} = (\sqrt{3}/2) [k U_m / (L_T + L_K + L_{дв.п})]. \quad (2.49)$$

Решив совместно уравнения (2.48) и (2.49), получим зависимость величины коэффициента  $k$  от длины кабеля с сечением рабочих жил  $50 \text{ мм}^2$  в сети, содержащей трансформаторную подстанцию типа ТКШВП-240 и электродвигатель типа ЭДКО4-4М (рис. 2.22).

С учетом снижения величины скорости изменения тока короткого замыкания за время формирования сигнала трансформаторами тока условие срабатывания максимальной токовой защиты может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\sqrt{3} U_m}{2(L_T + L_K)} e^{-\frac{R_T + R_K}{L_T + L_K} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}} \sin(\psi - 90^\circ) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{k U_m}{(L_T + L_K + L_{дв.п})}.$$

На рис. 2.23 для трансформаторной подстанции типа ТКШВП-240 показана зависимость величины  $e^{-x}$  от длины кабеля с сечением рабочих жил  $50 \text{ мм}^2$ , где  $x = [(R_T + R_K)/(L_T + L_K)] \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}$ .

С учетом изложенного условие срабатывания максимальной токовой защиты для наиболее тяжелого случая (пуск электродвигателя осуществляется в непосредственной близости от силового трансформатора, а двухфазное короткое замыкание происходит в наиболее удаленной от силового трансформатора точке сети) имеет вид

$$[0,7 U_m / (L_T + L_K)] \sin(\psi - 90^\circ) = 1,35 U_m / (L_T + L_{дв.п}),$$

из которого, зная величину угла  $\psi$ , можно определить длину защищаемого кабеля.

Рис. 2.22. Зависимость коэффициента  $K$  от длины кабеля

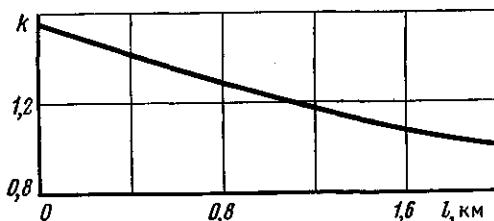
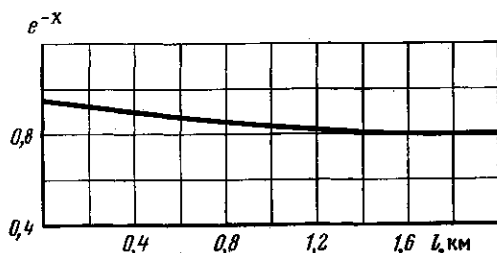


Рис. 2.23. Зависимость величины  $e^{-X}$  от длины кабеля



Величину угла  $\psi$  определяем из соотношения (2.47). С этой целью для различных значений угла  $\psi$  строим кривые зависимости  $i_k = f(\psi, t)$  и по точке их пересечения с прямой, ордината которой равна 10 мА, определяем время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности. Задаваясь временем срабатывания, определяем величину угла  $\psi$ .

Например, для  $\psi = 135^\circ$  время срабатывания фильтра равно  $0,25 \cdot 10^{-3}$  с, и длина защищаемого кабеля

$$l_k = (0,356L_{\text{дв.п}} - 0,635L_T)/L_{\text{уд.к}},$$

где  $L_{\text{уд.к}}$  — удельная индуктивность кабеля.

Для ТКШВП-240 ( $L_T = 0,232 \cdot 10^{-3}$  Г) и ЭДКО4-4М ( $L_{\text{дв.п}} = 1,54 \cdot 10^{-3}$  Г) длина защищаемого кабеля с сечением рабочих жил 50 мм<sup>2</sup> ( $L_{\text{уд.к}} = 0,258 \cdot 10^{-3}$  Г) равна 1,55 км, что превышает длину кабеля, защищаемого устройством типа УМЗ (1,165 км, см. п. 2.2.3).

В случае трехфазного короткого замыкания срабатывает только максимальная токовая защита (потенциал точки сети в месте короткого замыкания равен нулю). По аналогии с предыдущим длина защищаемого кабеля

$$l_k = (0,432L_{\text{дв.п}} - 0,568L_T)/L_{\text{уд.к}}$$

и для указанных выше параметров сети равна 2,04 км.

### 2.3.2. Анализ работы защитного устройства в режиме заторможенного электродвигателя

Структурное построение схем электроснабжения очистных и подготовительных работ на крутых пластах не отличается от обычных [36].

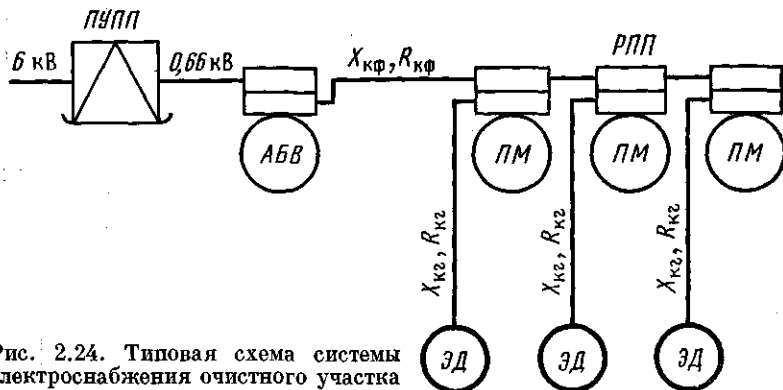


Рис. 2.24. Типовая схема системы электроснабжения очистного участка

На рис. 2.24 показана типовая схема системы электроснабжения очистного участка, согласно которой питание передвижной участковой трансформаторной подстанции ПУПП осуществляется от центральной подземной подстанции напряжением 6 кВ. От ПУПП через быстродействующий автоматический выключатель типа АВВ по фидерному кабелю ( $X_{кф}, R_{кф}$ ) напряжение 0,66 кВ поступает на участковый распределительный пункт РПП, от которого через соответствующие магнитные пускатели ПМ и гибкие кабели ( $X_{к2}, R_{к2}$ ) напряжение подается на электродвигатели горных машин и механизмов.

#### Однофазная утечка на землю

Согласно выражению (2.25) величина тока, протекающего через резистор нагрузки  $R_{нл}$  фильтра напряжения нулевой последовательности, при прочих постоянных определяется величиной потенциала точки сети в месте возникновения утечки на землю и из-за падения напряжения в кабеле имеет наименьшее значение в наиболее удаленной от силового трансформатора точке сети (на зажимах электродвигателя).

Определим величину напряжения в наиболее удаленных точках сети для режима заторможенного электродвигателя наибольшей мощности.

Рассматриваемый случай является симметричным режимом трехфазной цепи, поэтому расчет проведем для одной из фаз.

На рис. 2.25, а показана расчетная схема, в которой приняты следующие обозначения:  $Z_1$  — комплексное сопротивление цепи (силовой трансформатор — фидерный кабель),  $Z_2$  — комплексное сопротивление группы электродвигателей, работающих в номинальном режиме,  $Z_3$  — комплексное сопротивление цепи (гибкий кабель — заторможенный электродвигатель). Согласно схеме (рис. 2.25, а) величина фазного напряжения на зажимах затор-

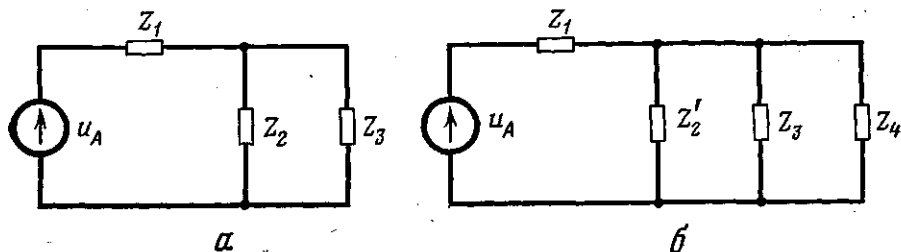


Рис. 2.25. Расчетная схема величины напряжения на зажимах заторможенного электродвигателя

моженного электродвигателя

$$\dot{U}_{\text{м. дв. п}} = U_{\text{м}} e^{j\varphi} Z_2 Z_{\text{дв. п}} / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3), \quad (2.50)$$

где  $Z_1 = Z_1 e^{j\varphi_1}$ ;  $Z_1 = \sqrt{(R_{\text{т}} + R_{\text{кф}})^2 + (X_{\text{т}} + X_{\text{кф}})^2}$ ;  $R_{\text{кф}}$ ,  $X_{\text{кф}}$  — соответственно активное и индуктивное сопротивления фидерного кабеля, Ом;

$$\varphi_1 = \arctg [(X_{\text{т}} + X_{\text{кф}})/(R_{\text{т}} + R_{\text{кф}})]; \quad Z_2 = U_{\text{н}} e^{j\varphi_2} / (\sqrt{3} \Sigma \Delta I);$$

$U_{\text{н}}$  — номинальное линейное напряжение сети, В;  $\Sigma \Delta I$  — суммарный ток электродвигателей, работающих в номинальном режиме, А;

$$\varphi_2 = \arccos \left[ \left( \sum_{i=1}^{i=n} P_i \cos \varphi_i \right) / \sum_{i=1}^n P_i \right];$$

$P_i$  — мощность электродвигателя, работающего в номинальном режиме, кВт;  $\cos \varphi_i$  — коэффициент мощности  $i$ -го электродвигателя, работающего в номинальном режиме;

$$Z_3 = Z_3 e^{j\varphi_3}; \quad Z_3 = \sqrt{(R_{\text{кг}} + R_{\text{дв. п}})^2 + (X_{\text{кг}} + X_{\text{дв. п}})^2};$$

$$\varphi_3 = \arctg [(X_{\text{кг}} + X_{\text{дв. п}})/(R_{\text{кг}} + R_{\text{дв. п}})];$$

$R_{\text{кг}}$ ,  $X_{\text{кг}}$  — соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы гибкого кабеля, питающего заторможенный электродвигатель, Ом;

$$Z_{\text{дв. п}} = Z_{\text{дв. п}} e^{j\varphi_{\text{дв. п}}}; \quad \varphi_{\text{дв. п}} = \arctg \left( \frac{X_{\text{дв. п}}}{R_{\text{дв. п}}} \right).$$

По аналогии с предыдущим величина фазного напряжения на зажимах электродвигателя, работающего в номинальном режиме при заторможенном электродвигателе наибольшей мощности (рис. 2.25, б), определяется из выражения

$$\dot{U}_{\text{дв. а}} = \frac{U_{\text{м}} e^{j\varphi} Z'_2 Z_3 Z_{\text{дв. п}}}{(Z_1 Z'_2 Z_3 + Z_1 Z'_2 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z'_2 Z_3 Z_4)}, \quad (2.51)$$

где  $Z'_2$  — комплексное сопротивление группы электродвигателей

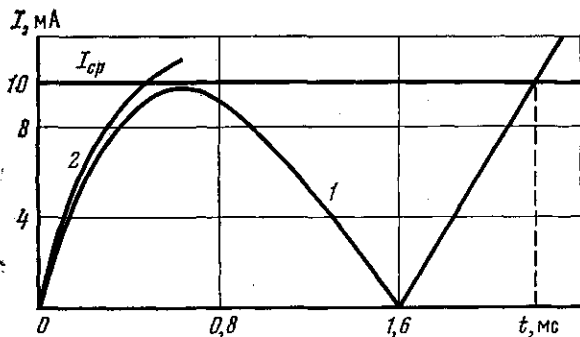


Рис. 2.26. Изменение тока, протекающего через резистор нагрузки фильтра нулевой последовательности, во времени

(за исключением электродвигателя, на зажимах которого определяется напряжение), работающих в номинальном режиме;  $Z_{\text{дв.н}} = U_{\text{н}} e^{j\varphi_{\text{дв.н}}} / (\sqrt{3} I_{\text{дв.н}})$  — комплексное сопротивление электродвигателя, на зажимах которого определяется напряжение;  $I_{\text{дв.н}}$  — номинальный ток электродвигателя, А;  $\cos \varphi_{\text{н}}$  — номинальный коэффициент мощности электродвигателя;  $Z_4$  — комплексное сопротивление цепи (гибкий кабель — электродвигатель, на зажимах которого определяется напряжение).

Согласно предварительным расчетам, проведенным для типовых схем электроснабжения при помощи выражений (2.50) и (2.51), наименьшая величина напряжения имеет место на зажимах заторможенного электродвигателя наибольшей мощности. Аналитические исследования зависимости времени срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_{\text{ф}} = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $R_{\text{н}} = 5,1 \text{ кОм}$ ) от величины потенциала в месте возникновения однофазной утечки на землю через  $R_0 = 0,1 \text{ кОм}$  показывают, что условию быстрогодействия ( $t_{\text{з.у}} \leq 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ) удовлетворяет величина потенциала  $u_{\text{д}}^{(1)} = 0,6 U_m \sin(\omega t + \psi)$ . При этом ток, протекающий через  $R_{\text{н}}$ , согласно выражению (2.25) для  $U_m = 565 \text{ В}$ ,  $U_{\text{с}}(0) = 70 \text{ В}$  равен

$$i_{\text{н}} = 49,8 \sin(\omega t + \psi + 28,4^\circ) + 48 \sin(\psi - 50,8^\circ) e^{-256t} - 75,6 \sin(\psi - 10,5^\circ) e^{-1704t} - 15,8 (e^{-1704t} - e^{-256t}) \text{ мА}$$

и максимально возможное время срабатывания фильтра, равное  $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , имеет место для  $\psi = 174^\circ$  (рис. 2.26, кривая 1). Для практических расчетов принимаем величину напряжения на зажимах электродвигателя равной  $0,7 U_{\text{н}}$ , и для обеспечения требуемого быстрогодействия выбор сечения кабелей, питающих заторможенный электродвигатель наибольшей мощности, должен удовлетворять этому условию.

#### Двухфазное короткое замыкание с одновременной утечкой на землю

В работе [27] приведены расчеты установившегося значения тока двухфазного короткого замыкания в режиме заторможенного

электродвигателя наибольшей мощности. Однако анализ быстродействующих защитных устройств возможен только при помощи выражений, характеризующих переходные процессы короткого замыкания. В связи с чем нами проведены необходимые расчеты и получены следующие формулы.

При двухфазном коротком замыкании на зажимах заторможенного электродвигателя (фазы *B* и *C* замкнуты между собой, рис. 2.27) фазные токи и величина потенциала точки сети в месте короткого замыкания определяются следующим образом:

$$i_A^{(2)} = \frac{U_m}{Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\phi), \quad (2.52)$$

$$i_B^{(2)} = - \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} U_m e^{pt} \left[ \frac{1}{Z_\phi} \cos(\psi - \varphi_\phi) - \frac{1}{Z} \cos(\psi - \varphi) \right] + \right. \\ \left. + \frac{U_m}{2} \left[ \frac{\sqrt{3}}{Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{1}{Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\phi) \right] \right\}; \quad (2.53)$$

$$i_C^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m e^{pt} \left[ \frac{1}{Z_\phi} \cos(\psi - \varphi_\phi) - \frac{1}{Z} \cos(\psi - \varphi) \right] + \\ + \frac{U_m}{2} \left[ \frac{\sqrt{3}}{Z} \cos(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{1}{Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\phi) \right], \quad (2.54)$$

где

$$Z_\phi = \sqrt{(R_T + R_{K\phi} + R_{K\Gamma} + R_{дв. п})^2 + (X_T + X_{K\phi} + X_{K\Gamma} + X_{дв. п})^2};$$

$$\varphi_\phi = \arctg \frac{X_T + X_{K\phi} + X_{K\Gamma} + X_{дв. п}}{R_T + R_{K\phi} + R_{K\Gamma} + R_{дв. п}};$$

$$Z = \sqrt{(R_T + R_{K\phi} + R_{K\Gamma})^2 + (X_T + X_{K\phi} + X_{K\Gamma})^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_T + X_{K\phi} + X_{K\Gamma}}{R_T + R_{K\phi} + R_{K\Gamma}}; \quad p = - \frac{\omega (R_T + R_{K\phi} + R_{K\Gamma})}{X_T + X_{K\phi} + X_{K\Gamma}};$$

$$U_d^{(2)} = \frac{U_m Z_{дв. п}}{2Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - 180^\circ - \varphi_\phi + \varphi_{дв. п}), \quad (2.55)$$

где  $Z_{дв. п} = \sqrt{R_{дв. п}^2 + X_{дв. п}^2}$ ;  $\varphi_{дв. п} = \arctg(X_{дв. п}/R_{дв. п})$ .

В случае двухфазного короткого замыкания на зажимах электродвигателя, работающего в номинальном режиме, и заторможенного электродвигателя наибольшей мощности (фазы *B* и *C* замкнуты между собой, рис. 2.28) фазные токи определяются из следующих выражений:

$$i_A^{(2)} = \frac{U_m}{Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\phi), \\ i_B^{(2)} = - \left[ A + \frac{U_m}{2Z_\phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\phi) \right]; \quad (2.56)$$

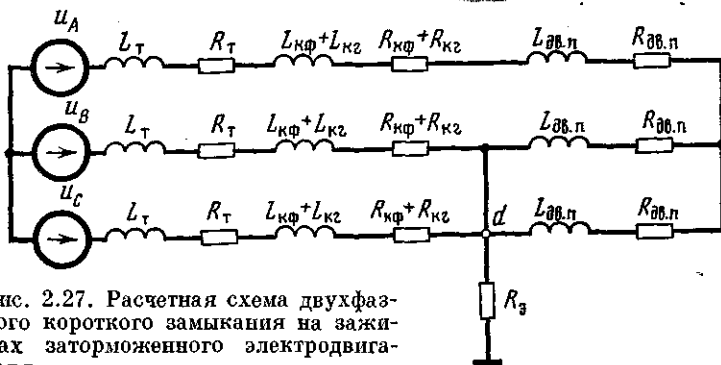


Рис. 2.27. Расчетная схема двухфазного короткого замыкания на зажимах заторможенного электродвигателя

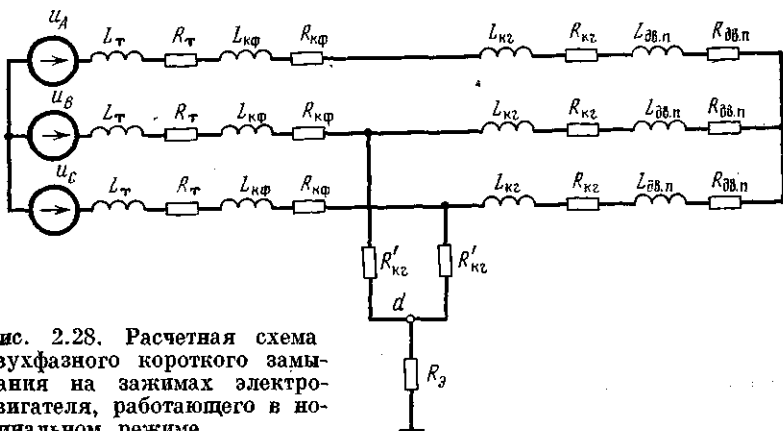


Рис. 2.28. Расчетная схема двухфазного короткого замыкания на зажимах электродвигателя, работающего в номинальном режиме

$$i_C^{(2)} = A - \frac{U_m}{2Z_\Phi} \sin(\omega t + \psi - \varphi_\Phi), \quad (2.57)$$

где

$$\begin{aligned} A = & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_m}{B} e^{pt} \left[ \frac{p_1 L_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)}{Z_\Phi} \cos(\psi - \varphi_\Phi) - \right. \\ & \left. - \frac{R_2 + R_3 + p_1 L_2}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}} \cos(\psi - \gamma_1) \right] + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_m}{B} e^{pt} \times \\ & \times \left[ \frac{R_2 + R_3 + p_2 L_2}{\sqrt{p_2^2 + \omega^2}} \cos(\psi - \gamma_2) - \right. \\ & \left. - \frac{p_2 L_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)}{Z_\Phi} \cos(\psi - \varphi_\Phi) \right] + \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_m}{N} \sqrt{(R_2 + R_3)^2 + \omega^2 L_2^2} \cos(\omega t + \psi + \alpha - \gamma_3); \end{aligned}$$

$$B = L_1 L_2 (p_1 - p_2);$$

$$N = \sqrt{[R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3 - \omega^2 L_1 L_2]^2 + \dots \dots \dots + \omega^2 [R_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)]^2};$$

$$R_1 = R_T + R_{\text{кф}}; \quad R_2 = R_{\text{кг}} + R_{\text{дв. п}};$$

$R_3 = R'_{\text{кг}}$  — активное сопротивление фазы кабеля от участкового распределительного пункта до электродвигателя, работающего в номинальном режиме;

$$L_1 = L_T + L_{\text{кф}}; \quad L_2 = L_{\text{кг}} + L_{\text{дв. п}}; \quad L_{\text{кф}} = X_{\text{кф}}/\omega;$$

$$L_{\text{дв. п}} = X_{\text{дв. п}}/\omega;$$

$$p_{1,2} = - \{ [R_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)] / (2 L_1 L_2) \} \pm \pm \{ [ \sqrt{[R_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)]^2 - \dots \dots \dots - 4 L_1 L_2 (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)} ] / (2 L_1 L_2) \};$$

$$\gamma_1 = \arctg (\omega / |p_1|); \quad \gamma_2 = \arctg (\omega / |p_2|);$$

$$\gamma_3 = \arctg \left\{ \frac{\omega [R_1 L_2 + R_2 L_1 + R_3 (L_1 + L_2)]}{(R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3 - \omega^2 L_1 L_2)} \right\};$$

$$\alpha = \arctg [\omega L_2 / (R_2 + R_3)].$$

Величина потенциала точки сети в месте двухфазного короткого замыкания при возникновении утечки на землю через сопротивление экрана кабеля может быть найдена из выражения

$$\dot{U}_d^{(2)} = 0,5 \dot{U}_{\text{дв. н}} e^{-j180^\circ}, \quad (2.58)$$

где  $\dot{U}_{\text{дв. н}}$  — напряжение на зажимах электродвигателя, определяемое выражением (2.51).

С учетом суммарного тока электродвигателей, работающих в номинальном режиме, и данных п. 2.2.3 уставка по току максимальной токовой защиты, реагирующей на скорость изменения тока, при двухфазном коротком замыкании принимается равной

$$I_y^{(2)} = 1,5 I_{\text{н. ф}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \Sigma \Delta I, \quad (2.59)$$

где  $\sqrt{3}/2$  — коэффициент, учитывающий схему соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и схему выпрямления.

При этом уставка защиты по скорости изменения тока определяется выражением

$$\left[ \frac{di}{dt} \right]_y^{(2)} = \omega \sqrt{2} \left( 1,5 I_{\text{н. ф}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \Sigma \Delta I \right). \quad (2.60)$$

### Трехфазное короткое замыкание

В случае трехфазного короткого замыкания на входных зажимах заторможенного электродвигателя фазные токи определя-



ются из следующих выражений:

$$i_A^{(3)} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \left[ \frac{U_m}{Z_\Phi} \sin(\psi - \varphi_\Phi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) \right] e^{pt}, \quad (2.61)$$

$$i_{B,C}^{(3)} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi \mp 120^\circ - \varphi) + \left[ \frac{U_m}{Z_\Phi} \sin(\psi \mp 120^\circ - \varphi_\Phi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi \mp 120^\circ - \varphi) \right] e^{pt}.$$

При трехфазном коротком замыкании на зажимах электродвигателя, работающего в номинальном режиме, и заторможенном электродвигателе наибольшей мощности ток фазы  $A$

$$i_A^{(3)} = \frac{U_m \sqrt{(R_2 + R_3)^2 + \omega^2 (L_2 + L_3)^2}}{(L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) \sqrt{(p_1^2 + \omega^2)(p_2^2 + \omega^2)}} \sin(\omega t + \psi + \alpha - \gamma_1 - \gamma_2) + \frac{U_m}{L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3} \times \\ \times \left\{ \frac{1}{p_1 - p_2} \left[ \frac{L_\Phi (R_3 + p_1 L_3) + L_1 (R_2 + p_1 L_2)}{Z_\Phi} \sin(\psi - \varphi_\Phi) - \frac{R_2 + R_3 + p_1 (L_2 + L_3)}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_1) \right] e^{p_1 t} + \right. \\ \left. + \frac{1}{p_1 - p_2} \left[ \frac{R_2 + R_3 + p_2 (L_2 + L_3)}{\sqrt{p_2^2 + \omega^2}} \sin(\psi - \gamma_2) - \sin(\psi - \varphi_\Phi) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{L_\Phi (R_3 + p_2 L_3) + L_1 (R_2 + p_2 L_2)}{Z_\Phi} \right] e^{p_2 t} \right\}, \quad (2.62)$$

где

$$p_{1,2} = (-M \pm \sqrt{M^2 - 4NK}) / (2N); \quad M = [L_1 (R_2 + R_3) + L_2 (R_1 + R_3) + L_3 (R_1 + R_2)]; \quad N = L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3; \\ K = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3;$$

$$\gamma_1 = \arctg(\omega / |p_1|); \quad \gamma_2 = \arctg(\omega / |p_2|); \quad \alpha = \arctg[\omega (L_2 + L_3) / (R_2 + R_3)].$$

Токи фаз  $B$  и  $C$  отличаются от тока фазы  $A$  сдвигом по фазе на  $\pm 120$  электрических градусов.

Приведенные выше соотношения позволяют провести анализ работы комбинированного устройства быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечки на землю, а также проверить кабельную сеть участка по условию обеспечения требуемого быстродействия.

### 2.3.3. Расчет кабельной сети системы электроснабжения с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой

ИГД им. А. А. Скочинского разработаны типовые схемы электроснабжения очистных и подготовительных работ, в том числе и для шахт, разрабатывающих крутые пласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа [37]. Расчет кабельной сети участка обычной системы электроснабжения, как правило, сводится к определению сечения фидерных (магистральных) и распределительных кабелей, которые, будучи достаточно экономичными, обеспечивали бы необходимый уровень напряжения на зажимах электродвигателей горных машин и механизмов.

Рассмотрим на конкретном примере особенности расчета кабельной сети системы электроснабжения с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой. На рис. 2.24 показана схема электроснабжения, а в табл. 2.1 приведена характеристика электродвигателей, установленных на участке.

Характеристика электродвигателей, установленных на участке

| Наименование, привода                        | Число | $P_n$ , кВт | $I$ , А | $\cos \varphi_n$ | $\cos \varphi_{\Sigma}$ |
|--|-------|-------------|---------|------------------|-------------------------|
| Конвейероструг                               | 1     | 115,0       | 126,0   | 0,87             | 0,42                    |
| Маслостанция                                 | 2     | 17,0        | 19,0    | 0,88             |                         |
|  | 1     | 4,0         | 5,1     | 0,84             |                         |
| Станция орошения                             | 1     | 30,0        | 36,0    | 0,84             |                         |
| Лебедки, воздухоохладитель, толкатель и т.д. | 5     | 13,0        | 16,0    | 0,82             |                         |

Выбор мощности силового трансформатора рудничной передвижной подстанции и сечения кабелей проведем по методике, изложенной в работе [38].

Расчетная мощность силового трансформатора (кВ·А) определяется по формуле

$$S_{тр} = k_c \Sigma P_{уст} / \cos \varphi,$$

где  $k_c$  — коэффициент спроса;  $\Sigma P_{уст}$  — суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт;  $\cos \varphi$  — средневзвешенный коэффициент мощности.

Средневзвешенный  $\cos \varphi$  для очистных и подготовительных забоев принимается равным 0,6, а коэффициент спроса находится из выражения

$$k_c = 0,4 + 0,6 P_m / \Sigma P_{уст},$$

где  $P_m$  — максимальная мощность электродвигателя, установленного на участке, кВт.

Для рассматриваемой системы электроснабжения

$$k_c = 0,4 + 0,6 \cdot 115/248 = 0,68, \quad S_{тр} = 0,68 \cdot 248/0,6 \approx 281 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

К установке принимаем передвижную трансформаторную подстанцию ТСПВП-400/6-КП ( $R_T = 0,011 \text{ Ом}$ ,  $x_T = \omega L_T = 0,403 \text{ Ом}$ ,  $U_m = 565 \text{ В}$ ).

Сечение фидерного кабеля, проложенного от участковой передвижной трансформаторной подстанции до распределительного пункта ( $l_k = 750 \text{ м}$ ), выбираем из условия

$$I_k \geq I_\phi,$$

где  $I_k$  — длительно допустимый по условиям нагрева ток кабеля соответствующего сечения, А;  $I_\phi$  — фактический ток нагрузки фидерного кабеля А:

$$I_\phi = k_c \sum P_{уст} \cdot 10^3 / \sqrt{3} U_k \cos \varphi).$$

В рассматриваемой системе электроснабжения

$$I_\phi = 0,68 \cdot 248 \cdot 10^3 / (1,73 \cdot 660 \cdot 0,6) = 246 \text{ А}.$$

К установке принимаем кабель на длительно допустимый ток 255 А марки ГВШОП  $6 \times 50 + 1 \times 10 + 5 \times 1,5$  ( $R_{кф} = 0,159 \text{ Ом}$ ,  $x_{кф} = 0,0585 \text{ Ом}$ ).

Проверив по условию нагрева сечения остальных кабелей, к установке принимаем:

кабель ( $l_k = 250 \text{ м}$ ), питающий электродвигатель конвейероструга, марки ГВШОП  $6 \times 25 + 1 \times 10 + 5 \times 1,5$  ( $R_{кг} = 0,106 \text{ Ом}$ ,  $x_{кг} = 0,021 \text{ Ом}$ );

кабели ( $l_k = 100 \text{ м}$ ), питающие электродвигатели маслостанций, лебедок и т. д., марки ГВШОП  $6 \times 6 + 1 \times 6 + 5 \times 1,5$  ( $R'_{кг} = 0,154 \text{ Ом}$ ,  $x'_{кг} = 0,009 \text{ Ом}$ ).

Выбранные параметры элементов системы электроснабжения должны обеспечивать в пусковом (заторможенном) режиме электродвигателя наибольшей мощности напряжение на его зажимах не менее  $0,8 U_n$  [38]. При этом расчет величины напряжения (В) на зажимах заторможенного электродвигателя наибольшей мощности производится по общепринятой формуле [36, 38]

$$U_{дв. п} = \frac{1,05 U_n - \Delta U}{1 + \sqrt{3} \frac{I_n}{U_n} (\Sigma R_n \cos \varphi_n + \Sigma X_n \sin \varphi_n)}, \quad (2.63)$$

где

$\Delta U = (0,85/U_n) \Sigma \Delta P (R_T + R_{кф} + X_T + X_{кф}) \cdot 10^3$ ;  $\Sigma \Delta P$  — суммарная мощность электродвигателей, работающих в номинальном режиме, кВт;  $I_n$  — пусковой ток электродвигателя наибольшей мощности при номинальном напряжении на его зажимах, А;  $\cos \varphi_n$  — коэффициент мощности электродвигателя наибольшей

мощности в пусковом режиме;  $\Sigma R_{\Pi} = R_{\tau} + R_{\kappa\phi} + R_{\kappa\Gamma}$ ;  $\Sigma X_{\Pi} = X_{\tau} + X_{\kappa\phi} + X_{\kappa}$ ;  $U_{\Pi}$  — номинальное линейное напряжение сети, В.

Для выбранных параметров системы электроснабжения согласно формуле (2.63) имеем

$$U_{\text{дв. п}} = \frac{1,05 \cdot 660 - (0,85/660) \cdot 133 \cdot 0,2688 \cdot 10^3}{1 + (1,73 \cdot 620/660) (0,276 \cdot 0,42 + 0,1198 \cdot 0,908)} = 474 \text{ В,}$$

что составляет  $0,72 U_{\Pi}$  и ниже требуемого по условию [38].

Далее напряжение на зажимах заторможенного электродвигателя может быть определено при помощи полученной нами формулы (2.50), согласно которой амплитуда фазного напряжения на зажимах электродвигателя

$$U_{\text{т. дв. п}} = (565e^{j\psi} \cdot 2,38e^{j32^\circ} \cdot 0,613e^{j55^\circ}) / (0,1975e^{j30^\circ} \cdot 2,38e^{j32^\circ} + 0,1975e^{j30^\circ} \cdot 0,72e^{j59^\circ} + 2,38e^{j32^\circ} \cdot 0,72e^{j59^\circ}) = 365e^{j(\psi+12^\circ)} \text{ В.}$$

Сравнивая с предыдущим, можно отметить, что расчет величины напряжения на зажимах заторможенного электродвигателя при помощи формулы (2.63) дает завышенное значение (в нашем случае в 1,07 раза). В разделе 2.3.2 определено время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности при однофазной утечке на землю через сопротивление экрана кабеля для  $U_d^{(1)} = 0,63 U_{\Pi}$  ( $t_{\text{з.у}} = 2,2 \cdot 10^{-3}$  с, см. рис. 2.26, кривая I). В рассматриваемом примере  $U_d^{(1)} = 0,675 U_{\Pi}$ , т. е. выбранные сечения кабелей обеспечивают требуемое быстродействие фильтра напряжения нулевой последовательности (чем выше величина напряжения на зажимах электродвигателя, тем меньше время срабатывания).

Проведем проверку выбранных сечений кабелей по условию обеспечения требуемого быстродействия при двух и трехфазных коротких замыканиях в экранированном кабеле. В случае двухфазного короткого замыкания вблизи заторможенного электродвигателя скорость изменения фазных токов согласно соотношениям (2.53), (2.54) и  $t = 0$  равна

$$\frac{di_B^{(2)}}{dt}(0) = -\frac{\sqrt{3} U_m}{2L} \cos \psi - p \frac{U_m}{2Z_{\Phi}} (\sqrt{3} - \operatorname{tg} \varphi) \cos (\psi - \varphi_{\Phi}),$$

$$\frac{di_C^{(2)}}{dt}(0) = \frac{\sqrt{3} U_m}{2L} \cos \psi + p \frac{U_m}{2Z_{\Phi}} (\sqrt{3} + \operatorname{tg} \varphi) \cos (\psi - \varphi_{\Phi}),$$

где  $L = (x_{\tau} + x_{\kappa\phi} + x_{\kappa\Gamma})/\omega$ .

Напряжение, выделяемое на резисторе нагрузки  $R_{\text{нз}}$  (см. рис. 2.21), равно суммарной ЭДС двух вторичных обмоток, соединенных последовательно и согласно, т. е. можно считать, что указанное напряжение пропорционально суммарной скорости измене-

ния тока

$$\begin{aligned}\frac{di_{\text{КС}}^{(2)}}{dt}(0) &= \frac{di_B^{(2)}}{dt}(0) + \left[ -\frac{di_C^{(2)}}{dt}(0) \right] = \\ &= -\left[ \frac{\sqrt{3} U_m}{L} \cos \psi + p \frac{\sqrt{3} U_m}{Z_\phi} \cos(\psi - \varphi_\phi) \right].\end{aligned}$$

Для рассматриваемой системы электроснабжения

$$\frac{di_{\text{КС}}^{(2)}}{dt}(0) = -2,21 \cdot 10^6 \sin(\psi - 73^\circ) \text{ А/с},$$

а с учетом снижения величины скорости изменения тока за время формирования импульса трансформаторами тока ( $t = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ) имеем

$$\left. \frac{di_{\text{КС}}^{(2)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = \frac{di_{\text{КС}}^{(2)}}{dt}(0) e^{p \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}} = -1,92 \cdot 10^6 \sin(\psi - 73^\circ) \text{ А/с}.$$

Величина потенциала точки сети в месте образования двухфазного короткого замыкания и возникновения тока утечки на землю  $u_d^{(2)}$  равна мнимой части от комплексной величины

$$u_d^{(2)} = M \text{ч} [0,5 U_{\text{дв. п}} e^{j180^\circ}] = 182,5 \sin(\omega t + \psi - 168,1^\circ) \text{ В}.$$

Величину уставки по току максимальной токовой защиты, реагирующей на скорость изменения тока, определяем при помощи выражений (2.59)

$$\begin{aligned}I_Y^{(2)} &= 1,5 \frac{U_{\text{дв. п}}}{\sqrt{2} Z_{\text{дв. п}}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \Sigma \Delta I = 1,5 \frac{365}{\sqrt{2} \cdot 0,613} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 159,1 = \\ &= 773 \text{ А}.\end{aligned}$$

и по шкале уставок принимаем ее равной 800 А.

Согласно уравнению (2.60) величина уставки максимальной токовой защиты по скорости изменения тока

$$\left[ \frac{di}{dt} \right]_Y^{(2)} = 0,355 \cdot 10^6 \text{ А/с}.$$

При помощи полученных соотношений строим кривые зависимости  $\left. \frac{di_{\text{КС}}^{(2)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = f(\psi)$ ,  $u_d^{(2)}(0) = f(\psi)$  и на график наносим

прямую, ордината которой равна  $2 \left[ \frac{di}{dt} \right]_Y^{(2)} = 0,71 \cdot 10^6 \text{ А/с}$  (рис. 2.29). Из рис. 2.29 видно, что в интервалах значений угла  $51^\circ \leq \psi \leq 96^\circ$ ,  $231^\circ \leq \psi \leq 276^\circ$  величина суммарной скорости изменения тока двухфазного короткого замыкания меньше удвоенного значения величины уставки, и должен срабатывать фильтр напряжения нулевой последовательности. Графоаналитическое исследование выражения (2.25) для  $u_d^{(2)} = 182,5 \sin(\omega t + \psi - 168,1^\circ)$  В показывает, что максимальное время срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности ( $C_\phi =$

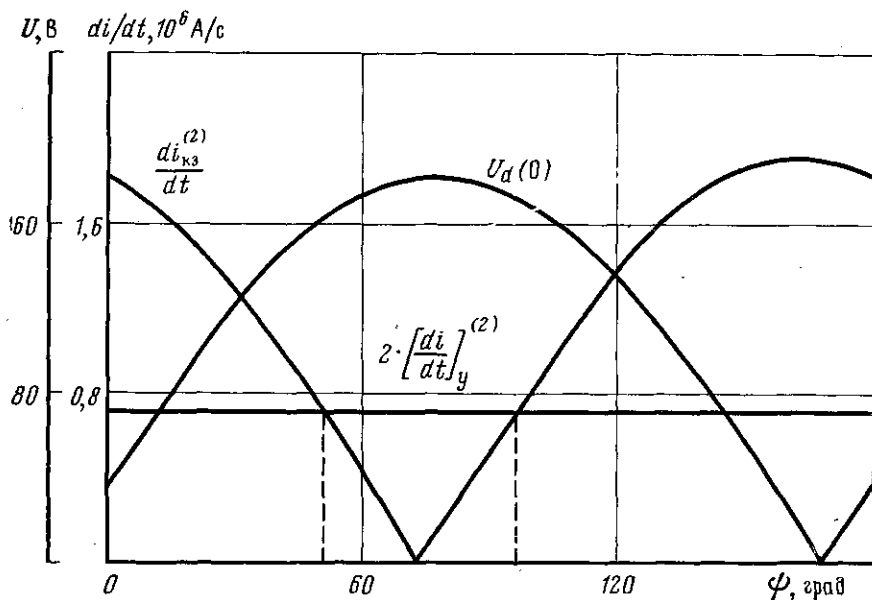


Рис. 2.29. Зависимости скорости тока двухфазного короткого замыкания и потенциала точки в месте возникновения тока утечки на землю от угла начальной фазы

$= 0,25 \cdot 10^{-6} \Phi$ ,  $R_n = 5,1 \text{ кОм}$ ,  $R_a = 0,1 \text{ кОм}$ ), равное  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , имеет место при  $\psi = 51^\circ$  (см. рис. 2.26, кривая 2).

Максимальная токовая защита срабатывает за время не более  $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , если суммарная скорость изменения тока двухфазного короткого замыкания равна или превышает удвоенное значение величины уставки. Поэтому можно считать, что в рассматриваемых условиях время срабатывания комбинированного защитного устройства определяется временем срабатывания фильтра напряжения нулевой последовательности. В шахтных участковых сетях возможен случай, когда величина тока двухфазного короткого замыкания, определенная в наиболее удаленной от силового трансформатора точке сети, меньше уставки максимальной токовой защиты фидерного автоматического выключателя. При этом в обычной системе электроснабжения защита от токов короткого замыкания осуществляется при помощи максимальной токовой защиты магнитного пускателя. В системе электроснабжения участка, разрабатывающего выбросоопасный пласт, указанный способ отключения сети недопустим, так как полное время срабатывания магнитного пускателя в десятки раз превышает время развязки аварии.

Из условия обеспечения требуемого быстродействия определим допустимую длину гибкого кабеля  $l'_k$ , питающего электродвигатель минимальной мощности. С этой целью задаемся сопротивлением фазы кабеля, проложенного от участкового распределительного пункта до электродвигателя мощностью 4 кВт, и

с учетом формул (2.56) — (2.58) рассчитываем скорость изменения тока двухфазного короткого замыкания и величину потенциала точки сети в месте возникновения утечки на землю через сопротивление экрана кабеля.

Для  $l'_K = 500$  м ( $R'_{K\Gamma} = 0,77$  Ом) при прочих постоянных параметрах рассматриваемой системы электроснабжения имеем

$$\left. \frac{di_{K\Gamma}^{(2)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = -1,16 \cdot 10^6 \sin(\psi - 59,4^\circ) \text{ А/с},$$

$$U_d^{(2)} = 212 \sin(\omega t + \psi - 205^\circ) \text{ В}.$$

При этом согласно расчетам время срабатывания комбинированного защитного устройства не превышает  $1,8 \cdot 10^{-3}$  с и удовлетворяет условию быстродействия. Далее согласно выражениям (2.56), (2.57) установившееся значение тока двухфазного короткого замыкания

$$i_{K\Gamma}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_m \sqrt{(R_2 + R_3)^2 + \omega^2 L_2^2}}{N} \cos(\omega t + \psi + \alpha - \gamma_3) = \\ = 696 \cos(\omega t + \psi + 3,6^\circ) \text{ А}$$

и величина отношения  $I_{K\Gamma}^{(2)}/I_y = 696/(\sqrt{2} \cdot 800) = 0,616$ . В режиме холостого хода сети и при  $l'_K = 500$  м указанные величины равны

$$I_{K\Gamma(x\Gamma)}^{(2)}/I_y = 0,456; \quad \left. \frac{di_{K\Gamma(x\Gamma)}^{(2)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 1,41 \cdot 10^6 \times \\ \times \sin(\psi - 90^\circ) \text{ А/с}; \quad U_d^{(2)} = 282,5 \sin(\psi - 180^\circ) \text{ В},$$

а время срабатывания комбинированного защитного устройства не превышает  $0,3 \cdot 10^{-3}$  с.

Величина отношения  $I_{K\Gamma, x\Gamma}^{(2)}/I_y = 0,6$  может быть принята за критерий оценки параметров кабельной сети, питающей электродвигатель наименьшей мощности.

Проверка кабельной сети участка по условию обеспечения требуемого быстродействия при трехфазных коротких замыканиях производится при помощи формул (2.61), (2.62).

В случае трехфазного короткого замыкания на зажимах ваторможенного электродвигателя

$$\frac{di_A^{(3)}}{dt}(0) = \frac{U_m}{L} \sin \psi + p \frac{U_m}{Z_\Phi} \sin(\psi - \varphi_\Phi),$$

$$\frac{di_{B,C}^{(3)}}{dt}(0) = \frac{U_m}{L} \sin(\psi \mp 120^\circ) + p \frac{U_m}{Z_\Phi} \sin(\psi \mp 120^\circ - \varphi_\Phi)$$

и для параметров рассматриваемой системы электроснабжения имеем

$$\left. \frac{di_A^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 1,07 \cdot 10^6 \sin(\psi + 17,4^\circ) \text{ А/с},$$

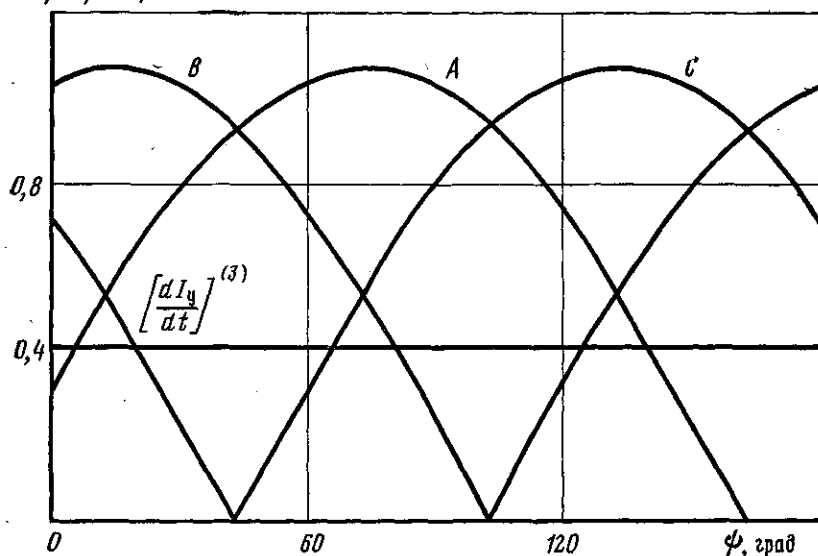
$di/dt, 10^6 \text{ A/c}$ 


Рис. 2.30. Зависимость скорости тока трехфазного короткого замыкания от угла начальной фазы

$$\left. \frac{di_B^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}} = 1,07 \cdot 10^6 \sin(\psi - 102,6^\circ) \text{ A/c},$$

$$\left. \frac{di_C^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}} = 1,07 \cdot 10^6 \sin(\psi + 137,4^\circ) \text{ A/c}.$$

При этом уставку максимальной токовой защиты по скорости изменения тока

$$\left[ \frac{di}{dt} \right]_y^{(3)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \frac{di}{dt} \right]_y^{(2)} = 0,41 \cdot 10^6 \text{ A/c}.$$

Построив кривые изменения  $\left. \frac{di_A^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}}$ ,  $\left. \frac{di_B^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}}$ ,

$\left. \frac{di_C^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}} = f(\psi)$  и нанеся на график прямую, ордината которой равна  $0,41 \cdot 10^6 \text{ A/c}$  (рис. 2.30), видим, что для любых значений угла  $\psi$  скорость изменения тока короткого замыкания в 2,15 раза превышает уставку, т. е. защитное устройство срабатывает за время не более  $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ .

В случае трехфазного короткого замыкания на зажимах электродвигателя, работающего в номинальном режиме, и заторможенном электродвигателе конвейероструга для  $I_{\text{кг}} = 500 \text{ м}$



( $R'_{\text{кг}} = 0,77 \text{ Ом}$ ,  $X'_{\text{кг}} = 0,045 \text{ Ом}$ ) имеем

$$\left. \frac{di_A^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 0,55 \cdot 10^6 \sin(\psi + 25,7^\circ) \text{ А/с},$$

$$\left. \frac{di_B^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 0,55 \cdot 10^6 \sin(\psi - 94,3^\circ) \text{ А/с},$$

$$\left. \frac{di_C^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 0,55 \cdot 10^6 \sin(\psi + 145,7^\circ) \text{ А/с}.$$

При этом минимальная величина скорости изменения тока трехфазного короткого замыкания  $\left. \frac{di_{\text{кз}}^{(3)}}{dt} \right|_{t=0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 0,55 \cdot 10^6 \text{ А/с}$  в 1,15 раза превышает уставку и  $t_{\text{в.у}} \leq 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

Таким образом, проведенный расчет кабельной сети участка показывает, что требуемое быстродействие защитных устройств выполняется, если выбранные сечения кабелей обеспечивают на зажимах заторможенного электродвигателя наибольшей мощности величину напряжения, равную  $0,7U_{\text{н}}$ , а величина отношения действующего значения установившегося тока двухфазного короткого замыкания, определенного в режиме холостого хода сети для наиболее удаленной от силового трансформатора точки сети, к току уставки максимальной защиты — не менее 0,5. Следует отметить, что указанные требования к выбору сечения кабелей участковой сети не превышают существующие, так как, согласно [38], величина напряжения на зажимах электродвигателя при его пуске должна быть не менее  $0,8U_{\text{н}}$ .

# ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕЕ СОЗДАНИЮ

## 3.1. ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ В ШАХТНЫХ УЧАСТКОВЫХ СЕТЯХ

Электрооборудование и кабели подземных электроустановок угольных шахт в условиях эксплуатации подвергаются значительным механическим воздействиям, способным вызвать нарушения их безопасных свойств. Согласно [39, 40], 36% экзогенных подземных пожаров и 35% взрывов метано-воздушной смеси происходит из-за коротких замыканий в кабелях при их механических повреждениях. Приведенные данные свидетельствуют также о том, что существующая рудничная коммутационная и защитная аппаратура не обеспечивает полную безопасность применения электрической энергии в угольных шахтах. Нерешенностью проблемы безопасного электроснабжения объясняется и применение пневматической энергии на крутых пластах, опасных по внезапным выбросам угля и газа.

В настоящее время исследованиями ИГД им. А. А. Скочинского и ВостНИИ установлено, что безопасная система электроснабжения может быть создана на основе быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры. Опыт эксплуатации быстродействующей аппаратуры позволил внести изменения и дополнения к параграфу 389 действующих «Правил безопасности в угольных и сланцевых шахтах», согласно которым в очистных и подготовительных выработках крутых пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа, а также в выработках с исходящей струей воздуха с таких пластов разрешено применение электрооборудования в исполнении РВ с автоматическим защитным отключением напряжения и закорачиванием ЭДС электродвигателей за время не более  $2,5 \cdot 10^{-3}$  с при повреждении оболочки силовых кабелей, вызывающем замыкание силовых жил между собой и на землю или одной силовой жилы на землю.

Безопасные системы электроснабжения с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой позволят отказаться от применения экономически невыгодной пневматической энергии в угольных шахтах и при этом резко повысить производительность очистных и проходческих машин, снизить себестоимость добыча-

емого угля за счет уменьшения расхода электроэнергии и отказа от сооружения дорогостоящих, громоздких, недостаточно надежных и трудоемких в обслуживании пневматических сетей. Кроме того, применение быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры обеспечит термическую и динамическую стойкость рудничных магнитных пускателей и кабелей. Термическая и динамическая стойкость характеризует надежность работы пусковой аппаратуры и кабелей при коротких замыканиях в электрических сетях.

Наименьшей термической и динамической стойкостью к сквозным токам короткого замыкания обладает рудничный магнитный пускатель ПВИ-25, действующее значение тока 0,2-секундной термической стойкости  $I_{0,2т}$  которого равно  $3,2 \cdot 10^3 \text{ А}$ , а амплитуда тока электродинамической стойкости  $I_d = 2,7 \cdot 10^3 \text{ А}$  [28].

Согласно [41], термическая стойкость рудничных магнитных пускателей обеспечивается, если соблюдается неравенство

$$I_{0,2т}^2 \cdot 0,2 \geq (I_{кз}^{(3)})^2 t_{кз},$$

где  $I_{кз}^{(3)}$  — действующее значение сквозного тока трехфазного короткого замыкания, А;  $t_{кз}$  — время действия тока короткого замыкания, с.

При этом допустимая величина действующего значения (А) сквозного тока трехфазного короткого замыкания может быть определена из выражения

$$I_{кз. доп}^{(3)} \leq I_{0,2т} \sqrt{0,2/t_{отк}}, \quad (3.1)$$

где  $t_{отк}$  — полное время защитного отключения сети при трехфазном коротком замыкании, с.

Полное время защитного отключения сети  $t_{отк}$  посредством быстродействующей аппаратуры при трехфазных коротких замыканиях не превышает  $0,3 \cdot 10^{-3}$  с, и допустимая величина действующего значения тока трехфазного короткого замыкания для магнитного пускателя ПВИ-25 согласно формуле (3.1) равна  $95,5 \cdot 10^3 \text{ А}$ . В шахтных участковых сетях, содержащих передвижную трансформаторную подстанцию наибольшей мощности ( $S = 630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ), величина действующего значения установившегося тока трехфазного короткого замыкания  $I_{кз}^{(3)}$  не превышает  $15 \cdot 10^3 \text{ А}$ , т. е.  $I_{кз}^{(3)} \ll I_{кз. доп}^{(3)}$ , и при применении быстродействующей аппаратуры в любой точке участковой сети будет обеспечиваться термическая стойкость рудничного магнитного пускателя ПВИ-25.

Динамическая стойкость магнитного пускателя имеет место, если соблюдается неравенство

$$I_d > I_m^{(3)},$$

где  $I_m^{(3)}$  — амплитуда сквозного тока трехфазного короткого замыкания, А.

Максимально возможная величина амплитуды сквозного тока трехфазного короткого замыкания при  $t_{отк} < 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  может быть

найдена по формуле [11]

$$I_m^{(3)} = \frac{U_m}{Z_T} [\sin(\omega t_{\text{отк}} + \psi_m - \varphi) - e^{-t_{\text{отк}}/\tau} \sin(\psi_m - \varphi)], \quad (3.2)$$

где

$$\tau = L_T/R_T; \quad \varphi = \arctg(\omega L_T/R_T); \quad \psi_m = \varphi + \arctg[(\cos \omega t_{\text{отк}} - e^{-t_{\text{отк}}/\tau})/\sin \omega t_{\text{отк}}].$$

Для параметров силового трансформатора шахтной передвижной подстанции ТСШВП-630 ( $U_m = 565$  В,  $\omega L_T = 0,026$  Ом,  $R_T = 0,0056$  Ом,  $Z_T = 0,0266$  Ом) и  $t_{\text{отк}} = 0,3 \cdot 10^{-3}$  с согласно формуле (3.2) имеем  $I_m^{(3)} = 2,02 \cdot 10^3$  А, т. е.  $I_m^{(3)} < T_d$ , и в любой точке сети обеспечивается динамическая стойкость рудничного магнитного пускателя ПВИ-25.

Для сравнения определим величину допустимого действующего значения и амплитуду сквозного тока трехфазного короткого замыкания при защите сети серийным рудничным автоматическим выключателем типа АВ. По данным [28], полное время отключения сети автоматическим выключателем АВ-320 ДО составляет не менее  $15 \cdot 10^{-3}$  с. С учетом соотношения (3.1) для рудничного магнитного пускателя ПВИ-25 имеем  $I_{\text{кз. доп}}^{(3)} = 14,7 \cdot 10^3$  А и можно считать, что в любой точке шахтной участковой сети обеспечивается термическая стойкость рудничных магнитных пускателей.

Максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания (ударный ток), как известно, наступает приблизительно через половину периода ( $10 \cdot 10^{-3}$  с) с момента возникновения короткого замыкания и имеет вид

$$i_{\text{уд}} = I_m^{(3)} (1 + e^{-0,01/\tau}).$$

$$i_{\text{уд}} = \frac{565}{0,0266} (1 + e^{-\frac{0,01 \cdot 314 \cdot 0,0056}{0,026}}) = 32 \cdot 10^3 \text{ А}$$

и значительно превышает динамическую стойкость рудничных магнитных пускателей (динамическая стойкость магнитного пускателя ПВИ-320 равна  $10 \cdot 10^3$  А), т. е. серийная защитная аппаратура не обеспечивает динамическую стойкость пусковой аппаратуры, установленной в непосредственной близости от силового трансформатора.

Правила устройства электроустановок [42] требуют осуществлять проверку выбранных сечений кабелей по условиям их термической стойкости к токам короткого замыкания. Согласно [43, 44], предельная допустимая плотность тока по условиям обеспечения стойкости кабелей к токам короткого замыкания равна для бронированных кабелей  $J_{\text{доп}} = 136/\sqrt{t_{\text{кз}}} \text{ А/мм}^2$ ; для гибких кабелей  $J_{\text{доп}} = 107/\sqrt{t_{\text{кз}}} \text{ А/мм}^2$ .

При  $t_{\text{отк}} = 0,3 \cdot 10^{-3}$  с допустимая плотность тока гибкого кабеля  $J_{\text{доп}} = 61,85 \cdot 10^3 \text{ А/мм}^2$ , а максимально возможная плотность тока в гибком кабеле с сечением рабочих жил  $4 \text{ мм}^2$  в случае

трехфазного короткого замыкания в сети, содержащей силовой трансформатор мощностью 630 кВ·А, равна  $3,75 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>, т. е. в любой точке сети обеспечивается термическая стойкость кабеля.

Таким образом, применение быстродействующей коммутационной аппаратуры позволит обеспечить безопасное электроснабжение подземных электроустановок, отказаться от экономически невыгодной пневматической энергии и существенно улучшить условия эксплуатации рудничной пусковой аппаратуры и кабелей.

### 3.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Практика разработки быстродействующей коммутационной аппаратуры типа АБВ-380 и АБВ-250У5 показывает, что ее создание связано с освоением производства относительно сложного в конструктивном отношении электромеханического коммутатора, выполняющего функции выключателя и короткозамыкателя.

Широкое внедрение высокопроизводительной угледобывающей техники вызывает непрерывное повышение мощности участковых трансформаторных подстанций и, следовательно, увеличение номинального тока и коммутационной способности (предельной отключаемой способности). Последнее еще более усложнит конструкцию электромеханического коммутатора, и при создании новых образцов быстродействующих автоматических выключателей на ток свыше 250 А следует ориентироваться на применение серийной установочной аппаратуры.

К настоящему времени промышленность освоила серийный выпуск установочных выключателей типа АЗ700 [45], широко используемых в рудничной коммутационной аппаратуре [29]. Основным преимуществом выключателя АЗ700 является его высокая коммутационная способность при относительно небольших габаритах. Однако время срабатывания составляет около  $15 \cdot 10^{-3}$  с и для обеспечения условий безопасности во взрывоопасных средах необходима его совместная работа с головным полупроводниковым короткозамыкателем. При этом следует учитывать ограниченную перегрузочную способность силовых полупроводниковых приборов и возможность возникновения взрыва метано-воздушной смеси из-за падения напряжения на полупроводниковых приборах короткозамыкателя. Согласно исследованиям ВостНИИ [4], при токах свыше  $1 \cdot 10^3$  А, протекающих через полупроводниковые приборы короткозамыкателя, требуется дополнительная установка электромеханического (контактного) короткозамыкателя с собственным временем срабатывания не более  $3,0 \cdot 10^{-3}$  с. Вопросы разработки электромеханических короткозамыкателей достаточно изучены и изложены в литературе [2, 46].

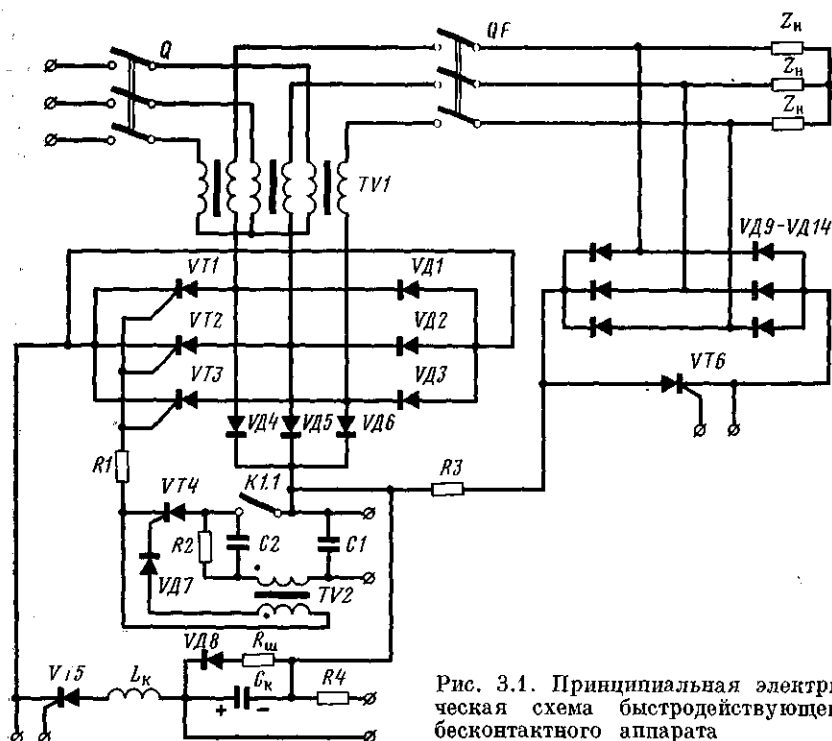


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема быстродействующего бесконтактного аппарата

Далее выпускаемые серийно силовые полупроводниковые приборы [12] позволяют создать на их основе качественно новые образцы электрооборудования, в том числе и быстродействующие бесконтактные выключатели.

Повышение требований к надежности и быстродействию контактной аппаратуры, а также значительное снижение стоимости силовых тиристоров и диодов расширили области применения полупроводниковых коммутационных аппаратов как в СССР [47], так и за рубежом [48]. Если учесть, что питание токоприемников очистных и подготовительных забоев угольных шахт, как правило, осуществляется от передвижных трансформаторных подстанций, а также опыт разработки быстродействующей бесконтактной аппаратуры на напряжение 127 В, то можно рекомендовать создание быстродействующей бесконтактной коммутационной аппаратуры, встраиваемой в распределительные устройства низкого напряжения рудничных трансформаторных подстанций.

На основе анализа существующих схем бесконтактной коммутационной аппаратуры, в том числе и показанных на рис. 1.11 и 1.12, нами разработана принципиальная электрическая схема быстродействующего бесконтактного аппарата для безопасных систем электроснабжения напряжением 660 В (рис. 3.1).

Из рис. 3.1 видно, что аппарат содержит быстродействующий бесконтактный выключатель, подключенный к входным зажимам силового трансформатора  $TV1$ , и головной полупроводниковый короткозамыкатель, подключенный к выходным зажимам указанных обмоток. Бесконтактный выключатель состоит из закороченного трехфазного двухполупериодного моста, анодная группа которого составлена из тиристов  $VT1-VT3$ , а катодная — из диодов  $VD1-VD3$ , устройства оперативного управления ( $R1 - R3, C1, C2, VD4-VD7, VT4, TV2, K1.1$ ) и устройства принудительной коммутации ( $C_K, L_K, VT5, VD8, R_{ш}, R4$ ).

Полупроводниковый короткозамыкатель состоит из трехфазного двухполупериодного моста  $VD9-VD14$ , на выходе которого в проводящем направлении включен тиристор  $VT6$ . Электрическая схема рассматриваемого аппарата аналогична схемам, показанным на рис. 1.11 и 1.12. Однако в отличие от рис. 1.12 выход трехфазного моста закорочен, что позволяет отказаться от наиболее нагруженного рабочим током тиристора ( $VT4$  на рис. 1.12). Далее рассматриваемая схема отличается от рис. 1.11 тем, что в ней использован быстродействующий бесконтактный выключатель с принудительным запирающим тиристов  $VT1-VT3$ . Последнее позволяет за время не более  $2,0 \cdot 10^{-3}$  с отключить ток трехфазного короткого замыкания, возникающий при срабатывании головного полупроводникового короткозамыкателя, т. е. отказаться от применения дополнительного контактного короткозамыкателя.

Оперативное включение аппарата осуществляется путем замыкания контакта  $K1.1$  реле цепи дистанционного управления бесконтактным выключателем. В результате чего конденсатор  $C2$  разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора  $TV2$ , открывается вспомогательный тиристор  $VT4$ , и в цепи управляющих электродов тиристов  $VT1-VT3$  через диоды  $VD4-VD6$  и резистор  $R1$  протекают импульсы тока управления. При этом тиристор  $VT4$  остается в открытом состоянии за счет тока удержания, протекающего от анодной группы моста  $VD9-VD14$  через резисторы  $R3, R1$ , контакт  $K1.1$  в катодную группу моста  $VT1-VT3-VD1-VD3$ .

Оперативное отключение аппарата осуществляется путем разрыва цепи управления тиристов  $VT1-VT3$  контактом  $K1.1$ . В результате этого происходит запирающее указанных тиристов, и ток нагрузки прерывается. Время от момента размыкания контакта  $K1.1$  до отключения тока не превышает  $11,7 \cdot 10^{-3}$  с (подробно этот процесс описан в разделе 1.3). Аварийное (защитное) отключение сети осуществляется подачей устройством быстродействующей защиты сигналов в цепи управляющих электродов тиристов  $VT5, VT6$ . При этом головной полупроводниковый короткозамыкатель закорачивает выходные зажимы вторичных обмоток силового трансформатора, а бесконтактный выключатель разрывает фазные токи короткого замыкания. Время энергетической изоляции места повреждения кабеля со стороны силового

трансформатора (источника питания) равно времени включения тиристора  $VT4$ , а время действия токов трехфазного короткого замыкания, возникающих при срабатывании головного полупроводникового короткозамыкателя, определяется временем переходного процесса, возникающего в контуре коммутации при включении тиристора  $VT5$ .

Рассмотрим на конкретном примере выбор силовых полупроводниковых приборов и элементов цепи принудительной коммутации тиристоров для схемы, показанной на рис. 3.1. Среднее за период значений тока  $I_{\Pi}$ , протекающего через каждый силовой полупроводниковый прибор моста  $VD1-VD3-VT1-VT3$ , равно  $0,45 I_{\phi}$ , где  $I_{\phi}$  — действующее значение фазного тока нагрузки, А. Согласно [12], под предельным током полупроводникового прибора  $I_{\Pi}$  понимается среднее за период значение тока, длительно протекающего через прибор, и определяется выражением

$$I_{\Pi} = (1/2k_{\phi}R_{\text{д}}) [\sqrt{U_0^2 + 4k_{\phi}^2R_{\text{д}}(\theta_{\text{рп}} - \theta_{\text{с}})/R_{\text{т}} - U_0}],$$

где  $U_0$ ,  $R_{\text{д}}$  — пороговое напряжение (В) и динамическое сопротивление (Ом) предельной прямой вольт-амперной характеристики прибора;  $k_{\phi}$  — коэффициент формы кривой тока;  $\theta_{\text{рп}}$  — максимально допустимая температура полупроводниковой структуры, °С;  $\theta_{\text{с}}$  — температура окружающей среды, °С;  $R_{\text{т}}$  — общее установившееся тепловое сопротивление, °С/Вт. Тепловое сопротивление  $R_{\text{т}}$  меняется в зависимости от типа охладителя и интенсивности охлаждения. Имея зависимость  $R_{\text{т}}$  от интенсивности охлаждения для охладителя определенного типа, можно рассчитать зависимость максимально допустимого тока прибора (номинального тока выключателя) от интенсивности охлаждения.

На рис. 3.2 показана кривая зависимости номинального тока выключателя  $I_{\text{н}}$  ( $I_{\text{н}} = I_{\Pi}/0,45$ ) от температуры окружающей среды, построенная для тиристоров типа  $T500$  и диодов  $B500$  с типовыми охладителями без обдува. Из кривой видно, если температура воздуха внутри взрывонепроницаемой оболочки рудничной подстанции не превышает 60° С, то номинальный ток выключателя может быть принят равным 350 А. Следует отметить, что при применении интенсивных способов охлаждения (обдув, тепловые трубки и т. д.) возможно создание бесконтактной аппаратуры на токи свыше 400 А.

Выбор класса полупроводниковых приборов по величине повторяющегося напряжения и параметров элементов цепи принудительного запираания тиристоров проведем на основе расчета переходного процесса аварийного (защитного) отключения сети. Исследования показывают, что переходный процесс, возникающий в контуре коммутации при включении тиристора  $VT5$ , аналогичен переходному процессу, рассмотренному ранее для схемы, показанной на рис. 1.12.

Максимальную величину отключаемого тока  $I(0)$  определим для наиболее тяжелого, но маловероятного случая — двухфазного, не связанного с землей короткого замыкания на выходных



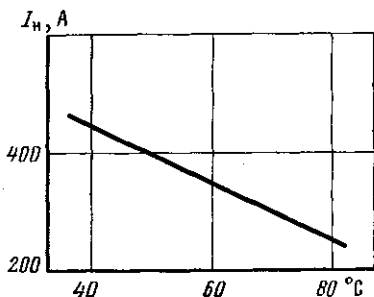


Рис. 3.2. Зависимость номинального тока бесконтактного выключателя от температуры окружающей среды

зажимах силового трансформатора. Этот случай возможен при пробое изоляции между выходными зажимами вторичных обмоток или пробое диода головного полупроводникового короткозамыкателя.

Для рудничной трансформаторной подстанции ТСШВП-400-КП мощностью 400 кВ·А ( $U_m = 565$  В,  $L_T = 0,1285 \cdot 10^{-3}$  Г,  $R_T = 0,011$  Ом), номинального тока выключателя  $I_n = 350$  А и времени срабатывания защитного устройства  $t_{з.у} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с по формуле (1.19) имеем  $I(0) = 2,4 \cdot 10^3$  А. С использованием в качестве тиристора VT5 быстродействующего динамического тиристора ТБ 320, для которого критическая скорость изменения тока  $di/dt = 100 \cdot 10^6$  А/с, величина повторяющегося напряжения  $U_n = 1200$  В, из выражения (1.10) определяем величину

$$L_K = U_C(0)/(di/dt) = 600/(100 \cdot 10^6) = 0,006 \cdot 10^{-3} \text{ Г.}$$

При этом минимальное значение емкости коммутирующего конденсатора

$$C_{K, \min} = L_K I^2(0)/U_C^2(0) = 96 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Для обеспечения надежного запираания тиристора типа Т500, время выключения которого  $t_b = 0,1 \cdot 10^{-3}$  с, принимаем  $C_K^* = 1,0 \cdot 10^{-3}$  Ф. Тогда согласно формуле (1.9) величина разрядного тока коммутирующего конденсатора

$$i_p = U_C(0) \sqrt{C_K/L_K} \sin \omega_0 t = 7,74 \cdot 10^3 \sin \omega_0 t \text{ А}$$

и  $U_C(t_1) = 570$  В, где  $t_1$  — момент времени, когда разрядный ток конденсатора достигает величины отключаемого. В интервале  $t_1 < t < t_2$ , где  $t_2$  — момент времени, когда напряжение на коммутирующем конденсаторе переходит через нуль, ток, протекающий через тиристор VT5, и напряжение на конденсаторе с учетом соотношений (1.15), (1.16) соответственно равны

$$\begin{aligned} i &= 3,95 \cdot 10^3 e^{-b_1 t} \sin(\omega_1 t + 37,4^\circ) \text{ А,} \\ u_C &= 0,847 \cdot 10^3 - 1,765 \cdot 10^3 e^{-b_1 t} \sin(\omega_1 t + 126,4^\circ) \text{ В,} \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $b_1 = 0,0825 \cdot 10^3$ ;  $\omega_1 = 2,235 \cdot 10^3$  1/с =  $2,235 \cdot 57,2^\circ \cdot 10^3$ .

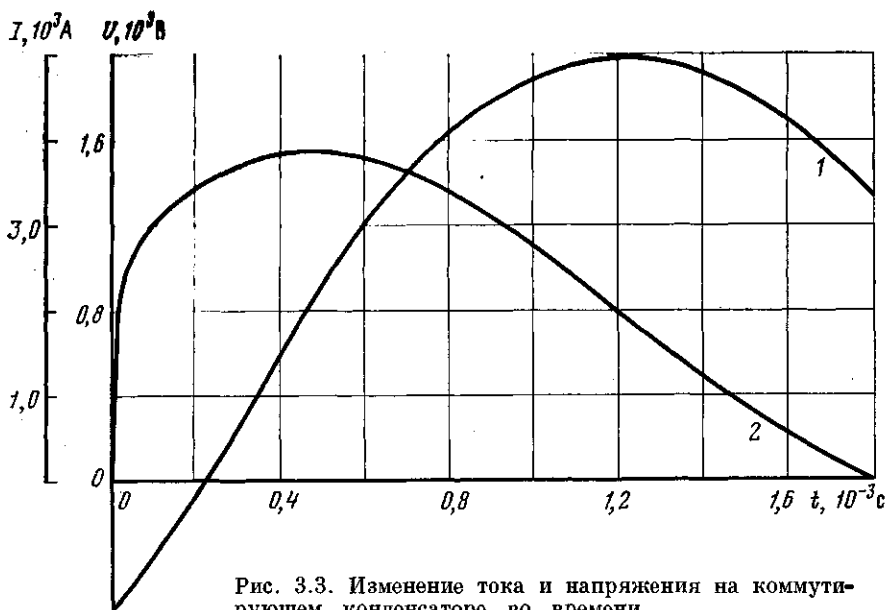


Рис. 3.3. Изменение тока и напряжения на коммутирующем конденсаторе во времени

Момент времени  $t_2$  по соотношению (3.3) равен  $0,19 \cdot 10^{-3}$  с и  $I(t_2) = 3,42 \cdot 10^3$  А. При этом на тиристоре  $VT1$  ( $VT2$ ,  $VT3$ ) в течение  $0,18 \cdot 10^{-3}$  с поддерживается обратное смещение, т.е. соблюдаются условия его запираения ( $t_b = 0,1 \cdot 10^{-3}$  с). С целью снижения в процессе перезаряда величины напряжения на коммутирующем конденсаторе последний зашунтирован цепочкой: резистор—диод.

Для  $R_{ш} = 1$  Ом в интервале  $t_0 < t \leq t_3$ , где  $t_3$  — момент времени перехода анодного тока тиристора  $VT5$  через нуль, согласно выражениям (1.24), (1.25) имеем

$$i = 3,57 \cdot 10^3 e^{-b_3 t} \sin(\omega_3 t + 43,7^\circ) + 0,955 \cdot 10^3 \text{ А},$$

$$u_c = 0,955 \cdot 10^3 - 1,795 \cdot 10^3 e^{-b_3 t} \sin(\omega_3 t + 147,6^\circ) \text{ В},$$

где  $b_3 = 0,5418 \cdot 10^3$ ;  $\omega_3 = 1,89 \cdot 10^3$  1/с.

При переходе анодного тока тиристора  $VT5$  через нуль последний запирается и ток короткого замыкания, возникающий при срабатывании головного полупроводникового короткозамыкателя прерывается.

Собственное время срабатывания бесконтактного выключателя равно  $t_{ка} = t_1 + t_2 + t_3$ . В рассматриваемом примере  $t_{ка} = (0,0244 + 0,19 + 1,58) \cdot 10^{-3} = 1,795 \cdot 10^{-3}$  с. На рис. 3.3 показаны кривые изменения по времени напряжения на коммутирующем конденсаторе (кривая 1) и тока, протекающего через тиристор  $VT5$ , и последовательно соединенные с ним в процессе отключения диоды  $VD1$ — $VD6$  (кривая 2). Согласно кривой 1 максималь-

ная величина напряжения на коммутирующем конденсаторе равна  $2 \cdot 10^3$  В. Это напряжение является повторяющимся  $U_n$  и приложено к каждому тиристоры  $VT1-VT3$  и диоду  $VD1-VD6$ .

Согласно [12], принимаем тиристоры  $VT1-VT3$  и диоды  $VD1-VD6$  20-го класса. Класс полупроводниковых приборов головного короткозамыкателя, как показано ранее (см. раздел 1.2), определяется величиной повторяющегося напряжения, возникающего при отключениях наиболее мощного электродвигателя. Для шахтных участковых сетей напряжением 660 В выбираем диоды  $VD9-VD14$  и тиристор  $VT6$  18-го класса. При помощи кривой 1 выбираем номинальное напряжение коммутирующего конденсатора (конденсатор типа К 75-27 на номинальное напряжение  $2 \cdot 10^3$  В).

Оценим перегрузочную способность полупроводниковых приборов моста  $VT1-VT3-VD1-VD6$  (тириستоров типа Т500 и диодов типа В500) и проведем выбор по току остальных полупроводниковых приборов. В течение  $0,5244 \cdot 10^{-3}$  с (от момента короткого замыкания в сети до начала принудительного записания тириستоров) через полупроводниковые приборы моста протекает ток перегрузки, максимальная величина которого равна  $2,4 \cdot 10^3$  А. Согласно [12], допустимая величина амплитуды ударного тока перегрузки для тиристора Т500 при  $t = 1 \cdot 10^{-3}$  с равна  $12 \cdot 10^3$  А, т. е. тиристоры типа Т500, установленные в схеме выключателя, выдержат перегрузку. Указанный ток перегрузки в течение дальнейшего времени продолжает протекать через диоды  $D1-D3$ . При этом согласно кривой 2 (см. рис. 3.3) его амплитуда увеличивается до  $3,9 \cdot 10^3$  А, а время действия тока равно  $1,795 \cdot 10^{-3}$  с. Допустимая величина амплитуды ударного тока для диода В500 при  $t = 2 \cdot 10^{-3}$  с равна  $13,5 \cdot 10^3$  А, т. е. диоды также выдержат перегрузку.

По величине амплитуды тока  $I_m = 3,9 \cdot 10^3$  А выбираем параметры остальных полупроводниковых приборов рассматриваемой схемы. Принимаем тиристоры  $VT5$  типа ТБ-320 ( $I_{уд} = 6,0 \cdot 10^3$  А при  $t = 10 \cdot 10^{-3}$  с),  $VT6$  типа Т320 ( $I_{уд} = 5,0 \cdot 10^3$  А при  $t = 10 \cdot 10^{-3}$  с) и диоды  $D4-D6$ ,  $VD9-VD15$  типа В2-320 ( $I_{уд} = 6,5 \cdot 10^3$  А при  $t = 10 \cdot 10^{-3}$  с). Шунтирующий диод  $VD8$  выбираем по амплитуде тока, равной  $U_c/R_m = 2 \cdot 10^3$  А. Принимаем диод типа ВЗ-200 ( $I_{уд} = 3,5 \cdot 10^3$  А при  $t = 10 \cdot 10^{-3}$  с).

Из приведенных выше расчетов можно сделать вывод, что создание быстродействующей бесконтактной коммутационной аппаратуры для шахтных участковых сетей напряжением 660 В технически осуществимо.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшей задачей общей проблемы безопасного применения электрической энергии в угольных шахтах является создание специальной быстродействующей коммутационной и защитной аппаратуры, способной при механических повреждениях кабеля осуществить энергетическую изоляцию места повреждения за время, не превышающее время образования электрической дуги в окружающей взрывоопасной среде.

Проведенные исследования показывают, что быстродействующая коммутационная аппаратура с собственным временем срабатывания до  $1 \cdot 10^{-3}$  с может быть создана только на основе силовых полупроводниковых приборов. Требуемому по условиям взрывобезопасности времени защитного отключения сети наиболее полно соответствует время срабатывания комбинированного защитного устройства от токов короткого замыкания и утечки на землю. Указанное защитное устройство содержит максимальную токовую защиту, реагирующую на скорость изменения тока, и фильтр напряжения нулевой последовательности.

Безопасные системы электроснабжения с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой позволят отказаться от применения экономически невыгодной пневматической энергии и резко повысить технико-экономические показатели шахт, разрабатывающих крутые пласты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Муравьев В. П., Разгильдеев Г. И.* Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок шахт. М.: Недра, 1970. 145 с.
2. *Шишкин Н. Ф., Олексевич В. П., Данилин П. Я.* Защита шахтных электроустановок и кабельных сетей. М.: Углетехиздат, 1959. 242 с.
3. *Докукин А. В., Шишкин Н. Ф.* Электроснабжение шахт, опасных по газу, пыли и внезапным выбросам, на основе систем с опережающим отключением. М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1966. 18 с.
4. *Кашицын Г. Е.* Изыскание критериев оценки взрывобезопасности в низковольтных сетях с быстродействующей коммутационной аппаратурой: Автореф. дис... канд. техн. наук М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1970. 18 с.
5. Электроснабжение шахт, разрабатывающих крутые пласты: (Обзор). М.: ЦНИЭИуголь, 1976. 57 с.
6. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. М.: Недра, 1973. 511 с.
7. А. с. 133086 (СССР). Способ коммутации в силовых электрических цепях/Н. Ф. Шишкин, П. Я. Данилин, В. П. Олексевич и др. Заявл. 9.11.59, № 643519/24; Опубл. в Б. И. 1960, № 21.
8. А. с. 119908 (СССР). Быстродействующий коммутационный аппарат/Н. Ф. Шишкин, П. Я. Данилин, В. И. Прокофьев и др. Заявл. 14.10.58, № 609475/24; Опубл. в Б. И., 1959, № 10.
9. *Кашицын Г. Е., Цицковский Г. Ф., Фролкин В. Г.* Безопасные свойства системы электроснабжения на 380 В с быстродействующей коммутационной аппаратурой.— Труды ВостНИИ, 1972, т. XII, с. 356—366.
10. *Шишкин Н. Ф., Антонов В. Ф.* Основные направления электрификации современных шахт. М.: Наука, 1981. 116 с.
11. *Кузьмин В. П.* Определение основных параметров по току полупроводниковых элементов головного короткозамыкателя в системе шахтного электроснабжения с опережающим отключением.— Науч. сообщ. Ин-та горн. дела им. А. А. Скочинского. М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1975, вып. 135, с. 11—16.
12. *Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Сахаров Ю. В.* Силовые полупроводниковые приборы: (Справочник). М.: Энергия, 1975. 510 с.
13. *Ковач К. П., Рац И.* Переходные процессы в машинах переменного тока. М.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
14. Тиристоры: (Техн. справочник): Пер. с англ./Под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергия, 1971. 560 с.
15. *Вишневский В. П., Зеленый В. Г.* Промышленные испытания системы электроснабжения с опережающим отключением.— Уголь, 1974, № 5, с. 37—41.
16. Система электроснабжения с опережающим отключением: Проспект Международной выставки «Уголь-75». М.: Внешторгиздат, 1975. 2 с.
17. *Миновский Ю. П., Фролкин В. Г., Шипилов А. Д.* О нормировании безопасной работы функциональных цепей защитных устройств аппаратуры опережающего отключения.— Уголь, 1979, № 4, с. 48—50.
18. А. с. 499668 (СССР). Быстродействующий полупроводниковый коммутатор/Г. И. Сивчиков, Б. Н. Головин, В. Г. Фролкин, А. Г. Аверкиев. Заявл. 9.09.71, № 169700; Опубл. в Б. И., 1976, № 2.

19. А. с. 173831 (СССР). Бесконтактное коммутационное устройство для отключения трехфазной сети / В. Г. Фролкин. Заявл. 1.04.64, № 890940. Оpubл. в Б. И., 1965, № 16.
20. Фролкин В. Г., Аверкиев Л. Г. Промышленные испытания быстродействующего аппарата бесконтактной коммутации АББК-2,5.— В кн.: Новое горношахтное оборудование и аппаратура. Испытания и опыт эксплуатации. М.: ЦНИИУголь, 1971, вып. 3, с. 5—6.
21. А. с. 473256 (СССР). Устройство для защиты шахтных трехфазных сетей, выполненных экранированным кабелем, от коротких замыканий/Н. Ф. Шишкин, Г. В. Миндели, В. Ф. Антонов, В. С. Михайлов, В. Г. Фролкин. Заявл. 5.01.72, № 1734744; Оpubл. в Б. И., 1975, № 21.
22. Шуцкий В. И., Забиров А. Устройства защиты и сигнализации от замыканий на землю в шахтных электроустановках напряжением до 1000 В. М.: ВНИИ электромеханики, 1966. 56 с.
23. Цаленко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. М.: Энергия, 1972. 152 с.
24. Правила изготовления взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. ОАА.684.053—67. М.: Энергия, 1969. 223 с.
25. Шишкин Н. Ф., Ягудаев Б. М., Антонов В. Ф. и др. Критерии оценки электробезопасности в сетях с быстродействующей защитной аппаратурой напряжением свыше 1000 В.— Науч. сообщ. Ин-та горн. дела им. А. А. Скочинского. М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1973, вып. 112, с. 3—15.
26. Киселев А. П., Власов С. П. К вопросу о критериях электробезопасности. Промышленная энергетика, 1967, № 5, с. 39—43.
27. Римап Я. С. Защита шахтных участков сетей от токов короткого замыкания. М.: Недра, 1972. 105 с.
28. Римап Я. С. Защита подземных электрических установок угольных шахт. М.: Недра, 1977. 206 с.
29. Римап Я. С. Рудничные автоматические выключатели АВ. М.: Недра, 1979. 78 с.
30. Болдырев В. И., Светличный П. Л., Гордиенко Ю. Д., Жаданов Ю. С. Защита шахтных низковольтных сетей от токов короткого замыкания. М.: Недра, 1974. 160 с.
31. Антонов В. Ф. Элементы расчета трансформаторов быстродействующей токовой защиты выпрямителей.— Науч. сообщ. Ин-та горн. дела им. А. А. Скочинского. М.: Недра, 1968, вып. 48, с. 136—138.
32. Петриченко В. Ф. Анализ переходных процессов в шахтной сети с точки зрения быстродействующей защиты для системы опережающего отключения.— В кн.: Взрывобезопасное электрооборудование. М.: Энергия, 1967, вып. 65, с. 203—214.
33. Афанасьев В. В., Адоньев Н. М., Жалалиев Я. В. Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1980. 344 с.
34. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушила А. В. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1965. 440 с.
35. Фролкин В. Г., Аверкиев Л. Г. Работа быстродействующих защитных устройств в нагруженных шахтных электрических сетях.— Науч. сообщ. Ин-та горн. дела им. А. А. Скочинского. М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1973, вып. 112, с. 52—53.
36. Озерной М. И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. М.: Недра, 1975. 448 с.
37. Прогрессивные технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. М.: Ин-т горного дела им. А. А. Скочинского, Ч. 1. Технологические схемы. 380 с.
38. Прогрессивные технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1978. Ч. 2. Пояснительная записка. 248 с.
39. Полесин Я. Л. Причины аварий и травматизма в горной промышленности. М.: Недра, 1969. 174 с.
40. Сычев Л. И., Реут Л. З. Шахтные гибкие кабели. М.: Недра, 1971. 192 с.
41. Римап Я. С., Красильников Н. Т., Недосеков С. С. Термическая устой-

- чивость пусковой аппаратуры шахтных электрических сетей.— В кн. Горные машины и автоматика. М.: ЦНИИУголь, 1971, вып. 5(134) с. 41—42.
42. Правила устройства электроустановок. М.: Энергия, 1965. 464 с.
43. Римап Я. С. О термической устойчивости шахтных кабелей электрических сетей напряжением до 1000 В.— Промышленная энергетика, 1970, № 3, с. 29—30.
44. Римап Я. С. К вопросу о термической устойчивости шахтных кабелей.— Уголь, 1970, № 3, с. 52—53.
45. Автоматические выключатели АЗ700: Проспект Международной выставки «Электро-77». М.: Внешторгиздат, 1977.
46. Шишкин Н. Ф., Миндели Г. В. Электробезопасность в шахтах и взрывоопасных помещениях. Тбилиси: Подна, 1960. 495 с.
47. Саранцев А. П., Трифонов Г. Ф. Отечественная силовая бесконтактная аппаратура и области ее применения.— Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1973, вып. 3(2), с. 12—16.
48. Поскребка А. П., Саранцев А. П. Разработка и применение бесконтактной коммутационной аппаратуры за рубежом.— Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1972, вып. 7(15). 12 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Предисловие</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Глава 1</b>  |           |
| <b>Основные принципы создания и совершенствования быстродействующей коммутационной аппаратуры</b>                             | <b>4</b>  |
| 1.1. Общие вопросы безопасного применения электрической энергии в шахтных силовых цепях                                       | 4         |
| 1.2. Быстродействующая коммутационная аппаратура на напряжение 380/660 В  | 6         |
| 1.3. Быстродействующая коммутационная аппаратура на напряжение 127 В  | 15        |
| <b>Глава 2</b>  |           |
| <b>Основные рекомендации по созданию и применению быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечек на землю</b> | <b>28</b> |
| 2.1. Быстродействующая защита от токов утечки на землю  | 29        |
| 2.1.1. Анализ схемных решений устройств защиты от утечек на землю с точки зрения их быстродействия                            | 29        |
| 2.1.2. Выбор минимальной величины уставки фильтра напряжения нулевой последовательности                                       | 40        |
| 2.1.3. Выбор типа фильтра напряжения нулевой последовательности   | 42        |
| 2.1.4. Выбор оптимальных параметров фильтра напряжения нулевой последовательности   | 46        |
| 2.2. Быстродействующая защита от токов короткого замыкания  | 51        |
| 2.2.1. Анализ защитных устройств от токов короткого замыкания с точки зрения их быстродействия                                | 52        |
| 2.2.2. Выбор дифференцирующего трансформатора тока  | 56        |
| 2.2.3. Экспериментальные исследования быстродействующей максимальной токовой защиты   | 58        |
| 2.3. Комбинированное устройство быстродействующей защиты от токов короткого замыкания и утечки на землю                       | 62        |
| 2.3.1. Анализ работы защитного устройства в режиме холостого хода сети  | 63        |
| 2.3.2. Анализ работы защитного устройства в режиме заторможенного электродвигателя  | 65        |
| 2.3.3. Расчет кабельной сети системы электроснабжения с быстродействующей коммутационной и защитной аппаратурой               | 73        |
| <b>Глава 3</b>  |           |
| <b>Основные преимущества быстродействующей коммутационной аппаратуры и рекомендации по ее созданию</b>                        | <b>81</b> |
| 3.1. Применение быстродействующей аппаратуры в шахтных участковых сетях   | 81        |
| 3.2. Рекомендации по созданию быстродействующей коммутационной аппаратуры   | 84        |
| <b>Заключение</b>   | <b>91</b> |
| <b>Литература</b>   | <b>92</b> |



**ВЛАДИМИР ГЕОРГИЕВИЧ  
ФРОЛКИН**

**РУДНИЧНАЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ  
КОММУТАЦИОННАЯ  
И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА**

Утверждено к печати  
Ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
институтом] горного дела  
им. А. А. Скочинского

Редактор издательства Л. Ф. Данкова  
Художник С. А. Смирнова  
Художественный редактор С. А. Литвак  
Технический редактор Е. В. Лойко  
Корректор Н. И. Казарина

**ИБ № 27412**

Сдано в набор 25.10.82  
Подписано к печати 14.2.83. Т-05134.  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Бумага книжно-журнальная  
Гарнитура обыкновенная. Печать высокая  
Усл. печ. л. 6. Усл. кр.-отт. 6,2  
Уч.-изд. л. 6,2 Тираж 1150 экз.  
Тип. зак. 2239 Цена 95 коп.

Издательство «Наука». 117864, ГСП-7,  
Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90  
2-я типография издательства «Наука»  
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

**В. Г. ФРОЛКИН**

---

**РУДНИЧНАЯ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ  
КОММУТАЦИОННАЯ  
И ЗАЩИТНАЯ  
АППАРАТУРА**

---



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»**

95 коп.