

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БАШКИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**АИПОВ Р.С.**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ**

(конспект лекций, часть III. Электрические аппараты  
и микропроцессорные системы релейной защиты)

Уфа 2015 г.

УДК 621.3(07)  
ББК 40.76 Я7  
А 36

Автор  
Аипов Р.С.

Рецензенты:

Зав. кафедрой электрических машин и эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве, ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» д.т.н., профессор В.А. Буторин.

Д.т.н., профессор кафедры электромеханики ФГБОУ ВПО «УГАТУ» И.Х. Хайруллин.

Конспект лекции предназначен для студентов по специальности 140106 Энергообеспечение предприятий. Может быть рекомендован студентам по специальности 110302 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства, студентам электротехнических специальностей, изучающих электрические машины в рамках подготовки бакалавров по направлению «Теплотехника и теплоэнергетика», «Агроинженерия».

В книге рассмотрены: электрические аппараты и микропроцессорные системы релейной защиты.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт работы со студентами энергетического факультета Башкирского государственного аграрного университета показал, что наиболее трудными для понимания являются дисциплины «Электрические машины», «Электрические машины и аппараты».

Поэтому основная задача автора заключалась в том, чтобы по возможности доступно и при умеренном объеме изложить материал по электромеханическому преобразованию энергии от физических основ до технических решений, режимов работы и эксплуатационных характеристик электрических машин и аппаратов.

Первая часть книги посвящена физическим основам электромеханического преобразования энергии, трансформаторам и асинхронным машинам.

Вторая часть книги посвящена синхронным электрическим машинам и машинам постоянного тока.

Третья часть книги посвящена электрическим аппаратам и микропроцессорным системам релейной защиты.

В приложении частей книги приведены основные справочные данные по физике и электромеханике, электрическим машинам, электрическим аппаратам.

Главы частей книги заканчиваются вопросами для самопроверки по главе.

При написании конспекта лекции использовались учебники, кроме приведенных в работе, по электротехнике, электромеханике, электроприводу (Л.Р. Нейман, Л.А. Бессонов, Т.А. Татур, В.В. Попов, А.А. Булгаков, Н.Ф. Ильинский, М.Г. Чиликин, Ю.А. Сабинин, В.А. Елисеев), а также статьи и монографии по электрическим аппаратам.

## **ВВЕДЕНИЕ**

При работе с электрическими машинами необходимо осуществлять весьма часто следующие действия: включение и отключение, регулирование числа оборотов, тормозить, изменять направление вращения, регулировать или поддерживать напряжения генератора, защищать от перегрузки и от короткого замыкания. Электрический аппарат может выполнять одно или несколько приведенных действий.

Электрические аппараты нашли широкое применение в электроэнергетике, в электротехнике. В электроэнергетике важной задачей является предотвращение и (или) локализации аварий. Целью релейной защиты является выполнение этой задачи. Использование микросхем позволило заметно улучшить характеристики защит по сравнению с традиционными аппаратами на базе электромеханических.

В настоящем издании представлены и рассмотрены аппараты различного исполнения, применяемые в электрических станциях и сетях, электромеханике, электротермии, схемах управления электрооборудованием, светотехнике, в системе автоматики, электросвязи.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

## 1.1 Общие сведения

Понятие об электрическом аппарате: аппарат (от лат. apparatus – оборудование) – это прибор, техническое устройство, приспособление.

Электрический аппарат представляет собой средство управления электрическим током, функции которых заключаются в управлении параметрами, характеризующими ток: электрическим напряжением, электрической мощностью и энергией, частотой электрического тока, его силой, формой импульсов тока (напряжением), магнитным потоком и т.п.

В техническом отношении к функции управления током относятся:

1. Коммутация (включение-отключение) электрического тока и связанных с ним параметров;

2. Автоматическое (неавтоматическое) регулирование, стабилизация, изменение по заданному закону электрического тока и связанных с ним параметров;

3. Распределение тока (электрической энергии по объектам и потребителям);

4. Защита электротехнического оборудования от аварийных режимов (короткое замыкание, перегрузки по току, изменение направления потоков энергии, изменение частоты тока и др.);

5. Контроль параметров электрического тока для подачи информации на входные органы автоматических регуляторов или аппаратов защиты;

6. Преобразование параметров тока (его вида, формы кривой, частоты и др.) для создания быстродействующих, высокочувствительных и надежных электрических аппаратов и систем управления.

Электрические аппараты нашли широкое применение в энергетике (электрические станции и сети), в различных схемах управления электрооборудованием, электротермии, светотехнике, плазменной технике, в системах автоматики, телемеханики, электросвязи. Условия работы электрических аппаратов в различных областях производства и техники имеют свои особенности, поэтому

они могут иметь существенные отличия в технических параметрах и характеристиках, а также в конструктивном исполнении.

Электрические аппараты условно можно разделить на пять основных видов:

1. Аппараты высокого напряжения, управляющие режимом работы электрических сетей и систем высокого напряжения (6,10,20,35,110,220,330,500,750,1150 кВ). С их помощью выполняются оперативные переключения в сетях и системах, а также осуществляется защита от токов короткого замыкания, от перенапряжений, от перегрузки и др;

2. Аппараты управления, управляющие режимом работы электрооборудования и распределительных сетей на номинальное напряжения 127, 220, 380, 500, 660, 1140 В, а также осуществляющие автоматическую защиту их от аварийных режимов;

3. Электрические аппараты автоматики, осуществляющие функции контроля электрических и неэлектрических параметров работающего оборудования и вырабатывающие сигналы в схемах автоматики и управления, которые соответствуют контролируемым параметрам, а также включающие в себя режимы защиты;

4. Автоматические регуляторы и стабилизаторы, предназначенные для автоматического регулирования по заданному закону того или иного выходного параметра работающего оборудования или поддержания этого параметра на заданном уровне;

5. Усилители и преобразователи, осуществляющие усиление слабых сигналов, подаваемых на вход, до относительно больших на выходе (усилители), а также преобразование одной формы сигнала в другую (преобразователи), например, сигналов постоянного тока в переменный, или наоборот.

Аппараты классифицируют по следующим основным признакам: способу управления, назначению, принципу действия, роду тока, по конструкции.

По способу управления:

аппараты ручного управления, которые вступают в работу в результате непосредственного воздействия обслуживающего персонала (рубильники, пакетные выключатели и переключатели, реостаты, ручные пускатели, автоматы с ручным приводом);

аппараты дистанционного или автоматического управления, которые могут быть приведены в действие обслуживающим персоналом дистанционно, либо их работа может быть поставлена в

автоматическую зависимость от заранее заданных условий (магнитные пускатели, контакторы, автоматические выключатели с электродвигательным и электромагнитным приводом).

По назначению:

коммутирующие - предназначенные для размыкания электрической цепи без нагрузки (рубильники, переключатели, пакетные выключатели и т.д.);

защиты и сигнализации - осуществляющие защиту электродвигателей и сети от коротких замыканий и перегрузок (автоматические выключатели, предохранители, тепловые реле, реле максимального тока и минимального тока);

управления - служащие для пуска и остановки электродвигателей, изменения направления и частоты вращения (пускатели, контакторы, контроллеры, регулировочные и тормозные резисторы, реле управления).

По принципу действия: электромагнитные, электротепловые, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные, электростатические, ферромагнитные, электронные, полупроводниковые, и так далее.

По роду тока: постоянного и переменного тока.

По конструкции: открытого, защищенного, закрытого, герметичного, взрывобезопасного и т.п. исполнения (для условий сельскохозяйственного производства ГОСТ 19348).

По коммутационной способности всю аппаратуру управления и защиты подразделяют на силовую, устанавливаемую в силовых (главных) цепях, слаботочную, используемую в цепях управления (вспомогательных).

К силовой аппаратуре относят коммутационную и регулировочную аппаратуру силовых цепей технологических установок: выключатели, в том числе автоматические; контакторы, магнитные и полупроводниковые пускатели; предохранители; силовые контроллеры; реостаты; реакторы и т.п.

Слаботочная аппаратура, используемая в цепях управления технологических установок, включает в себя различные контактные и бесконтактные реле, кнопки и кнопочные станции, всевозможные командоаппараты; первичные измерительные преобразователи (датчики) электрических и неэлектрических величин, различную аппаратуру сигнализации, телемеханики; системы регуляторов и источников вторичного электропитания.

Аппараты управления и защиты выбирают по ряду параметров, основные из которых - номинальные напряжения и ток. Кроме того, аппараты выбирают по климатическому исполнению, степени защиты от воздействия окружающей среды и другим параметрам в зависимости от назначения аппарата (предельной отключаемый ток короткого замыкания, электродинамическая и термическая устойчивость, время срабатывания, разрывная мощность и износостойкость контактов и др.).

Выбирая аппараты защиты необходимо иметь в виду возможность следующих ненормальных режимов:

- междуфазные короткие замыкания;
- замыкание фазы на землю (на корпус);
- увеличение тока, вызванное перегрузкой технологического оборудования, затяжным пуском двигателя, неполнофазным режимом, а иногда и неполным коротким замыканием;
- исчезновение или чрезмерное снижение напряжения во всех фазах.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок защита от токов короткого замыкания обязательна для всех электроприемников. Она должна действовать с минимальным временем отключения, быть отстроенной от больших пусковых токов и по возможности удовлетворять требованиям избирательности (селективности).

Защита от перегрузки необходима в случаях, когда возможна перегрузка механизма по технологическим причинам, когда при особо тяжелых условиях пуска необходимо ограничить длительность пускового периода при пониженном напряжении, при затормаживании ротора, а также для предотвращения работы двигателя в неполнофазном режиме. Защита должна осуществляться с небольшой выдержкой времени на отключение.

Защита минимального напряжения (нулевая защита) должна предусматриваться:

для электродвигателей, самозапуск которых после исчезновения и последующего восстановления напряжения недопустим по технологическим причинам и представляет опасность для обслуживающего персонала;

для электродвигателей с фазным ротором, включение которых в сеть при роторе, замкнутом накоротко, недопустимо.

От правильного выбора аппаратуры управления и защиты в значительной степени зависят надежность и сохранность оборудования в целом, количественные, качественные и экономические показатели производственного процесса, электробезопасность людей и животных.

## 1.2 Электрический контакт

Токоведущие системы электрических аппаратов состоят из отдельных деталей (проводников), электрически соединенных между собой. Соприкосновение тел, обеспечивающих непрерывность электрической цепи, называется электрическим контактом. Конструкция, при помощи которой происходит переход тока из одной токоведущей части в другую, называют контактным соединением. Неправильно спроектированное или выполненное контактное соединение в эксплуатации может вызвать аварию (пожар) из-за перегрева контактов.

Применяемые в аппаратостроении контактные соединения можно разделить на соединительные, служащие только для проведения тока, и коммутирующие, на которые дополнительно возлагаются задачи включения, отключения или переключения электрических цепей.

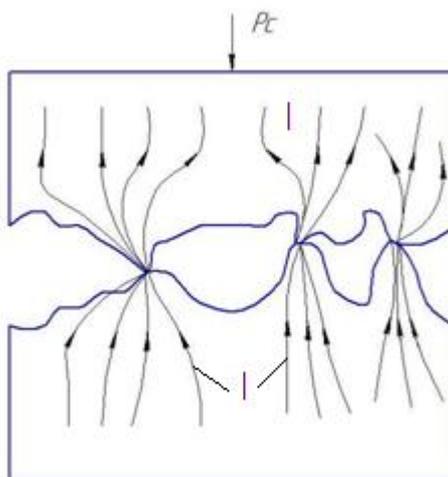
Для соединительных контактов характерно разделение на взаимно неподвижные и взаимно подвижные, скользящие или катящиеся. Соединительные контакты должны длительно в пределах срока службы всей установки в целом и без повреждений допускать протекание токов нормального режима и кратковременных токов аварийных режимов работы.

Коммутирующие контакты могут находиться в замкнутом (соответствующая цепь включена) или разомкнутом (соответствующая цепь отключена) состоянии. Существует много видов коммутирующих контактов, например, контакты: рубящие, торцовые, щеточные, пальцевые, розеточные и т.д. По своему назначению коммутирующие контакты в силовых цепях можно разделить на главные и дугогасительные. Часто функции контактов совмещаются так, что один и тот же контакт выполняет роль токоведущего и дугогасительного.

Физические процессы, протекающие в электрических контактах весьма разнообразны и сложны. Они определяются как конструкцией

контактов, свойствами материалов проводников, так и условиями, существующими во внешней среде и в электрической при замкнутом положении контактов, при их разомкнутом положении и в процессах включения и отключения.

Важнейшей физической характеристикой всех типов контактных соединений является переходное сопротивление контактов  $R_k$ . Получить абсолютно гладкую рабочую поверхность контактов практически невозможно, поэтому электрический ток проходит только в отдельных точках (точках соприкосновения) контактов (Рис. 1.1), которые определяют переходное сопротивление.



**Рисунок 1.1 Соприкосновение поверхностей контактов и картина растекания тока.  $P_c$  – сжимающая сила.**

Кроме того, контактные поверхности покрыты пленкой окислов, имеющих толщину до 10-5 нм, удельное сопротивление которой существенно больше удельного сопротивления материала контактов. Оксидная пленка на поверхности контактов может быть разрушена под действием сжимающей силы  $P_c$  или пробита под действием разности электрических потенциалов.

Исходя из картины соприкосновения контактных поверхностей (Рис. 1.1.) природу переходного сопротивления контактов можно объяснить сужением линий тока  $I$  к площадкам соприкосновения и повышением плотности тока по сравнению с плотностью тока в месте контакта. Следовательно, возрастают местные (локальные) потери  $\Delta P_k = I^2 R_k$ , при увеличении значения  $R_k$ , т.е. при плохом качестве контакта, он может разогреться до высокой температуры и оплавиться.

По форме контактирования различают три вида электрических контактов: точечный, линейный и поверхностный.

Точечный – электрический контакт, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контактов происходит в одной точке – площадке, например соприкосновение таких поверхностей, как сфера-сфера, сфера-плоскость, вершина конуса-плоскость и т.п.

Линейный – электрический контакт, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контактов происходит по линии, физическая картина контактирования здесь представляет собой ряд точек – площадок ( $\text{min}$  - две), расположенных по одной линии. Например цилиндр – плоскость, виток – виток и т.п.

Поверхностный (многоточечный) – электрический контакт, при котором рабочие поверхности контактов соприкасаются в ряде точек – площадок ( $\text{min}$  – в трех) расположенных на поверхности.

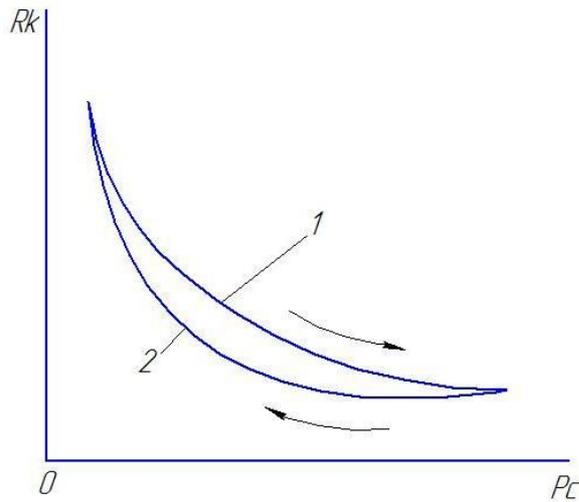
Количество контактных переходов (точек - площадок) увеличивается с ростом нажатия по весьма сложному закону, а переходное сопротивление контакта выражается уравнением, полученным экспериментально:

$R_k = a/P_c^u$ , где,  $a$  – постоянная, зависящая от материала контакта и состояния его поверхности;  $u$  – постоянная, зависящая от конструкции контактов;  $P_c$  – сила сжимающая контакты.

Для точечного контакта (зачищенной)  $u = 0,5$ , для линейного контакта  $u \approx 0,7$ , для касания по плоскости  $u = 1$ . Значение постоянной  $a$  в Н·Ом для односточечных защищенных контактов:

Серебро	$1,58 \cdot 10^{-4}$ ;
Медь	$3,16 \cdot 10^{-4}$ ;
Алюминий	$5,05 \cdot 10^{-4}$ ;
Олово	$15,8 \cdot 10^{-4}$ ;
Латунь	$21,2 \cdot 10^{-4}$ .

С ростом контактного нажатия переходное сопротивление уменьшается (рис. 1.2 кривая 1). При уменьшении нажатия (рис. 1.2 кривая 2) зависимость  $R_k = f(P_c)$  лежит несколько ниже из-за наличия остаточных пластических деформаций контактирующих выступов и повреждений пленки окислов, полученных при сжатии.



**Рисунок 1.2** Зависимость переходного сопротивления  $R_k$  от силы сжатия контактов  $P_c$ .

### **1.3 Общие свойства электрической дуги и условия ее гашения.**

При размыкании электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов (выключателей, автоматов, контакторов, пускателей, рубильников, реле) обычно на этих контактах возникает дуговой разряд, если величина тока и напряжения превосходят некоторые критические значения. Эти критические значения зависят от ряда факторов: материала контактов, параметров цепи, свойств среды и т.д. Например, на медных контактах при их размыкании в цепи постоянного тока в воздухе, дуга возникает уже при токах свыше 0,5 А и при напряжении, действующей в цепи, не менее 15 В. При меньших значениях тока и напряжения размыкания контактов сопровождается образованием искр.

Возникновение дуги на контактах аппаратов ведет к их значительному износу и сокращению срока службы аппарата; степень износа находится почти в прямой зависимости от размыкаемого тока и времени горения дуги. Поэтому одним из наиболее радикальных средств уменьшения износа контактов под влиянием дуги является сокращение времени горения дуги (повышение активности гашения дуги).

Но, с другой стороны, в ряде случаев возникающая электрическая дуга играет и положительную роль, так, при

отключении постоянного тока значительная часть электромагнитной энергии, занесенной в отключаемую цепь, преобразуется в тепловую энергию дуги, которая отводится в окружающую среду. Это ведет к снижению перенапряжений, опасных для изоляции оборудования. При переменном токе дуга является проводящим элементом цепи в течении всей полуволны тока, процесс гашения дуги по существу проходит вблизи нулевой паузы тока, когда электромагнитная энергия цепи близка к нулю. В результате вероятность появления опасных перенапряжений резко уменьшается.

В аппаратах, отключающих цепи со значительными величинами тока и напряжения, для ускорения гашения дуги применяют специальные дугогасительные устройства (камеры), сложность которых обычно увеличивается с ростом величины токов и напряжения. Без применения таких специальных дугогасительных устройств гашения дуги, возникающей на контактах, становится невозможным размыкание цепи.

Дуговой процесс, возникающий между контактами коммутирующего аппарата, представляет собой очень сложное физическое явление, зависящее от многих факторов.

Дуговой процесс это прохождение электрического тока через воздух, называемое газовым разрядом, который может сопровождаться ударной ионизацией: лавинообразным процессом образованием электронов и ионов.

Для дугового процесса характерны следующие черты:

ясно очерченная граница между дуговым столбом и окружающей средой;

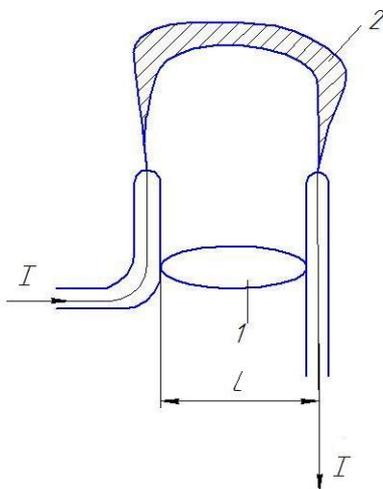
высокая плотность тока в дуговом столбе (десятки-сотни А/мм<sup>2</sup>);

высокая температура газа внутри дугового столба, достигающая 5000÷100000 К и более высоких значений. В этих условиях преобладает термическая ионизация газа;

высокая плотность тока на катоде и малое падение напряжения у катода.

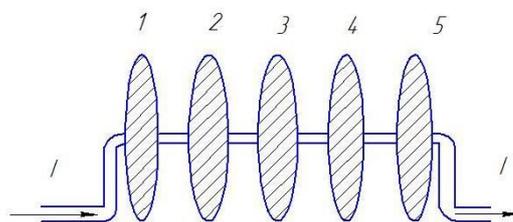
Способы гашения дуги. Простейший способ гашения дуги – механическое растяжение ее столба. При небольших токах (до 10 А) дуга (1) растягивается между расходящимися контактами на длину  $l$  и не выходит из межконтактного пространства (Рис. 1.3). При значительных токах дуговой столб (2) выдувается вверх под действием сил, вызываемых тепловыми потоками, или сил

электродинамического взаимодействия тока дуги с токами токоведущих элементов аппарата. В таких устройствах гасится открытая дуга.



**Рисунок 1.3 Образование дуги между расходящимися контактами**

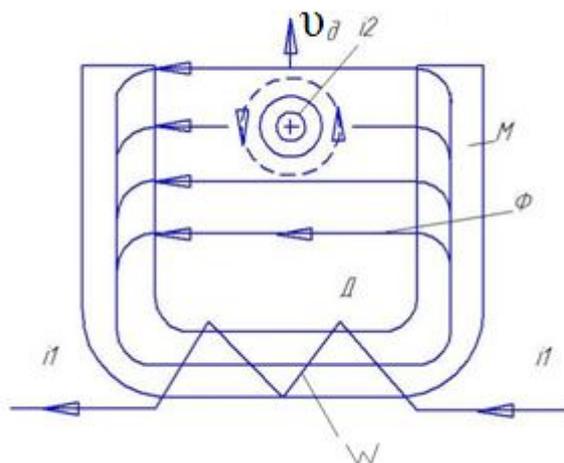
Широко применяются дугогасительные решетки, набранные из стальных пластин на которые выдувается электрическая дуга (Рис.1.4). Дуга перемещается на стальные пластины под действием электромагнитных сил (магнитный поток от тока дуги стремится пройти по пути наименьшего сопротивления – по стальным участкам). Пластины, разбившие столб дуги на ряд коротких дуг, являются для них своеобразными радиаторами, интенсивно их охлаждающими. Это вызывает сильный рост сопротивления дуги и ее гашение.



**Рисунок 1.4 Гашение дуги стальными пластинами:  
1,2,3,4,5 – стальные пластины.**

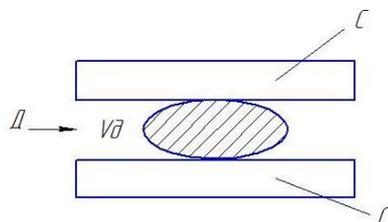
В дугогасительных системах с магнитным дутьем используется охлаждение дуги (Д) за счет ее перемещения со скоростью  $v_0$ , вызываемого взаимодействием тока дуги  $i_2$  с магнитным полем,

искусственно создаваемым между полюсами стального магнитопровода М (Рис.1.5). Магнитный поток  $\Phi$  создается током  $i_1$ , протекаемого по обмотке W.



**Рисунок 1.5 Дугогасительная система с магнитным дутьем**

Часто система магнитного дутья сочетается с щелевыми дугогасительными камерами, изготовленными из дугостойкого изоляционного материала, в которое магнитное поле загоняет столб дуги Д. Стенки С камеры интенсивно отводят теплоту от столба дуги и гасят ее (Рис. 1.6).



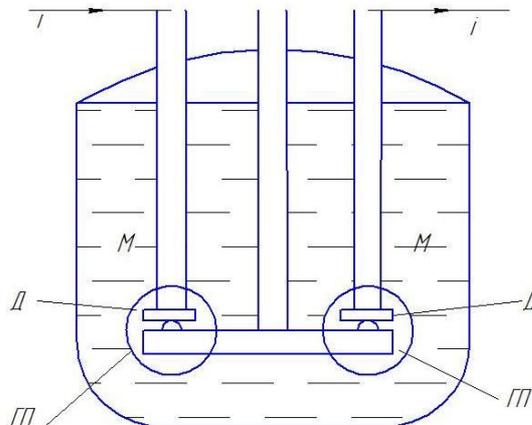
**Рисунок 1.6 Щелевая дугогасительная камера**

Описанные дугогасительные устройства применяются в аппаратах низкого напряжения (до 1000 В).

В аппаратах высокого напряжения используются более интенсивные способы воздействия на дуговой столб. К ним относится гашение дуги в минеральном (трансформатором) масле, в элегазе, в вакууме.

Дуга Д (Рис.1.7) разлагает масло М и образует газопаровой пузырь ГП, в котором содержится около 70% водорода, обладающая высокой теплопроводимостью (1 г масла выделяет 400 см<sup>3</sup> газопаровой смеси). Возникающее бурное перемешивание смеси из масла, его паров и газов обуславливает гашение дуги. Это

происходит в условиях повышенного давления газов, что также улучшает условие гашения дуги.

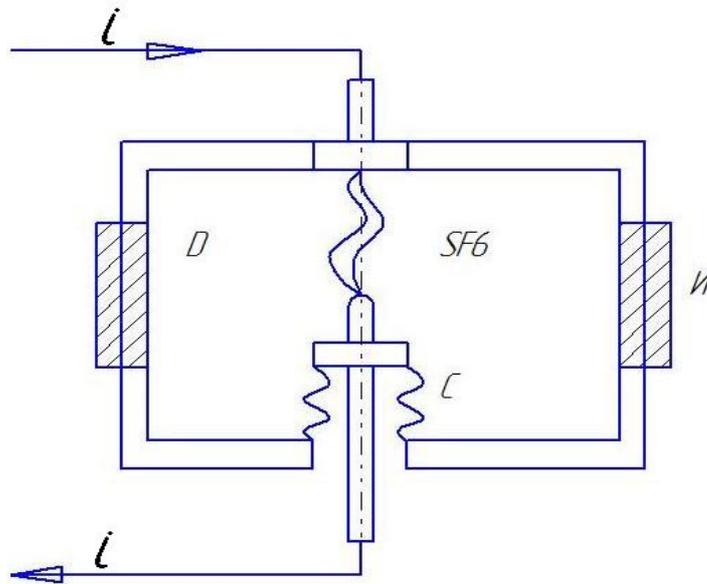


**Рисунок 1.7 Гашение дуги в трансформаторном масле**

В вакуумных выключателях внутри герметичной камеры создается вакуум той или иной степени разрежения воздуха: низкий вакуум – 105-102 Па, средний -102-0,1, высокий – 0,1-10<sup>-5</sup>, глубокий – ниже 10<sup>-5</sup> Па.

Резкое снижение концентрации газовых частиц снижает возможности возникновения носителей тока (электронов и ионов). В результате пробивные напряжения промежутков в вакууме повышаются в 4-5 раз в сравнении с воздухом при атмосферном давлении. Основная часть носителей электричества в вакууме поставляется из металлического катода за счет эмиссии, например при прохождении переменного тока через нуль. Если возможность переноса тока исчезает, цепь отключается.

В последние годы распространены герметизированные дугогасящие устройства (Рис.1.8), в которых дугогасящей средой является элегаз (шестифтористая сера SF6). Дуга Д возникает и гасится при расхождении контактов. Сильфон С (гибкая гофрированная губка из тонкой стали) создает возможность такого движения и отделяет объем камеры от окружающей среды.



**Рисунок 1.8 Герметизированное дугогасящее устройство с элегазом (SF6)**

Элегазу свойственна высокая электрическая прочность, превышающая 4-5 раз электрическую прочность воздуха. Он обладает свойством захватывать электроны. Они прилипают к тяжелым молекулам такого газа, становясь как бы отрицательными ионами с присущей им малой подвижностью, что существенно снижает электропроводность газа и способствует гашению электрической дуги. Хорошие дугогасительные свойства элегаза определяются также его высокой теплоотводящей способностью и спецификой химической реакции в условиях гашения электрической дуги.

#### **1.4 Аппараты ручного управления**

Рубильники, выключатели и переключатели предназначены для ручного включения, отключения и переключения электрических цепей постоянного и переменного тока. Они не содержат элементов защиты, и их применяют тогда, когда не требуется дистанционное или автоматическое включение оборудования.

Рубильники (серии Р, РБ, РПБ, РПВ и другие одно-, двух- и трехполюсного исполнения), переключатели типа П, ПБ, ППБ предназначены для несчастных (не более шести в час) включений, отключений и переключений электрических цепей переменного тока напряжением до 660 В и частотой 50 Гц. Их можно применять для

включения и отключения электродвигателей мощностью не более 10 кВт. Предельный, отключаемый ток без дугогасительной камеры составляет до 30 % номинального.

Пакетные выключатели типа ПВМ предназначены для коммутации силовых цепей управления. Их выпускают на ток от 6 до 400 А при напряжении 220/380 В в одно-, двух-, и трехполюсном исполнении. Выключатели состоят из набора изолированных колец - пакетов, внутри которых расположено отдельное для каждого полюса контактное устройство. За счет использования в конструкции пакетного выключателя специальных пружин, коммутация цепей ускоренная, что исключает оплавление контактов (до 300 отключений в час).

Пакетные выключатели и пакетные переключатели серии ПВ и ПП применяются в качестве вводных переключателей цепей управления электроустановок, распределения электроэнергии и для ручного управления асинхронными двигателями напряжением до 380 В. Пакетные выключатели и переключатели в зависимости от конструкции могут иметь различные степени защиты и климатические исполнения.

Рубильники, пакетные выключатели и пакетные переключатели выбирают по следующим параметрам:

$$U_n > U_{н.уст};$$
$$I_n > I_{н.уст},$$

где:

$U_n; U_{н.уст}$  - соответственно, номинальное напряжение аппарата управления и установки, В;

$I_n; I_{н.уст}$  - номинальные токи аппарата и электроустановки, А;

Кроме того, при выборе типа рассматриваемого аппарата учитывают необходимое количество полюсов, схема соединений и условия окружающей среды.

Силовые и командные контроллеры предназначены для коммутации переменного и постоянного тока и имеют одинаковую конструкцию. Различие состоит в том, что силовые контроллеры непосредственно коммутируют силовые цепи и снабжены перекачивающими контактами с дугогашением. По конструкции различают барабанные, кулачковые и плоские контроллеры.

Ключи управления и универсальные переключатели предназначены: для сложной коммутации цепей управления. Они

имеют небольшие габариты и мощные контакты для коммутации токов до 20 А. В отдельных ключах управления при помощи пружины происходит самовозврат ключа в исходное состояние с фиксацией нулевого положения.

Кнопки управления и кнопочные станции - простейшие командоаппараты для коммутации цепей управления с пружинным самовозвратом. Устанавливают их на пультах, щитах управления. Кнопки управления, смонтированные в общем корпусе или на панели, называют кнопочной станцией.

В сельских электроустановках применяют кнопочные станции, главным образом защищенного исполнения.

Промышленность выпускает кнопки управления серии КЕ и КМЕ различных типов, отличающихся исполнением, видом, формой, цветом толкателей, числом контактных цепей и оперативными надписями на толкателях.

Кнопки управления используют для дистанционного управления контактами, пускателями и другими электромагнитными аппаратами, а также для коммутации цепей сигнализации, блокировок и т.п.

Резисторы и реостаты в основном применяют для пуска, торможения и получения необходимых регулировочных характеристик электродвигателей, а также в специальных технологических электрических установках (ТЭУ).

По назначению различают резисторы и реостаты пусковые, тормозные, регулировочные, пускорегулировочные, добавочные и нагрузочные.

При включении ТЭУ не более пяти раз в течении часа применяют резисторы с масляным охлаждением. При редких включениях используют резисторы с песочным наполнением. Резисторы с воздушным охлаждением устанавливают при частых включениях.

При изготовлении резисторов и реостатов используют констатан, манганин, хромоникелевые, хромоалюминиевые и железоалюминиевые сплавы, а также чугун и электротехническую сталь.

В качестве изоляционных материалов применяют фарфор, стеатит, саталл, слюду, стекло, асбестоцемент, асбест, стеклотекстолит, фенолит, пластмассы, обладающие хорошими тепловыми, механическими и диэлектрическими свойствами.

Промышленность выпускает блоки резисторов с литыми плоскими элементами типа СЖ от 0,1 до 10 Ом на токи от 46 до 660 А; ЯС-2, ЯСТ-1, ЯСТ-2 от 0,03 до 8 Ом на токи от 24 до 25 А с разным числом элементов.

### **1.5 Аппараты автоматического управления и защиты.**

Аппараты автоматического управления приводятся в действие электрическими сигналами (командами). Для автоматического управления и защиты широко применяют контактную аппаратуру в виде различных электромеханических коммутаторов: автоматических выключателей, электромагнитных и тепловых реле, путевых и конечных выключателей и т.п.

Автоматические выключатели (автоматы).

При напряжении ниже 1000В используются воздушные автоматы, которые совмещают в себе функции коммутации и автоматической защиты электроустановок и их электрических цепей.

Для более эффективного гашения возникающей при отключении нагрузки электрической дуги, главные контакты автоматических выключателей оснащают дугогасительными камерами из жаростойкою изоляционного материала. Принцип действия дугогасительной камеры состоит в том, что дуга, возникающая при расхождении главных контактов, за счёт электромагнитных сил затягивается внутрь камеры и разрываются жаростойкими изоляционными перегородками.

Автомат АК 63 разработан с целью замены автомата АП 50, имеющего малую коммутационную способность. Коммутационная способность АК63 в 2,5 раза больше, чем у АП50. АК 63 имеет открытые выводы, не соприкасающиеся с корпусом выключателя, имеют лучший тепло-отвод, а при нагреве выводов не происходит выгорания корпуса выключателя.

Автоматы АЕ2000 разработаны с целью замены всех других автоматов на ток до 100А. Они имеют расцепители тепловые, электромагнитные или комбинированные.

Расцепитель любого автомата представляет собой блок, встроенный в корпус автоматического выключателя и предназначенный для отключения автомата под действием тока, большего чем на который он настроен.

Действие теплового расцепителя основано на изменении формы биметаллической пластины при протекании по ней тока нагрузки автомата, большего его номинального тока. Пластины действуют на механизм отключения автоматического выключателя.

Электромагнитный расцепитель состоит из электромагнитов, по катушкам которых проходит ток автомата. Электромагниты приводятся в действие только при токе аварийной перегрузки, например, при заклинивании механизма технологической машины с электрической машиной в приводе, или при токе короткого замыкания, воздействуя на механизм отключения автомата.

Комбинированный расцепитель содержит расцепитель обоих видов.

Автоматические выключатели характеризуются следующими параметрами: номинальным напряжением  $U_{н.а.}$  соответствующим номинальному напряжению сетей в которых разрешается применять автомат, В; номинальный ток  $I_{н.а.}$  - наибольший ток, на который рассчитаны токоведущие и контактные части выключателя, равным наибольшему из номинальных токов расцепителя, А; номинальным током расцепи геля  $I_{н.расц.}$  ( $I_{н.эл.}$  - электромагнитного,  $I_{н.т.}$  - теплового или  $I_{н.комб.}$  - комбинированного) - наибольший ток, на который рассчитан расцепитель при длительной работе, не вызывающим срабатывание расцепителя, А; ток срабатывания (уставки) расцепителя  $I_{ср.расц.}$  ( $I_{ср.эл.}$ ,  $I_{ср.т.}$ ) - наименьший ток, при котором срабатывает расцепитель автоматического выключателя. Обычно  $I_{ср.эл.} = (3...15) I_{н.эл.}$  для выключателей с комбинированным или электромагнитным расцепителем, А (ток срабатывания электромагнитного расцепителя, часто называют током отсечки);  $I_{ср.т.} = (1,25... 1,45) I_{н.т.}$  - для выключателей с тепловым расцепителем с регулировкой тока уставки, А; предельным током отключения  $I_{пред.а}$  наибольшим значением тока короткого замыкания сети, при котором гарантируется надежное отключение автоматического выключателя, А.

Различают универсальные, установочные и быстродействующие автоматические выключатели. Большое распространение получили универсальные и установочные автоматические выключатели. Последние имеют изоляционный кожух, позволяющий устанавливать их вне распределительных щитов.

В сельских электроустановках наибольшее распространение получили трёхполюсные автоматы серий АЕ - 2000, АЕ - 2000М,

А3700 и ВА - 51. Автоматические выключатели АЕ - 2000 и АЕ - 2000М рассчитаны на номинальные токи 16 А(АЕ - 2020М ), 63(АЕ - 2040М), 100(АЕ - 2050М), 160(АЕ - 2060) и могут быть снабжены комбинированными (электромагнитными и тепловыми) или только электромагнитными расцепителями. Они имеют регулировку тока срабатывания тепловых расцепителей в пределах (0,9... 1,15)  $I_n$ . Выключатели с электромагнитным расцепителем имеют кратность тока отсечки по отношению к номинальной силе тока 3,5 и 12.

Автоматические выключатели серии А3700 выпускают на номинальные токи 160 А (А370) 250 (А3720), 630А (А3730), с тепловыми или электромагнитными расцепителями максимального тока и селективные с полупроводниковыми расцепителями максимальной токовой защиты. Селективность создаётся выдержкой времени в пределах 0,1...0,4 с посредством регулировки полупроводникового расцепителя.

Выключатели токоограничающего исполнения имеют в условном обозначении букву Б (например, А3710Б), а селективного исполнения букву С (например, А3730С).

Автоматические выключатели серии ВА 51 рассчитаны на токи до 630А (ВА 51 - 25 - 25А, ВА 51 - 31 - 100А; ВА 51 - 33 - 160А; ВА 51 - 35 - 250А; ВА 51 - 37 - 400А; ВА 51 - 39 - 630А).

Автоматические выключатели выбирают по исполнению и наличию дополнительных расцепителей.

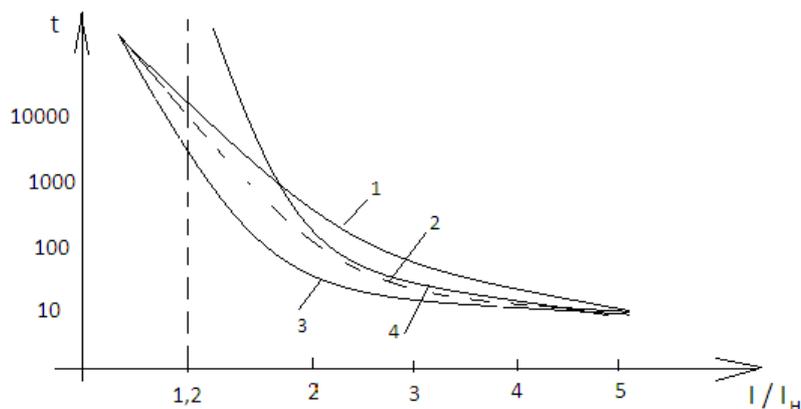
Обычно при практических расчётах по выбору автоматов для защиты одного электродвигателя ток отсечки электромагнитного расцепителя выбирают не менее 1,5... 1,6 пускового тока электродвигателя. При выборе автомата для защиты линий, которая питает несколько электродвигателей, номинальный ток выключателя, как и номинальный ток расцепителя должен быть равен сумме номинальных токов одновременно работающих электродвигателей или превышать её. Ток отсечки электромагнитного расцепителя в данном случае

$I_{\text{ср.эл.}} \geq (1,5 \dots 1,8) [\sum_1^n I_n + I_{\text{п.нв}}]$ , где  $\sum_1^n I_n$  - сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей,  $I_{\text{п.нв}}$  - разность между пусковым и номинальным током для двигателя, у которого они наибольшие.

От перегрузки защищают каждый электродвигатель отдельно.

Тепловое реле. Долговечность электрического оборудования в значительной степени зависит от перегрузок, которым оно

подвергается во время работы. Для любого объекта можно найти зависимость допустимой длительности протекания тока от его значения, при котором обеспечивается надежная и длительная его эксплуатация (кривая 1 на рис. 1.9.)



**Рисунок 1.9 Токовременные характеристики теплового реле и защищаемого объекта**

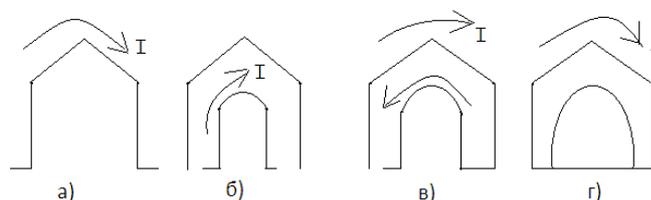
Протекание тока, превышающего номинальный, приводит к росту потерь и, как следствие, дополнительному повышению температуры, ускоренному старению изоляции и снижению срока службы оборудования. Чем меньше срок службы, тем больше допустимы перегрузки. Для защиты от токов перегрузки –  $(2 \div 8) I_n$  широко используются тепловые реле с биметаллическим рабочим элементом.

Очевидно, что в идеальном случае зависимость  $t = f(I)$  для реле защиты должна идти ниже кривой 1 (кривая 2 на рис. 1.9).

Действие биметаллических тепловых реле основано на разности линейного удлинения двух пластин из металлов с различными коэффициентами линейного расширения. Составная пластина (биметаллическая), состоящая из жестко соединенных двух пластин (сваркой или прокатной в горячем состоянии) при нагреве будет изгибаться в сторону материала с меньшим температурным коэффициентом. Механическое усилие, развиваемое пластиной при изгибании, используемая для приведения в действие исполнительного элемента реле-контактов, которые при срабатывании отключают силовые контакторы.

Нагрев самой пластины может осуществляться непосредственно током нагрузки (рис. 1.10, а), косвенно, когда ток цепи проходит по

нагревательному элементу (рис. 1.10, б) или комбинированно (рис.1.10., в, г) когда сочетаются методы непосредственного и косвенного нагрева.



**Рисунок 1.10 Схемы исполнения теплового реле**

Для увеличения постоянной времени нагрева  $T_n$  (десятки минут) используют дополнительные массивные элементы с косвенным их нагревом. Лучшие характеристики получаются при комбинированном нагреве.

Основной характеристикой теплового реле является зависимость времени срабатывания от тока нагрузки (токовременные характеристики). До начала перегрузки через реле протекает ток  $I_0$ , который нагревает пластину до температуры  $\theta_0$ . Зависимость  $t_{cp}(I)$  для этого случая имеет вид:

$$t_{cp} = T \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_\infty^2},$$

где  $T$  – постоянная времени нагрева реле;  $I_\infty$  – ток, при котором реле срабатывает за время  $t \gg T$ ,  $I_\infty = (1,2 \div 1,3) I_n$ ,  $I$  – ток, при котором реле срабатывает за время  $t_{cp}$ .

Выразив токи в относительных единицах:  $X = I/I_n$ ;  $X_{cp} = I_\infty/I_n$ ;  $\varepsilon = I_0/I_n$  получим  $t_{cp} = T \ln \frac{X^2 - \varepsilon^2}{X^2 - X_{cp}^2}$  если реле включается в холодном состоянии ( $\varepsilon = 0$ ), то:

$$t_{cp} = T \ln \frac{X^2}{X^2 - X_{cp}^2} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{1,2 \div 1,3}{X^2}}$$

Очевидно, что время срабатывания реле от «горячего» состояния ( $\varepsilon \neq 0$ ) значительно меньше, чем от «холодного» ( $\varepsilon = 0$ ). Следовательно, имеет место и относительно большое время возврата регулируемого элемента реле в нормальное положение из-за термической инерции.

Зная время срабатывания реле и кратность тока перегрузки (например из опыта), постоянную времени  $T$  находят из последнего выражения, а затем можно рассчитать и саму зависимость  $t_{cp}(I)$  в широком диапазоне изменения нагрузки. Данные для расчета можно взять и из паспорта реле. Следует учитывать, что  $T$  не является постоянной величиной если ток перегрузки меньше 3-5 кратного. При этом, чем меньше перегрузка, тем большее значение  $T$ .

Номинальный ток реле выбирается равным номинальному току защищаемого объекта. Срабатывание реле происходит при  $I_{\infty} = (1,2 \div 1,3) I_n$ , а время срабатывания при этом  $t_{cp} \approx 20$  мин. На рис. 1.9 представлены токовременные характеристики двигателя (кривая 1) и двух тепловых реле с различными токами срабатывания. У одного реле (кривая 3)  $I_{cp} = I_{ном}$  двигателя, у другого на 20% больше (кривая 4). Лучшее согласование характеристик реле и двигателя достигается во втором случае.

Правильно выбранное и отрегулированное тепловое реле срабатывает при перезагрузке по току на 20% номинальной в течении 20 мин и не срабатывает из-за значительной тепловой инерции при пуске и кратковременных разовых перегрузках электродвигателей.

В исходное состояние тепловое реле возвращается после охлаждения биметаллической пластины самопроизвольно либо при помощи кнопки возврата.

Тепловые реле имеют плавную регулировку тока срабатывания в зависимости от тока в пределах - 20% от их номинального тока. Четкое переключение контактов теплового реле осуществляется механической системой.

Наибольшее распространение следующие типы тепловых реле: ТРТ - от 1,75 до 550А; ТРП от 10 до 150А и ТРИ от 0,5 до 32А. Время срабатывания таких реле при токе, равном шестикратному значению номинального тока, находится в пределах 3...20с. Максимальный ток, при котором реле не срабатывает, называется, номинальным током несрабатывания реле ( $I_{н.т.р}$ ).

Номинальный ток теплового реле выбирается по номинальному току защищенного двигателя так, чтобы последний находился в зоне регулировки номинального тока несрабатывания теплового реле

$$I_{\min p} < I_{н.дв.} < I_{\max p}$$

У тепловых реле без температурной компенсации номинальные параметры относятся к температуре окружающей среды 40° С.

## 1.6 Предохранители.

Предохранитель – коммутационный аппарат, автоматически отключающий электрическую цепь, в которую он включен, при коротких замыканиях или больших токовых перегрузках. Действие предохранителя основано на том, что при прохождении тока по плавкой вставке она перегревается и, если сила тока превысит допустимый предел, вставка расплавляется, отключает нагрузку.

Простая конструкция, небольшие размеры и сравнительно малая стоимость обусловили широкое применение предохранителей. Однако им присущи и серьезные недостатки, к числу которых относятся большой разброс срабатывания плавкой вставки до 50% по току, необходимость замены плавкой вставки, всегда, когда она сработала, возможность работы асинхронного двигателя на двух фазах при перегорании предохранителя в одной фазе и др.

Различают предохранители: высоковольтные и низковольтные, общего назначения и быстродействующие. Предохранители общего назначения комплектуются плавкими вставками из цинка, свинца и сплавов этих металлов с медью (ПК, ПН, НПН, ПР-2). Быстродействующие предохранители типа ПНБ, ПП, ППД комплектуются плавкими вставками из серебра, меди и их сплавов.

Для защиты электродвигателей и питающих их сетей могут быть использованы предохранители резьбовые серии ПП24 на токи до 100А, с наполнителями серии НПН2-60 на токи до 63 А, с закрытым патроном с наполнителем ПН2 на токи до 600А и др.

Предохранители выбирают по следующим параметрам:

- 1) номинальному напряжению  $U_{н.п.} \geq U_c$  - напряжение сети, В;
- 2) предельному отключаемому току предохранителя,  $I_{пред.откл.} \geq I_{к.з.}^3$ , где  $I_{к.з.}^3$  - ток трехфазного короткого замыкания в месте установки предохранителя А.

Предельный отключающий ток предохранителя определяет номинальный ток плавкой вставки.

Номинальному току плавкой вставки  $I_{вст.}$  должен быть по возможности наименьшим при соблюдении следующих условий:

$I_{вст.} \geq \frac{I_{р.мах}}{\alpha}$ , где  $I_{р.мах}$  – максимальный рабочий ток цепи, защищаемый предохранителем, А. Для асинхронного электродвигателя:  $I_{р.мах} = I_{п} = kI_{н}$ ,  $I_{н}$ ;  $I_{п}$  – соответственно номинальный и пусковой токи;  $\alpha$  – коэффициент, значение которого

зависит от условий работы электродвигателя. Для двигателей с легкими условиями пуска (нечастые пуски до 15 в час, длительность пуска 5 ... 10 с)  $\alpha = 2,5$ ; для двигателей с тяжелыми условиями пуска (более 5 пусков в час, длительностью от 10 до 40 с)  $\alpha = 1,6 \dots 2$ ;  $k = 5 \div 7$ .

Номинальный ток предохранителя для защиты группы электродвигателей должен быть равен сумме номинальных токов одновременно работающих двигателей или превышать его. При этом предохранитель должен обеспечить нормальный пуск одного из двигателей группы с наибольшим пусковым током при работающих остальных двигателях.

Для группы двигателей, если число их не превышает пяти, ток плавкой вставки определяется по формуле

$$I_{вст.} = \sum I_1^{n-1} + \frac{I_{п.нб.}}{\alpha},$$

где  $\sum I_1^{n-1}$  - сумма токов одновременно работающих электродвигателей, без двигателя с наибольшим пусковым током, А;  $I_{п.нб.}$  - пусковой ток двигателя с наибольшим пусковым током, А.

При количестве электродвигателей больше пяти рекомендуется пользоваться формулой  $I_{вст.} = \sum_1^{n-1} I_n$ ;

Стандартную плавкую вставку выбирают на ток, равный определенному по вышеприведенным формулам или ближайшим к нему.

При установке в цепи последовательно двух или более предохранителей выбранные предохранители следует проверять по селективности защиты. Селективность обеспечивается, если при каждом нарушении режима работы сети отключается предохранитель поврежденного участка, но не срабатывают защитные аппараты в высших звеньях сети.

С достаточной для практики точностью можно считать что при установке однотипных предохранителей напряжением до 1000В селективность будет соблюдена, если плавкие вставки каждых двух последовательно включенных предохранителей отличается одна от другой не менее чем на две ступени по шкале номинальных токов плавких вставок по справочнику.

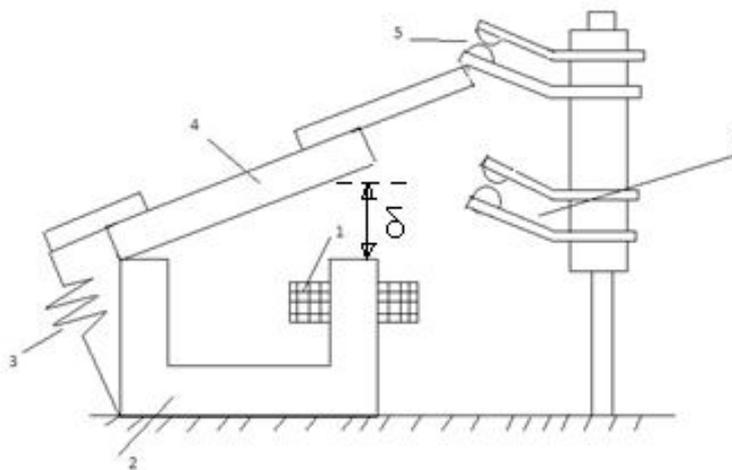
В инженерной практике для определения диаметра провода вставки при его замене в производственных условиях можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$d = \sqrt[3]{\left(\frac{I_{вст}}{\alpha}\right)^2},$$

где  $d$  - диаметр порода, мм;  $\alpha$  - коэффициент материала: 0,8 – медь; 0,59 – алюминий; 24,6 – железо; 2,8 – олово; 10,8 – свинец.

## 1.7 Электромагнитные контакторы

Контактор – это коммутационный аппарат, предназначенный для частых коммутаций электрических цепей при номинальных и пусковых токах, приводимый в действие электромагнитным приводом постоянного либо переменного тока. На рисунке 1.12 приведена конструкция электромагнита контактора.



**Рисунок 1.12 Конструкция электромагнита контактора**

Электромагнит содержит катушку (1), сердечник (2), возвратную пружину (3), якорь (4) – подвижная часть магнитной системы, размыкающие и замыкающие контакты (5,6).

Принцип действия и устройство электромагнитных контакторов и электромагнитных реле одинаковы. Разница состоит в назначении: контактор замыкает и размыкает силовую цепь, где токи могут достигать нескольких сотен и тысяч ампер. Это требует больших усилий электромагнита привода, системы дугогашения, специальных мер по механической прочности, снижению вибраций при ударах. Статистические, тяговые и механические характеристики контакторов подобны электромагнитному реле.

Реально для электромагнита реле или контакторов, имеющих обмотку напряжения, процесс срабатывания при включении и отключении имеет динамический характер т.к. ток в катушке

электромагнита, обладающей достаточно большой индуктивностью  $L_k$ , не может измениться мгновенно. После подачи напряжения на обмотку, ток в ней и поток в сердечнике нарастает по экспоненциальному закону до тех пор, пока сила притяжения якоря электромагнита не станет равной противодействующей силе возвратной пружины (точка «а», рис. 1.13).

После этого якорь начинается двигаться, ток и поток электромагнита изменяются по сложному закону, определяемому параметрами электромагнита ( $L_k \text{ var}$ ), и противодействующей силой возвратной пружины. После достижения якорем конечного положения (точка «в») ток и поток будут изменяться по экспоненте при  $L_k = \text{const}$  до тех пор, пока не достигнут установившихся значений:  $I_y = \frac{\vartheta_k}{R_k}$ ;  $\Phi = \frac{I_y \cdot W_k}{R_M}$ ,

где  $\vartheta_k$  – напряжение на катушке;

$R_k$  – активное сопротивление катушки;

$W_k$  – число витков обмотки катушки;

$I_y \cdot W_k$  – магнитодвижущая сила электромагнита;

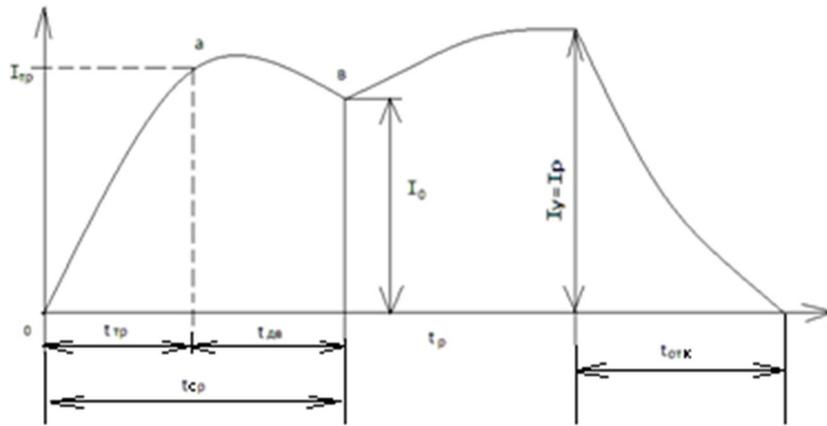
$R_M$  – магнитное сопротивление цепи (стальной сердечник + зазор).

Время срабатывания электромагнита  $t_{cp}$  – это время с подачи напряжения на обмотку до момента остановки якоря:

$$t_{cp} = t_{тр} + t_{дв},$$

где  $t_{тр}$  – время трогания, с момента подачи напряжения до начала движения якоря;  $t_{дв}$  – время движения якоря из начального положения до конечного.

Изменение тока в обмотке электромагнита при включении и отключении представлено на рис. 1.13.



**Рисунок 1.13 Изменение тока в обмотке электромагнита в функции времени**

Рассмотрим более подробное время срабатывания электромагнита.

Время трогания. После включения электрической цепи согласно закону Кирхгофа:

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt};$$

При ненасыщенной магнитной системе (зазор  $\delta$  большой. Рис.1.12) индуктивность обмотки катушки  $L_k = \frac{W_k^2}{R_M}$  постоянна, поэтому

$$U = iR_k + L_k \frac{di}{dt}.$$

Решение этого уравнения

$$i = I_y (1 - e^{-t/T_n}) = \frac{U_k}{R_k} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right),$$

где  $T_n = \frac{L_k}{R_k}$  - постоянная времени цепи при  $\delta = \delta_n$  ( $\delta_n$  - зазор между якорем и магнитопроводом перед пуском).

Ток обмотки, при котором начинается трогания якоря, называется током трогания  $I_{тр}$ . При этом

$$I_{тр} = I_y \left( 1 - e^{-\frac{t_{тр}}{T_n}} \right), \text{ следовательно время трогания:}$$

$$t_{тр} = \frac{L_k}{R_k} \ln \frac{1}{1 - \frac{I_{тр}}{I_y}};$$

С начала движение якоря (точка «а») зазор  $\delta$  и  $R_M$  уменьшаются, а индуктивность  $L_k = \frac{W_k^2}{R_M}$  увеличивается. В этом случае уравнения по закону Кирхгофа примет вид

$$U = iR_k + L_k \frac{di}{dt} + i \frac{dL_k}{dt};$$

При движении якоря  $i$  и  $di/dt$  начинают уменьшаться, причем чем выше скорость якоря, тем больше спад тока. В точке «в» (крайнее положение якоря,  $\delta = \delta_k$ ) уменьшение тока прекратиться и далее

$$i = I_0 e^{-t/T_k} + I_y (1 - e^{-t/T_k}),$$

где  $T_k$  – постоянная времени цепи при  $\delta = \delta_k$ .

Таким образом, во время движения якоря, когда зазор меняется от начального  $\delta_n$  до конечного  $\delta_k$  значения, ток в обмотке меньше установившегося  $I_y = \frac{\vartheta_k}{R_k}$ . Следовательно, и сила тяги развиваемая электромагнитом в динамике меньше чем в статике  $i = I_y$ .

Время движения зависит от коэффициента запаса  $K_3 = I_y/I_{тр}$ , параметров магнитной цепи (индуктивности обмотки), массы подвижных частей.

Процесс движения якоря описывается нелинейным уравнением для электромеханической системы и здесь не рассматривается.

Отпускание электромагнита. При размыкании цепи обмотки электромагнита ток и рабочий поток начинают уменьшаться (отключении цепи  $L - R$ ). В момент, когда сила тяги электромагнита становится меньше усилия пружины, происходит отпускание якоря. Затем его движение происходит за счет усилия пружины, при этом скорость движение якоря во многом определяется массой подвижных частей.

В современных контакторах время срабатывания при включении  $t_{ср} = (0,2 \div 0,1)$  с. И при отключении  $t_{ср} = (0,1 \div 0,05)$  с.

Ускорение и замедление срабатывания электромагнитов постоянного тока может быть достигнуто несколькими путями:

а) специальные схемы форсировки, когда включённый в цепь обмотки резистор на время  $t_{ср}$  шунтируется размыкающимися контактами или конденсатором;

б) повышение напряжения питания обмотки, т.е. увеличение коэффициента запаса  $K_3 = \frac{U_{раб.}}{U_{тр}}$ ;

в) установка короткого замыкания обмотки (витка) на магнитопроводе в виде медной или алюминиевой гильзы.

г) применение сердечника из хорошо расслоенной стали. Способы а), б), г) – для уменьшения времени срабатывания, а в) для замедления.

Сила тяги электромагнита (р) с одним зазором при насыщенной магнитной системе ( $\mu_c \gg \mu_0$ ) определяется согласно выражению:

$$P = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2 S}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{\phi_\delta^2}{\mu_0 \cdot S} = \frac{1}{2} F^2 / \frac{\mu_0 S}{\delta^2},$$

где  $B_\delta, \phi_\delta$  – индукции, [Тл] и магнитный поток, [Вб] в рабочем зазоре;  $\delta$  – зазор, [м];  $F = i \cdot w$  – намагничивающая сила катушки, [А].

Следовательно, статистическую тяговую характеристику  $P(\delta)$  при  $I - const$  можно получить экспериментально, измеряя непосредственно усилия  $P$  при различных значениях зазора или рассчитывая по значениям  $B_\delta$  и  $S$ ;  $\phi_\delta$  и  $S$ ;  $F, S$  и  $\delta$ .

Напряжение на контактах в момент достижения током нулевого значения называется напряжением гашения дуги –  $\vartheta_{\text{гаш}}$  :

$$\vartheta_{\text{гаш}} = \vartheta + \left| L \frac{di}{dt} \right|_{t=0};$$

Напряжение  $L \frac{di}{dt}$  приложено к индуктивности отключаемой цепи (асинхронный двигатель, обмотки возбуждения МПТ и др.) Оно может в десятки раз превышать напряжение источника и приводить к пробое изоляции нагрузки.

## 1.8 Электромагнитное реле и контакторы переменного тока.

Наибольшее распространение получили электромагнитные реле переменного тока, принцип действия которых тот же, как и у контакторов, с той лишь разницей, что их масса и габариты значительно меньше. В зависимости от исполнения различают токовые электромагнитные реле, воспринимающую катушку которых включают последовательно с нагрузкой, и электромагнитные реле напряжения, катушку которых включают параллельно нагрузке. Токовые реле, как правило, защитные, а реле напряжения – промежуточные.

Контакты переменного тока (с питанием обмотки переменным током) выпускаются на различные токи (до 1000 А) при числе главных контактов от одного до пяти. Наличие большого числа контактов требует увеличения усилия электромагнита, необходимого для включения контактора. Отключение его происходит под действием контактных пружин и массе подвижных частей.

Ток ( $I$ ) в катушке контактора при  $U_k = const$  определяется значением активного и индуктивного сопротивлений

$$I = \frac{U_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}, \text{ где } R_k \approx \frac{l}{\gamma \cdot S_{\Pi}}, \text{ } l - \text{ длина проводника, } \gamma - \text{ удельная}$$

электропроводность материала провода (для меди  $\gamma_2 = 5,7 \cdot 10^7 \text{ см/м}$ ),  $S_{\Pi}$  – площадь поперечного сечения материала проводника,  $X_k = \omega Lk = 2\pi \int \frac{W_k^2}{R_M}$  – индуктивное сопротивление катушке,  $W_k$  – число витков в катушке,  $R_M$  – магнитное сопротивление контура магнитного потока.

При  $\mu_c \gg \mu_0, R_M \cong R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $S$  – площадь поперечного сечения полюса.

Активное сопротивление катушек обычно невелико ( $R_k \cong 5 \div 30 \text{ Ом}$ ) поэтому ток определяется в основном реактивным сопротивлением  $X_k$ , которое, в свою очередь, в сильной степени зависит от зазора  $\delta$  или магнитного сопротивления  $R_{\delta}$ . Следовательно, с момента включения ток нарастает до максимальной величины

$$(\delta \rightarrow \delta_n \rightarrow \max, R_M \rightarrow \max, L_k \rightarrow \min, X_k \rightarrow \min)$$

На рисунке 1.14 приведен график зависимости тока  $i$  катушки электромагнита от времени  $t$ .

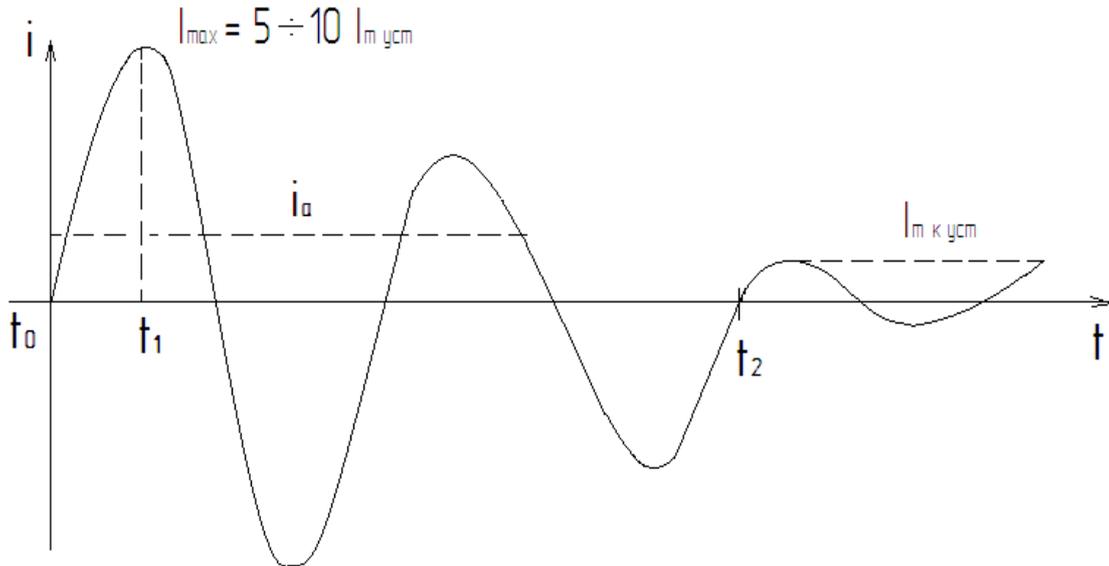


Рисунок 1.14 Зависимость тока катушки электромагнита в функции времени.

В момент  $t_1$ , якорь начинает движение, до  $t_2$  зазор уменьшается,  $L_k$ ,  $X_k$  – увеличиваются, а ток  $I$  снижается. В момент  $t_2$  якорь останавливается, зазор  $\delta_k = \delta_{min}$  (или  $= 0$ ) ток резко падает. В связи с большим пусковым током ( $\frac{I_{max}}{I_{уст}} = 5 \div 10$ ) недопустима подача напряжения на катушку, если якорь по каким-либо причинам удерживается в отпущенном положении, когда  $\delta = \delta_{max}$ .

Срабатывание и отпускание электромагнита переменного тока происходит быстрее, чем электромагнита постоянного тока ( $t_{ср} = 0,03 \div 0,05с$ ,  $t_{отп} = 0,12с$ ). Они обеспечивают надежную работу в диапазоне напряжения  $U_k = (0,8 \div 1,1)\vartheta_H$ .

В контакторах переменного тока магнитную систему выполняют шихтованной из отдельных пластин электротехнической стали. Так как катушка контактора переменного тока питается однофазным током, то магнитный поток магнитной системы периодически проходит через нуль. Это вызывает вибрацию и гудение контактора. Для ослабления этого явления на торце сердечника контактора переменного тока впрессовывают медный или алюминиевый короткозамкнутый виток. Магнитный поток от индуцированного тока к.з. витка максимален, когда основной магнитный поток от катушки включения проходит через нуль и тем самым препятствует отпадению и вибрации якоря.

Разновидность контакторов переменного тока - магнитные пускатели, представляющие собой комплектное коммутационное устройство, состоящего из одного (не реверсивный) или двух (реверсивный) контакторов с возможностью сочетания с защитным тепловым реле. Наиболее распространены магнитные пускатели управления и защиты электроустановок переменного тока мощностью от 100Вт до 75кВт. Катушки электромагнитов магнитных пускателей чаще всего рассчитаны на номинальное переменное напряжение 220 или 380В.

Все типы магнитных пускателей защищают управляемые ими двигатели, отключая их при снижении напряжения в питающей сети до (0,3 ... 0,4 U) и предотвращая их самозапуск после восстановления напряжения.

Пускатели серии НМЛ выпускают на номинальные токи 10А (ПМЛ-1000), 25А (ПМЛ-2000) 40А (ПМЛ-3000), 63А (ПМЛ-4000), 80А (ПМЛ-5000), 125А (ПМЛ-6000) и 200А (ПМЛ-7000). Пускатели серии ПМЛ комплектуются тепловым реле РТЛ, а также снабжаются приставками (контактными ПКЛ для увеличения количества коммутируемых вспомогательных цепей). Промежуточные реле РПЛ комплектуются приставками выдержки времени и приставками памяти ППЛ (по заказу), Степень защиты - 1000 и 1054.

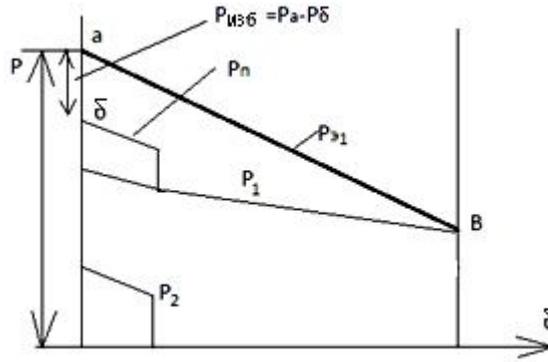
Пускатели ПМА выпускаются на номинальные токи 40А (ПМА-3000), 63А (ПМА-4000), 100А (ПМЛ-5000) и 160А ПМА-6000).

ПМА-0000 имеет номинальный ток 6,3А, комплектуется тепловым реле РТТ-89.

## **1.9 Электромагнитное реле и контакторы постоянного тока.**

Электромагнитное реле благодаря простоте конструкции и надежности широко распространены в схемах электропривода и защиты энергосистем. Они приводятся в действие с помощью электромагнитов постоянного или переменного тока.

На рис. 1.14 изображена тяговая и противодействующая (механическая) характеристика реле постоянного тока с магнитной системой клапанного типа.



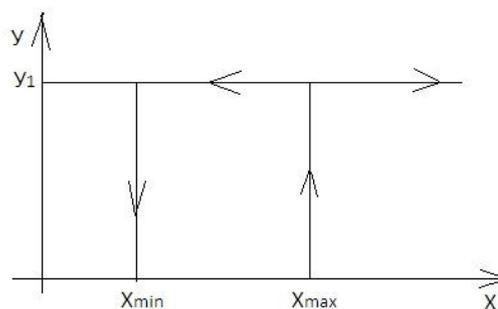
**Рисунок 1.14 Тяговая и механическая характеристика контактора постоянного тока.**

На рисунке 1.14  $P_1$  и  $P_2$  усилие возвратной и контактной пружин. Для работы реле необходимо, чтобы тяговая характеристика реле  $P_{31}$  во всех точках хода якоря шла выше суммарной противодействующей характеристике  $P_n = P_1 + P_2$ . Срабатывание реле определяется точкой «В» (зазор  $\delta = \delta_n$ ) (Рис. 1.13). Для включения реле ток в обмотке реле  $I_{раб} > I_{тр}$ , где  $I_{тр}$  – ток трогания. Коэффициент запаса при этом  $K_3 = \frac{I_{раб}}{I_{тр}} = 1,4$  (обычно)

Для реле напряжения

$$K_3 = \frac{\vartheta_{раб}}{\vartheta_{тр}} = 1,4;$$

На рис. 1.15 приведена диаграмма работы реле.



**Рисунок 1.15 Диаграмма работы реле.**

При достижении напряжения (тока) контролируемой цепи значения  $X_{max}$  происходит скачкообразное изменение выходного параметра  $Y = Y_1$ , величина которого не изменяется при дальнейшем изменении  $X$ . При уменьшении  $X$  до  $X_{min}$  следует

изменение выходного параметра  $Y_1$ , до 0. Такая характеристика называется релейной. Для ряда реле очень важно отношение  $\frac{X_{min}}{X_{max}}$ , называемой коэффициентом возврата  $K_B$ . Для реле тока  $K_B = \frac{I_{отн}}{I_{тр}}$ , для реле напряжения  $K_B = \frac{\vartheta_{отн}}{\vartheta_{тр}}$ , где  $I_{отн}$ ,  $\vartheta_{отн}$  - ток и напряжение отпускания,  $I_{тр}$ ,  $\vartheta_{тр}$  - ток и напряжение трогания.

Величину коэффициента возврата, уставку (параметр срабатывания) и время срабатывания реле при включении и отключении можно изменить за счет регулирования натяга отключающей пружины, зазора между якорем и сердечником катушки привода реле, введением дополнительных немагнитных прокладок в зазор (изменяют  $\delta$ ), а также путем установки на магнитопроводе электромагнитных демпферов (к.з. витков, гильз из немагнитного материала).

Для максимального реле всегда  $K_B < 1$ . Чтобы увеличить  $K_B$  (в идеале  $K_B \rightarrow 1$ ) необходимо максимально сблизить тяговую и противодействующую характеристики с целью уменьшения  $P_{изб}$ .

Распространённые серии контакторов постоянного тока: КП, КПВ, КПД, КМВ, КМ, РК, КМН. Переменного тока: КТ, КТП, КТПВ, КВДК, КТД, К, КНТ выполняют на токи от единицы до 1000-2500А. Собственное время срабатывания контакторов 0.03...0,6с.

## 1.10 Реле

Реле - слаботочный аппарат, применяемых в устройствах автоматики и защиты для коммутации электрических цепей. В реле при плавном или ступенчатом изменении входного (управляющего) сигнала (электрической, тепловой, механической и т.п) происходит скачкообразное изменение значение выходной (управляемой) величины.

По конструктивному исполнению реле делят на контактные и бесконтактные, по назначению - на реле управления и защиты.

В схемах автоматики и защиты часто требуется выдержка времени между срабатываниями двух или нескольких аппаратов, например при пуске асинхронных двигателей переключением со звезды на треугольник. Для создания выдержки времени служат реле времени.

Основное требование к таким реле – стабильность выдержки времени при колебаниях: напряжения, частоты питания, температуры окружающей среды и др. Реле времени бывает с электромагнитным и механическим замедлением, электронные, гидравлические и т.п.

Электромагнитное замедление используется в аппаратах постоянного тока, выдержки времени при этом 0,2 -10 с. Выдержки до 1 с. получают использованием электромагнитных демпферов (гильз – витков) при включении, а свыше 1 с. – при отпуске якоря.

Реле времени с механическим замедлением (пневматическим или анкерным механизмом) могут питаться как постоянным, так и переменным током. Они позволяют регулировать выдержку времени до 180 с. (пневматический механизм) и до 17 с. (анкерный). Электромагнит в таких реле служит для сжатия (взведения) пружины, которая затем отработывает время в соответствии с уставкой.

Наибольшее распространение получили электромагнитные реле, принцип действия которых тот же, как и у контакторов, с той лишь разницей, что их масса и габариты значительно меньше. В зависимости от исполнения различают токовые электромагнитные реле, воспринимающую катушку которых включают последовательно с нагрузкой, и электромагнитные реле напряжения, катушку которых включают параллельно нагрузке. Токовые реле, как правило, защитные, а реле напряжения – промежуточные.

Наибольшее распространение получили электронные полупроводниковые реле времени, например серии ВЛ обладающие малыми габаритами и повышенной надёжностью.

Для повышения надёжности и износостойкости контактов применяют герконовые реле, которые представляют собой малогабаритные устройства с герметизированными магнитоуправляемыми контактами (герконами), коммутацию которых осуществляет магнитное поле управляющей (воспринимающей) катушки.

В нормальном состоянии при обесточенной управляющей катушке упругий контакт геркона находится в исходном состоянии и его контакты замкнуты или разомкнуты. При подключении управляющей катушки к источнику постоянного напряжения созданный ею магнитный поток переключит контакты геркона в другое устойчивое состояние, т.е произойдёт их прямая коммутация.

При отключении управляющей катушки упругие контакты герконов вернутся в исходное состояние, т.е. произойдет обратная коммутация. Износоустойчивость геркона достигает десятков и сотен миллионов срабатываний. Продолжительность срабатывания  $(0,8... 10) 10^{-3}$  с. Они способны осуществлять коммутацию токов до 5А при напряжении от 30 до 5000В. Основные типы герконовых реле: напряжения - РНГ, тока - РТГ, времени - РВГ.

Путевой выключатель представляет собой коммутационный аппарат, переключающийся рабочим механизмом или его исполнительными органами при их движении. Путевой выключатель, установленный для ограничения конечного положения называют конечным. В зависимости от вида привода путевые или конечные выключатели бывают нажимными, рычажными и вращающимися. Применяют и герконовые - путевые выключатели с управлением от постоянных магнитов, устанавливаемых на движущихся исполнительных органах механизмов.

### **1.11 Бесконтактные аппараты.**

Создание надежных и быстродействующих бесконтактных электрических аппаратов с высокими технико-экономическими показателями стало возможным благодаря процессу в области производства высококачественных полупроводниковых приборов. Важные преимущества бесконтактных аппаратов по сравнению с контактными обуславливаются отсутствием контактов и подвижных частей. Основные из них:

- высокая скорость и частота переключения;
- долговечность;
- простота обслуживания;
- механическая стойкость;
- способность работать во взрывоопасных и загрязненных средах;
- уменьшенный уровень радиопомех;
- безшумность в работе.

Следует отметить, что этот не полный перечень преимуществ бесконтактных аппаратов вовсе не исключает целесообразность применения контактных. Они не конкурируют, а дополняют друг

друга. Предпочтение следует отдавать тем из них, которые в конкретных условиях наиболее полно отвечают предъявляемым требованиям.

Интенсивное развитие силовой полупроводниковой техники определило появление целого ряда новых научно-технических направлений в области электроаппаратостроения. Появилась возможность создания коммутационных и защитных аппаратов, отличающиеся быстродействием и коммутационным ресурсом, недоступным для традиционных электромеханических аппаратов. Эти свойства, а также преимущества перечисленные выше обусловили широкое использование высоконадежных полупроводниковых (электронных) аппаратов.

### **1.12 Тиристорные пускатели.**

В автоматических системах управления все более широкое применение находит бесконтактная аппаратура, в состав которой входят тиристорные пускатели.

Коммутирующим элементом данных аппаратов является тиристор - простейший управляемый вентиль, представляющий собой четырехслойный полупроводниковый прибор, пропускающий ток в одном направлении.

Тиристор открывается тогда, когда на его управляющий электрод подаётся небольшой положительный потенциал (4...8В) по отношению к катоду. После открывания тиристора управляющий сигнал не влияет на состояние тиристора, который остаётся открытым до тех пор, пока анодный ток практически не снизится до 0.

В пускателях применяют силовые тиристоры серии «Т» с воздушным охлаждением, выбираемые по току и напряжению.

Тиристор может выдерживать весьма кратковременные (порядка миллисекунд) перегрузки по току. Поэтому допускаемый ток перегрузки вентиля должен быть больше пускового, а максимальное напряжение выбираемого тиристора должно, быть не менее амплитудного значения напряжения прикладываемому к тиристорам в прямом или обратном направлении. В тиристорных пускателях, например, на номинальный ток 16А используют тиристоры предельный ток которых 160А.

Тиристорные пускатели имеют следующие преимущества перед электромагнитными: отсутствие искрообразования, высокая механическая прочность и стойкость к воздействию ударов и вибраций, продолжительный срок службы, малое время включения отключения, бесшумность в работе и малая мощность управления.

В настоящее время промышленность выпускает тиристорные пускатели серии ПТ-16-3 80-У5, ПТ-40-380 УГ (нереверсивные) ПТ-16-380Р-У5 и ПТ-40-380Р-У5 (реверсивные) на номинальные токи 16 и 40А. Тиристорные пускатели используют для управления нерегулируемыми приводами с высокой частотой включений.

### 1.13 Общая характеристика полупроводниковых аппаратов высокого напряжения.

Практическая задача реализации высокого напряжения связана с решением комплекса сложных задач, обусловленных прежде всего групповым (последовательным и параллельным) соединением большого числа полупроводниковых приборов. Главные из этих задач можно сформулировать на основе анализа режимов работы силового блока аппарата. На рис. 1.16 показан силовой блок полупроводникового аппарата переменного тока в однополюсном исполнении.

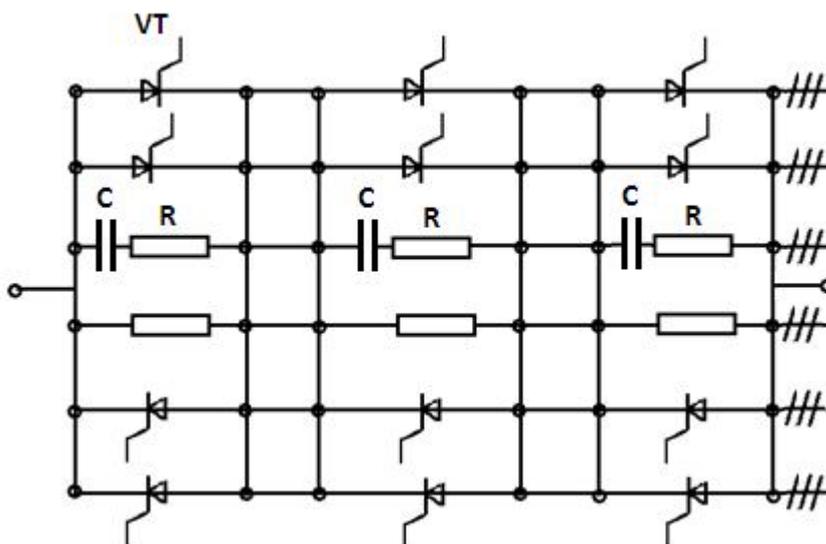


Рисунок 1.16 Силовой блок аппарата переменного тока.

В каждом направлении тока тиристоры (VT) соединены последовательно и параллельно в количестве, обеспечивающем расчетные параметры соответственно по напряжению и току

проектируемого аппарата. С учетом ограничений мощности единичных приборов общее их число в блоке может достигать нескольких десятков. Очевидно, что главная цепь аппарата в этом случае будет содержать множество жестких контактных соединений. Необходимо, следовательно, принимать специальные меры, позволяющие обеспечить низкие переходные сопротивления контактов и высокий уровень их надежности.

Другие задачи связаны с характеристиками силовых полупроводниковых приборов (СПП) (тиристоров). Являясь быстродействующими ключевыми элементами, тиристоры не обладают идеальными для применения в аппаратах свойствами: и в состоянии высокой проводимости, и в закрытом состоянии в них происходит выделение относительно большого количества теплоты. В среднем на каждые 100 А тока в прямом направлении потери мощности в тиристорах при полном угле открывания ( $\beta = 180$ ) составляет около 200 Вт. Следовательно, в тиристоре при среднем токе 1000 А мощность потерь только в открытом состоянии равна 2кВт. Существенными являются также потери, обусловленные протеканием токов утечки, если приборы работают при напряжениях, близких к предельно допустимым. При большом числе тиристоров в силовом блоке рассеивание выделяемой мощности потерь может быть осуществлено только при использовании специальной системы охлаждения. Как правило, каждый тиристор снабжается индивидуальной системой принудительно воздушного охлаждения. В любом случае создание системы охлаждения требует сложных технологических решений, увеличивает массу и габариты силового блока.

По сравнению с аппаратами низкого напряжения тиристорные аппараты высокого напряжения имеют более сложную систему управления. Это объясняется не только увеличением числа СПП в силовых блоках. Более жесткими являются требования к параметрам цепей управления импульсов. Здесь следует отметить, что при создании системы управления должны быть решены вопросы, связанные с распределением управляющих импульсов по тиристорам, синхронизацией их с кривой тока или напряжения, обеспечением надежной электрической изоляции между силовой цепью, находящейся под высоким напряжением, и управляющими цепями.

Сложные проблемы возникают также из-за неидентичности характеристик соединенных в группы диодов и транзисторов.

Например, при последовательном соединении разброс характеристик СПП по быстродействию при включении и выключении, а также различия по токам утечек в непроводящем состоянии могут вызвать неравномерное распределение по ним напряжения. Для уменьшения разброса напряжения по полупроводниковым приборам находят применение RC элементы цепей (Рис. 1.16), параметры которых зависят от многих факторов и в каждом случае находятся на основе оптимизации, учитывающей свойства СПП.

Рассмотренные технические сложности не являются сдерживающим фактором для создания полупроводниковых аппаратов на напряжение вплоть до 110кВ. Но уже при напряжении 10кВ и номинальном токе, при котором необходимо соединить параллельно более двух приборов, выполнение таких аппаратов требует больших затрат. Поэтому в настоящее время экономически оправданным является создание полупроводниковых аппаратов на напряжении 6 и 10кВ и комбинированных контактно-полупроводниковых аппаратов на напряжении до 35 кВ.

Так как и при таких напряжениях стоимость и массогабаритные показатели остаются высокими, полупроводниковые аппараты следует рассматривать как аппараты специального назначения. Они должны использоваться в тех случаях, когда другие аппараты оказываются неспособными удовлетворить требования по быстродействию, коммутационному ресурсу, надежности работы при большой частоте повторения операций. Эффективным является их использование в испытательных стендах для высоковольтного оборудования.

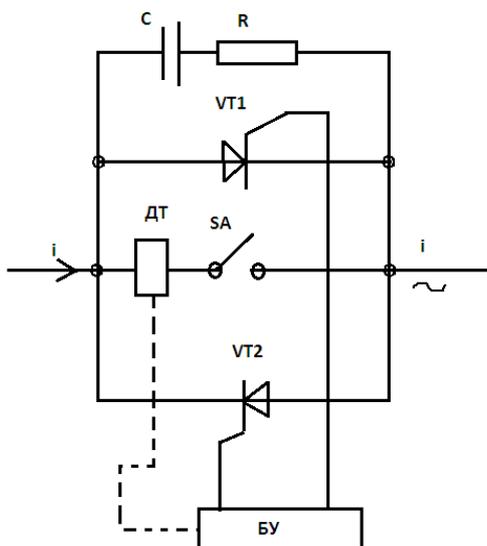
### **1.14 Гибридные электрические аппараты.**

Стремление совместить в аппаратах положительные качества контактных (малые потери мощности и габариты) и бесконтактных (повышенная износостойкость, меньшие эксплуатационные затраты и бездуговая коммутация) привело к созданию гибридных или комбинированных аппаратов, в которых ток во включенном состоянии проходит через контакты, а коммутация его выполняется силовыми полупроводниковыми приборами, включенными параллельно контактам. Такое сочетание позволило создать гибридные контакторы с коммутационной износостойкостью в 20-50 раз большей, чем в контактных; гибридные переключатели питания с

временем переключения, равным времени переключения полупроводниковых переключателей, но с габаритами и массой, меньшей 2-3-раза; гибридные быстродействующие выключатели со значительно меньшим защитным интегралом, недостижимым для контактных выключателей, и со сниженным в 2-3 раза габаритами по сравнению с габаритами полупроводниковых выключателей.

Гибридные аппараты обеспечивают также существенную экономию материалов, в первую очередь стали и меди, что является в настоящее время важной задачей электротехнической промышленности.

В гибридном аппарате (Рис. 1.17) контакты выключателя SA шунтированы полупроводниковой приставкой из двух тиристоров VT1 и VT2. При подаче управляющего тока на тиристоры из блока управления (БУ) тиристоры будут подготовлены соответственно к проведению положительной или отрицательной полуволне тока. При снятии сигнала от БУ они не будут проводить ток при подаче напряжения в цепь, а если ток проходил через них, то они прервут его при первом же прохождении его через нулевое значение.



**Рисунок 1.17 Гибридный аппарат с тиристорами.**

Во включенном состоянии контактов SA весь ток проходит через них. Тиристоры даже при наличии управляющего сигнала на управляющих электродах будут закрыты, т.к. анодное напряжение на них, равное напряжению на контактах недостаточно для их открывания – оно меньше порогового напряжения для VT1 и VT2 ( $\approx 1В$ ). Тиристоры без тока не нагреваются, что существенно облегчает режим их работы.

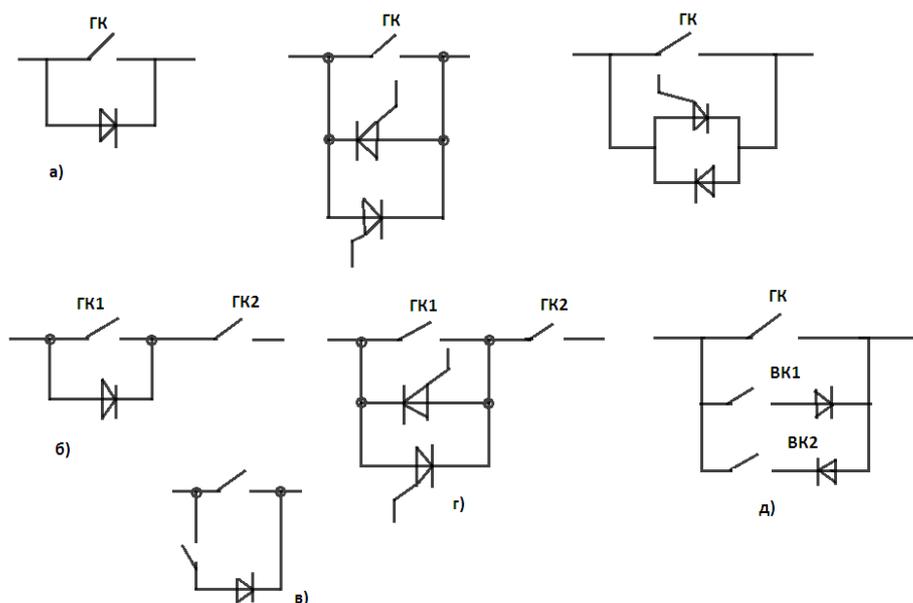
Таким образом, при протекании тока через контакты SA тиристоры подготовлены к открытию. В начальной стадии размыкания контактов, как только напряжение на образующей дуге превысит пороговое значение напряжения тиристоров, один из тиристоров откроется соответственно направлению полуволны тока и ток с контактов SA пройдет через этот тиристор. За это время контакты разойдутся на необходимые изолирующие расстояние. Обратная полуволна тока через них не пройдет. Он не пройдет и через другой тиристор, если управляющие сигналы от блока управления (а также датчика тока ДТ) на управляющие электроды тиристоров будут сняты.

Построенные на основе полупроводниковых элементов коммутационные аппараты не имеют контактов и подвижных частей и отключают цепь без образования дуги. Они осуществляют операцию коммутации очень быстро (микросекунды) и являются быстродействующими (допускают частоту коммутации 1000 1/ч и выше). Обладая многочисленными преимуществами, они имеют и недостатки (в сравнении с контактными). Так, им свойственно относительно высокое падение напряжения и большие тепловые потери при протекании тока. Глубина коммутации и изоляционные свойства в открытом состоянии у них существенно ниже, чем у контактных. Поэтому полупроводниковые аппараты нашли применение преимущественно при небольших токах и напряжениях, а также при частой коммутации.

Промышленность выпускает ряд серий гибридных контакторов постоянного и переменного тока на напряжении до 1000В.

Гибридные контакторы состоят из следующих основных узлов: главных контактов (ГК); привода (в основном электромагнитного); силовых полупроводниковых приборов (СПП), включенных непосредственно или через промежуточные контактные узлы параллельно главным контактам; схемы принудительной коммутации; схемы управления; защиты СПП от перенапряжений.

Силовые схемы гибридных контакторов переменного тока (основные) (Рис. 1.18)



**Рисунок 1.18 Силовые схемы гибридных контакторов переменного тока.**

Силовые схемы гибридных контакторов переменного тока подразделяются из следующих критериев: длительности горения дуги; определенная коммутационная износоустойчивость; количество корпусов СПП (что определяет габариты и стоимость); наличие гальванической развязки между входными и выходными зажимами; область применения; необходимость специального привода для управления контактами; возможность использования базовых серийных контакторов обеспечивающих бездуговую коммутации.

Гибридные контакторы постоянного тока.

Принцип коммутации аналогичен контакторам переменного тока: перевод тока из цепи контакторов во вспомогательную параллельную цепь и последующее прерывания тока. В связи с необходимостью принудительного прерывания тока во вспомогательной цепи, силовые схемы более многообразны и сложны по сравнению с контакторами переменного тока. Аналогично им схемы могут быть разделены на две группы: с ограничением времени горения дуги на контактах и с полностью бездуговой коммутацией.

Основные схемы (некоторые) первой группы (Рис.1.19):

В схеме а) после размыкания контактов и образования дуги происходит разряд конденсатора через тиристор. В один из переходов тока через нуль возможно гашение дуги. б) недостатки предыдущей схемы, вызванные малой скоростью деионизации устранены включением диода, который закрывается в период отпирания

тиристора. Недостатки потери напряжения и мощности на диоде. в) здесь устранены недостатки предыдущей схемы. Наименьшие габариты в сочетании с наиболее простой и надежной схемой управления имеют контакторы, выполненные на силовых транзисторах. Полная управляемость транзисторов позволяет устранить необходимость в коммутирующих конденсаторах и в сложной схеме их включения. Для реверсивных контактов транзисторы включаются параллельно контактам через диоды. Однако сдерживающим фактором применения гибридных силовых схем на транзисторах пока является их повышенная стоимость.

Рассмотренные принципы создания комбинированных аппаратов, а также их характеристики присущи в основном комбинированным аппаратам и высокого напряжения.

Технико-экономическое сравнение контакторов различных типов.

Ном. ток А	Контактные	Гибридные	Тиристоры	
160	$I_{\text{к}}$	385	576	413
	$N_{\text{к}}$	0,2	5	20
	$N_{\text{м}}$	10	10	20
	$V$	26,5	36,7	179
	$M$	10,9	23	100

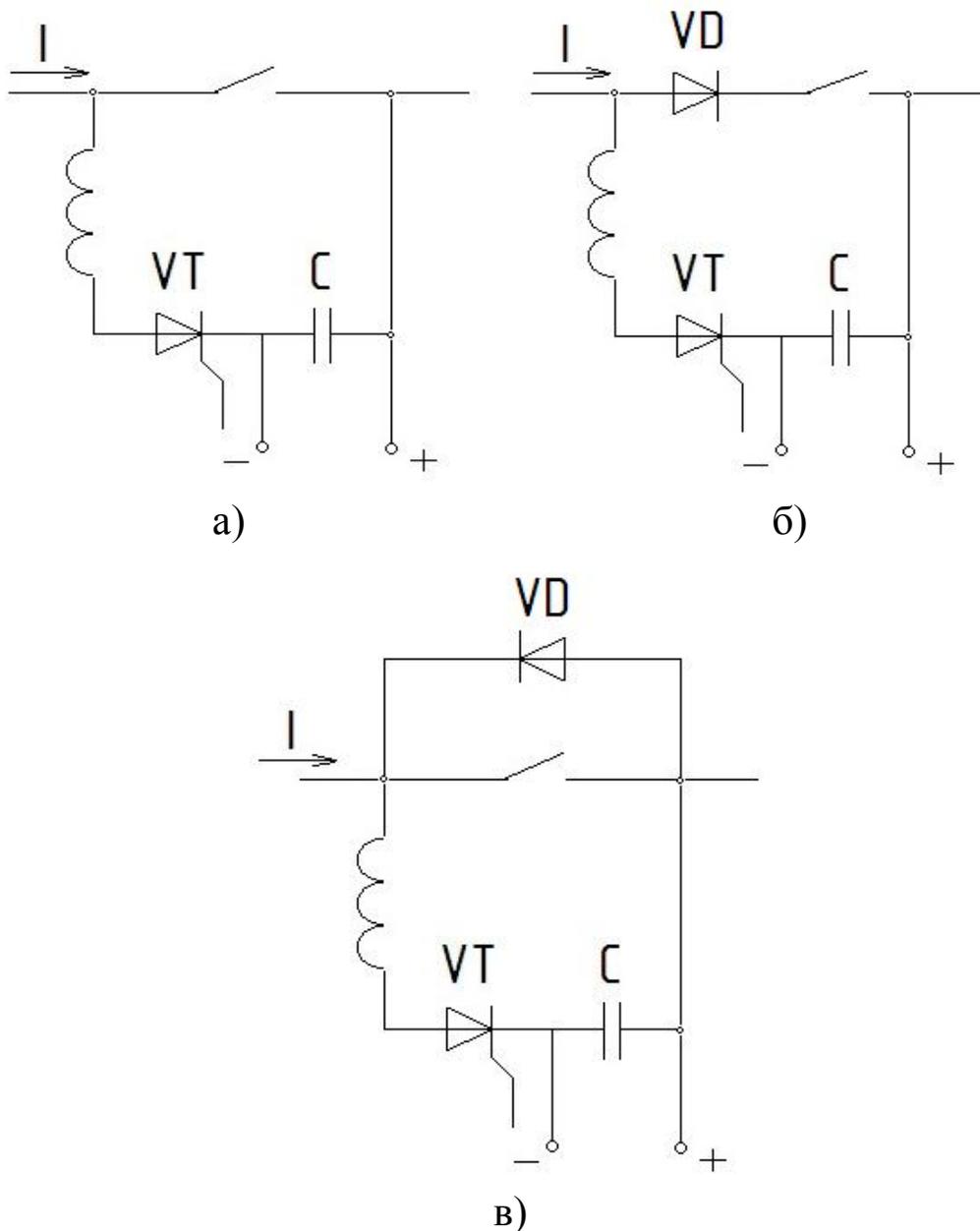
$I_{\text{к}}$  - максимальный ток в режиме применения;

$N_{\text{к}}$  - коммутационная износостойкость, мил. циклов;

$N_{\text{м}}$  - механическая износостойкость мил. циклов;

$V$  – объем, дм<sup>3</sup>;

$M$  - масса, кг.

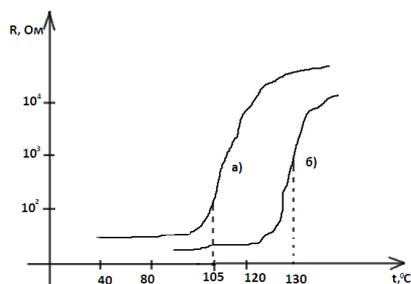


**Рисунок 1.19 Силовые схемы гибридных контакторов постоянного тока.**

### **1.15 Встроенная температурная защита (УВТЗ-М).**

Все возрастающее количество электроприводов в производстве вместо теплового реле используют встроенную температурную защиту. Эта защита состоит из температурных датчиков и управляющего устройства. Температурными датчиками служат полупроводниковые терморезисторы - позисторы, встроенные в лобовую часть обмотки статора (по одному в каждую фазу). Наибольшее применение для датчиков встроенной температурной

защиты находят позисторы СТ14-1А ( $t_{cp} - 130^{\circ}\text{C}$ ) и СТ 14 ( $t_{cp} - 105^{\circ}\text{C}$ ), изготовляемых в виде дисков диаметром 3 мм и толщиной 1,5 мм. На температурных характеристиках позисторов виден почти скачкообразный характер изменения сопротивления в узких интервалах критических температур, соответствующих классу изоляции обмотки (Рис. 1.20).



**Рисунок 1.20 Температурная характеристика позисторов СТ 14(а) и СТ14-1А (б)**

Устройство управления устанавливают отдельно в шкафах или станциях управления. Габариты устройств УВТЗ-М и УВТЗ-5 позволяют устанавливать их в корпусе магнитного пускателя вместо теплового реле.

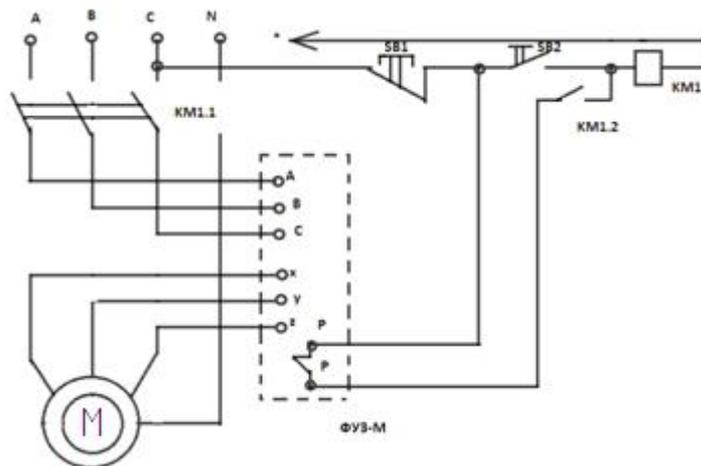
При выходе из строя датчиков температуры или обрыве цепи их соединения с управляющим устройством, последнее не позволяет включить электродвигатель в сеть.

Датчики температуры в асинхронный двигатель сельскохозяйственного исполнения устанавливают в заводских условиях при его изготовлении.

Устройства защиты УВТЗ-М унифицированы, взаимозаменяемы и не требуют настройки и регулировки при монтаже и эксплуатации.

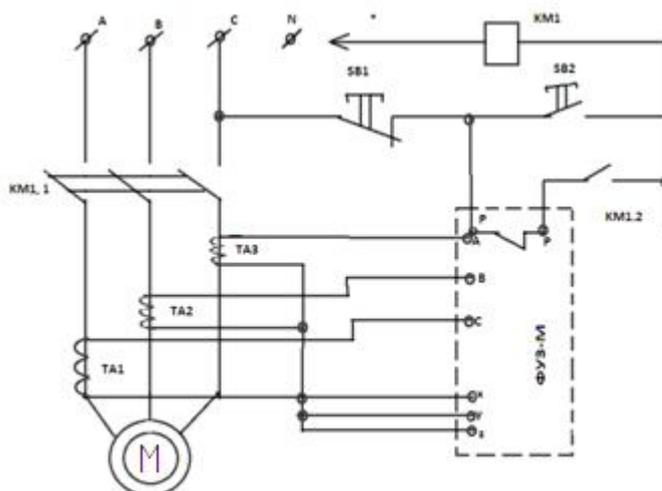
### **1.16 Фазочувствительные устройства защиты (ФУЗ-М).**

ФУЗ-М применяют только совместно с аппаратами защиты от токов КЗ (предохранители, автоматические выключатели) и включают в рассечку трех линейных проводов, питающих электродвигатель. Катушку магнитного пускателя включают через размыкающий контакт ФУЗ-М (рис. 1.21).



**Рисунок 1.21** схема включения ФУЗ-М в схему управления асинхронным двигателем.

Выпускают пять типоразмеров ФУЗ-М до ФУЗ-М5 на токи до 32А (двигатели мощностью до 17 кВт). Диапазон токов 1 ... 2; 2 ... 4; 4 ... 8; 8 ... 16; 16 ... 32 А. К электродвигателям мощностью более 17 кВт фазочувствительные устройства подключают через трансформатор тока, вторичные обмотки которых включены звездой. Звездой соединяют и клеммы устройства ФУЗ-М. Их подключают к выводам трансформатора тока с помощью четырех проводов (рис. 1.22).



**Рисунок 1.22** Схема включения ФУЗ-М в схему управления асинхронного двигателя через трансформаторы тока.

Время срабатывания при обрыве фазы не более 0,1 с. Время срабатывания при перегрузке  $1,5 I$ , не более 30 ... 50 с. Время срабатывания при перегрузки  $7,5 I$ , не более 6 ... 10 с. Разброс тока срабатывания не более 10%. Рабочее напряжение 380 В.

Потребляемая мощность устройства не более 5 Вт. Устройство ФУЗ-М должно быть настроено на номинальный ток электродвигателя (после снятия крышки устройства) поворотом шкалы потенциометра.

Повторное включение двигателя после срабатывания устройства ФУЗ-М допускается не менее чем через 10с.

### **1.17 Руководящие технические материалы (РТМ) «Методика выбора элементов пускорегулирующей и защитной аппаратуры электроприводов машин».**

Согласно этому документу аппараты управления и защиты выбирают в зависимости от установленной мощности и режима работы электроприемника, условий внешней среды, технических требований и монтажного исполнения.

Выбор аппаратов защиты начинают с определения вида защиты.

Выбор автоматов управления (магнитных пускателей, контакторов, автоматических выключателей) и защиты (предохранителей, автоматических выключателей, тепловых реле) производится по номинальному току нагрузки, номинальному напряжению и роду тока питающей сети. Чтобы аппараты надежно защищали приемник от коротких замыканий и перегрузок, они проверяются по номинальному току плавкой вставки и соответственно току срабатывания расцепителя. Кроме того, они должны быть проверены на селективность. Эксплуатационные требования и условия среды в месте установки аппаратов также должны учитываться при их выборе.

Для группы электродвигателей, служащих приводом одной машины или же ряда машин, осуществляющих единый технологический процесс, следует, как правило, применять общую аппаратуру управления, в отдельных случаях каждый электродвигатель должен иметь отдельные аппараты управления и защиты.

При управлении из нескольких мест необходимо предусмотреть аппараты (выключатели, переключатели), не дающие возможность дистанционного пуска механизма остановленного на ремонт. В случае, когда оператор проектируемого механизма не сможет определить по состоянию аппарата управления, включена или отключена главная цепь электродвигателя, рекомендуется применять световую сигнализацию.

Аппараты управления следует располагать ближе к электродвигателям в местах, удобных для обслуживания. Если с места, где установлен аппарат управления не виден приводимый им механизм и если этот механизм имеет постоянный обслуживающий персонал, необходимо предусмотреть следующие мероприятия:

1. Установка кнопки пуска электродвигателя непосредственно у механизма;
2. Сигнализация или звуковые оповещения о предстоящем пуске механизма;
3. Установка вблизи электродвигателя и приводимого механизма аппаратов для аварийного отключения электродвигателя, исключающих возможность пуска.

При выборе типа защиты от токов перегрузки можно руководствоваться следующими соображениями:

1. Электродвигатели, отказ которых может привести к большим ущербам, подверженные систематическому загрязнению или запылению с забиванием вентиляционных каналов (мельницы, комбикормовые цехи и т.д.) или воздействуют на повышение температуры окружающей среды (котельные, сушилки и т.д.), а также при резкопеременной нагрузке рабочей машины (дробилки, измельчители грубых кормов и т.д.) и повышенной частоте включения (например, дозаторы) или реверса целесообразно защищать устройствами встроенной температурной защиты и аппаратами, защищающими от токов КЗ;

2. Для защиты электродвигателей мощностью не более 1,1 кВт на электрифицированных машинах и механизмах, работающих в присутствии технически грамотного обслуживающего персонала, следует применять точно отрегулированные тепловые реле.

3. Электродвигатели мощностью более 1 кВт, работающие в животноводческих помещениях и кормоцехах (за исключением машин с резко-переменной нагрузкой и частыми реверсами), а также те, которые работают в отсутствие обслуживающего персонала (например, вентиляторы, насосы, включая погружные), необходимо защищать фазочувствительными устройствами защиты.

## Вопросы для самопроверки по главе:

1. Приведите классификацию аппаратов по основным признакам.
2. Приведите классификацию аппаратов по коммутационной способности.
3. Поясните отличие соединительного контактного соединения от коммутирующего.
4. Какая важнейшая физическая характеристика всех типов контактных соединений?
5. Чем определяется величина переходного соединения контактного соединения?
6. К чему ведет возникновение дуги на контактах аппаратов?
7. Какие способы гашения дуги применяются в аппаратостроении?
8. По какой причине аппараты ручного управления допускают ограниченную коммутацию под нагрузкой?
9. Какими параметрами характеризуются автоматические выключатели?
10. Отличие теплового расцепителя автомата от электромагнитного?
11. Недостатки предохранителей.
12. Принцип действия электромагнитного контактора.
13. Быстродействие электромагнитного контактора переменного тока выше, чем электромагнитного контактора постоянного тока. Почему?
14. Назначение реле времени.
15. Недостатки бесконтактных (полупроводниковых) аппаратов.
16. Недостатки тиристорных пускателей по сравнению с магнитными пускателями.
17. В чем заключается сложность реализации полупроводниковых аппаратов высокого напряжения?
18. Охарактеризуйте основные недостатки полупроводниковых электрических аппаратов.
19. Принцип действия гибридных аппаратов.
20. Чем отличаются принудительная и естественная коммутация силовых полупроводниковых аппаратов?
21. Назовите назначение основных узлов гибридных аппаратов.
22. Какова необходимость построения гибридных аппаратов?

## **2 МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

### **2.1 Интегральные микросхемы - техническая основа для создания аппаратуры релейной защиты.**

Релейная защита представляет собой вид управления, заключающийся в предотвращении и (или) локализации аварии. Конечной целью релейной защиты является обеспечение безаварийности объектов защиты, т.е. способности системы релейной защиты путем его отключения своевременно предотвращать развитие на объекте аварийных ситуаций, опасных для оборудования и обслуживающего персонала. В последние годы в технике релейной защиты начала успешно применяться аппаратура, содержащая интегральные микросхемы. Использование микросхем позволило заметно улучшить характеристики защит по сравнению с традиционными на базе электромеханических реле.

Релейная защита любой электроустановки содержит три основные части: измерительную, логическую и выходную. В измерительную часть входят измерительные и пусковые органы защиты, которые воздействуют на логическую часть при отклонении электрических параметров (тока, напряжения, мощности, сопротивления) от значений, предварительно заданных для защищаемого объекта.

Логическая часть состоит из отдельных переключающих элементов и органов выдержки времени, которые при определенном действии (срабатывании) измерительных и пусковых органов в соответствии с заложенной в логическую часть программой запускают выходную часть.

Выходная часть связывает релейную защиту с цепями управления: коммутационными аппаратами (выключателями) и устройствами передачи команд по каналам связи и телемеханики. Выходные органы защиты имеют на выходе переключающие элементы достаточной мощности, обеспечивающие работу цепей управления.

До последнего времени все органы релейной защиты выполнялись только с помощью электромеханических реле. Необходимые выдержки времени создавались в логической части защит такого исполнения посредством часовых механизмов,

управляемых электромагнитными устройствами. Наряду с часовыми механизмами для этой же цели применяют электромагнитные реле с магнитным демпфированием.

Для получения реле с зависимой характеристикой выдержки времени используют механические системы с приводом, действующим на индукционном принципе. Скорость движения таких механизмов зависит от значения протекающего по ним тока.

Во всех органах защиты, за исключением измерительных, чаще всего применяют электромагнитные реле клапанного типа или с втягивающимся якорем. В последнее время стали применять реле с магнитоуправляемыми контактами, обеспечивающие высокое быстродействие логических операций в некоторых нуждающихся в этом защитах.

Измерительные органы должны действовать с большой точностью, потребляя при этом незначительную мощность, из-за этого они не могут быть выполнены с помощью простых электромеханических устройств. Поэтому для них были разработаны специальные высокоточные электромагнитные механизмы с легким поворотным якорем. Применяют также чувствительные индукционные механизмы с вращающимся барабанчиком. Выпускается аппаратура, содержащая различные поляризованные и магнитоэлектрические реле, для срабатывания которых требуется очень небольшая мощность.

Таким образом, в релейной защите используется весьма большое количество самых разнообразных электромеханических устройств. Это привело к значительному усложнению производства релейной аппаратуры и ее обслуживания. Нередко требования к релейной защите не могут быть удовлетворены из-за несовершенства аппаратуры, содержащей электромеханические устройства. Возможный выход из-за создавшегося положения открылся благодаря успехам современной полупроводниковой схемотехники, а в первую очередь - созданию интегральных микросхем.

Серийная аппаратура релейной защиты, выполненная на основе интегральных микросхем, выпускается двух типов [1].

Первый - это аппараты, представляющие собой отдельные органы измерительной или логической частей защиты. По аналогии с электромеханическими реле за такими органами сохранено название реле защиты. В интегральном исполнении выпускаются различные

реле: тока, напряжения, направления мощности, сопротивления, а также времени.

В электроустановках из таких реле монтируют измерительную часть устройств релейной защиты. Наряду с этим логическая часть подобных устройств может выполняться как на электромагнитных реле, так и на базе логических микросхем в сочетании с контактными выходными элементами.

Другим типом изделий является комплектная аппаратура, представляющая собой набор устройств релейной защиты целого присоединения, собранных в кассеты, которые монтируются на панелях или в шкафах заводского производства.

На энергетические объекты такие панели и шкафы поставляются в полностью готовом состоянии и нуждаются только в привязке ко вторичным цепям присоединений.

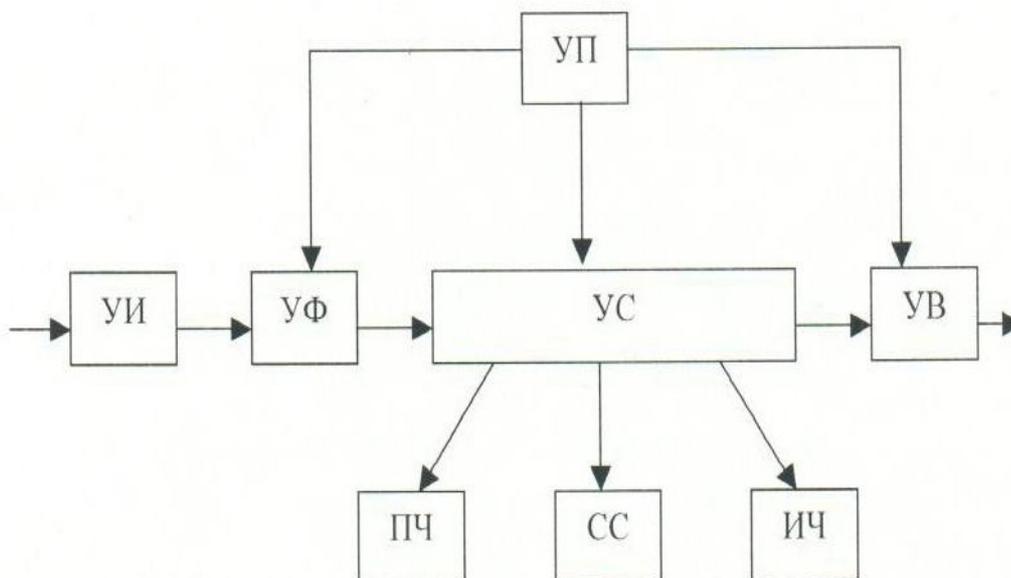
## **2.2 Основные узлы реле защиты, выполненные на операционных усилителях.**

У реле защиты, содержащих операционные усилители (ОУ), имеется ряд узлов, которыми не располагают электромеханические реле. Обобщенная структурная схема реле защиты, в которой применены ОУ, показана на рисунке 2.1. У таких реле имеется пять основных узлов:

**узел измерения (УИ)**, содержащий измерительные преобразователи или датчики тока и напряжения, подаваемых на реле от измерительных трансформаторов тока и напряжения защищаемого объекта;

**узел формирования (УФ)**, в котором получают из поступающих входных сигналов специально сформированные напряжения переменного или постоянного тока, требуемые для реализации характеристики реле после их сопоставления в узле сравнения;

**узел сравнения (УС)**, служащий для дальнейшего преобразования сравниваемых напряжений в форму, удобную для сравнения, собственно сравнения и получения на выходе узла управляющего сигнала, когда результат сравнения свидетельствует о соответствии поданных на реле токов и напряжений условиям его срабатывания;



**Рисунок 2.1 Структурная схема статического реле защиты.**

*узел питания (УП)* предназначен для получения от источника оперативного тока защищаемого объекта стабилизированных напряжений постоянного тока, требующихся для работы интегральных микросхем и исполнительного выходного реле;

*узел выхода (УВ)* обеспечивает действие содержащегося в его составе электромеханического реле при поступлении управляющего сигнала из узла сравнения.

Преобразующая часть (ПЧ) узла сравнения служит для преобразования сравниваемых напряжений в форму, удобную для сравнения. В схеме сравнения (СС) сравниваемые импульсы сопоставляются между собой не только по значению, но и по длительности их возникновения. В исполнительной части (ИЧ) создается командный сигнал, если результат сравнения свидетельствует о соответствии поданных на реле токов и напряжений условиям их срабатывания.

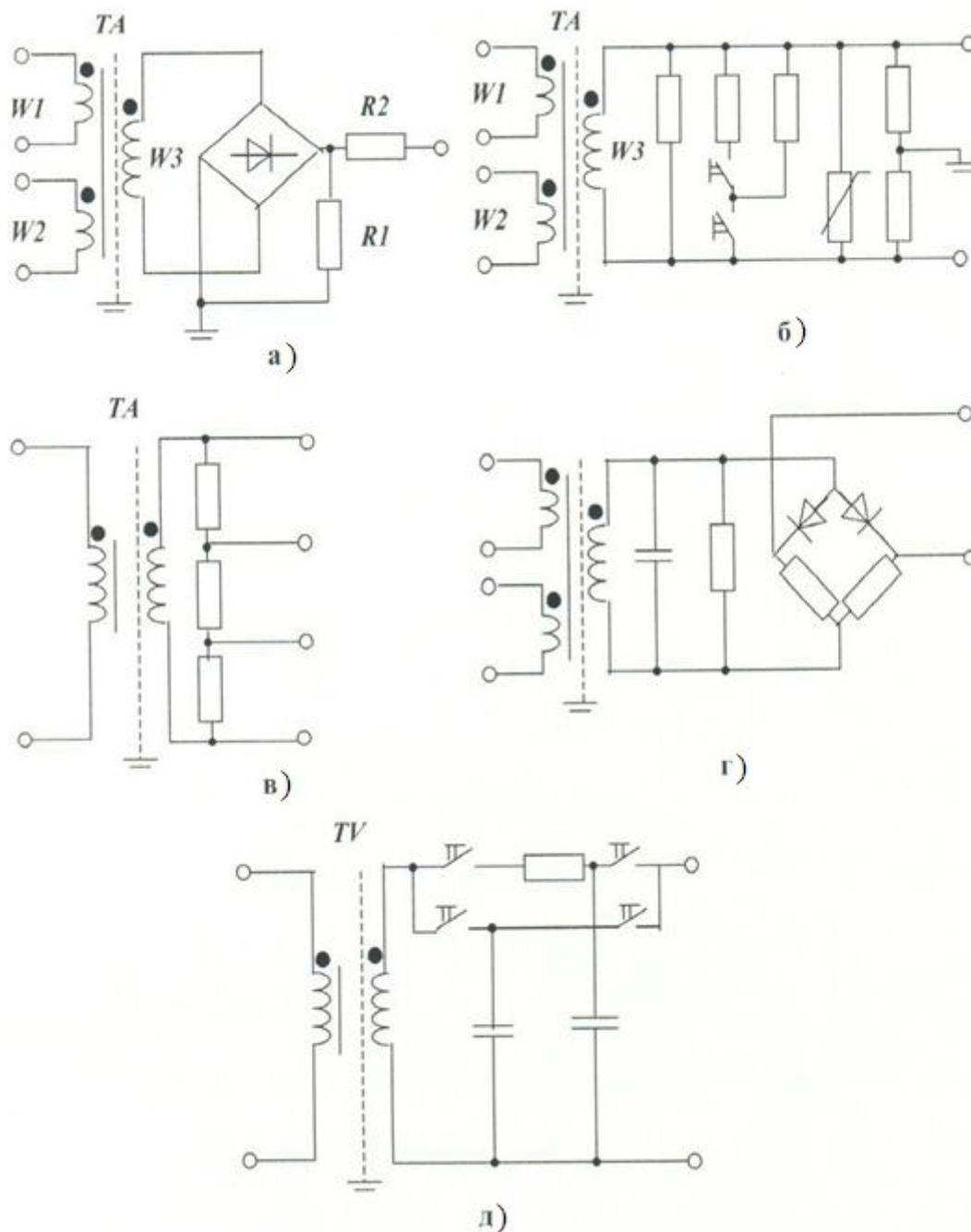
Содержащиеся в УИ измерительные преобразователи (датчики) представляют собой промежуточные трансформаторы или трансреакторы, предназначенные для отделения полупроводниковой части реле от вторичных цепей защищаемого объекта. Одновременно эти преобразователи служат для трансформации токов и напряжений. Уровень трансформированных сигналов выбираются по условиям управления операционными усилителями.

Число датчиков определяется схемой реле. В токовых реле применяют один или несколько датчиков тока, а в реле напряжения - соответствующее число датчиков напряжения.

В реле сопротивления и в реле направления мощности устанавливают как датчики тока, так и датчики напряжения. Наряду с основными функциями в датчиках решается задача защиты полупроводниковой части реле от высокочастотных наводок, могущих проникать в цепи вторичной коммутации. Для защиты от таких наводок служат специальные экраны, помещаемые между первичной и вторичной обмотками входного трансформатора датчика. Экран представляет собой однослойную обмотку, соединенную с нулевой шинкой реле.

Нагрузкой измерительных преобразователей служат соответственно подобранные резисторы. Падение напряжения, снимаемое с резистора, используется в качестве управляющего для узла формирования. Примеры исполнения датчиков тока показаны на рисунке 2.2.

В простейшем случае в качестве нагрузки датчика тока используют резистор, включенный через двухполупериодный выпрямитель (рисунок 2.2,а).



**Рисунок 2.2 Датчики тока и напряжения: а) - датчик тока с выпрямителем; б) - датчик тока со ступенчатой регулировкой выходного сигнала; в)- датчик тока с делителем выходного сигнала; г)- датчик тока с трансреактором и выпрямителем; д) - датчик тока с фазоповоротной схемой.**

Для сложных реле применяют датчики тока с несколькими степенями регулировки с помощью резисторов, подсоединенных через переключатели (рисунок 2.2,б) к вторичной обмотке датчика. Выходное напряжение такого датчика снимается с делителя напряжения на резисторах. Средняя точка делителя связана с нулевой

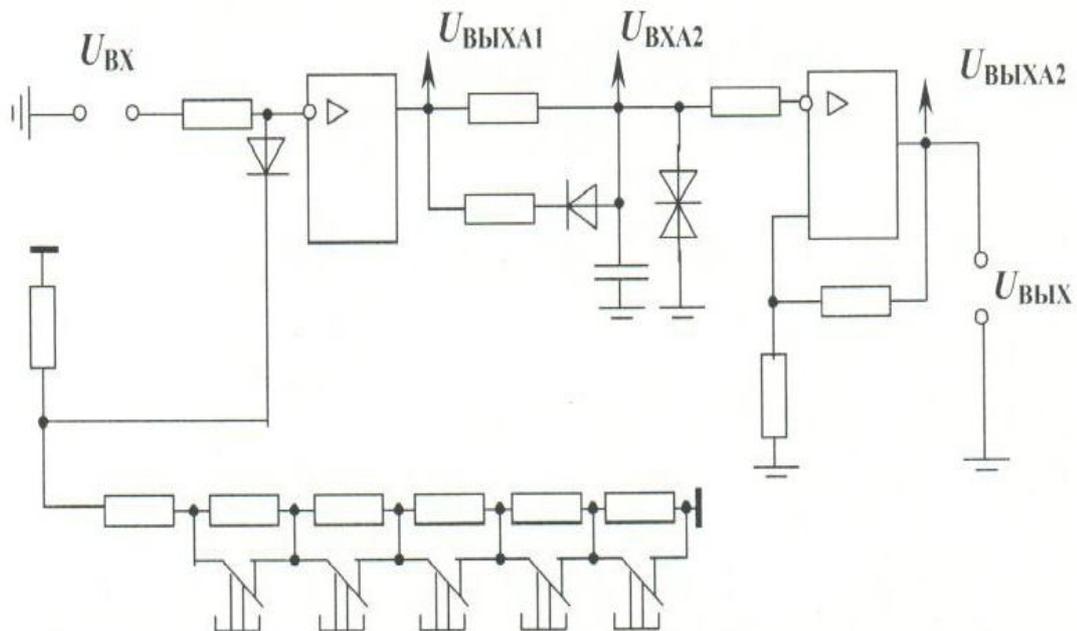
шинкой, что позволяет получать напряжения разного знака относительно нуля реле. Еще один вариант датчика тока, обеспечивающий возможность регулировки снимаемого с него напряжения с помощью отпаяек, показан на рисунке 2.2,в.

Схема датчика тока для реле дифференциальной защиты трансформаторов и двигателей, в котором применен трансреактор, показана на рисунке 2.2,г. Выходное напряжение трансреактора пропорционально первой производной входного тока. За счет этого обеспечивается исключение медленно затухающей апериодической составляющей и усиление составляющих высших гармоник в получаемом выходном напряжении. Конденсатор предназначен для подавления помех, имеющих частоту 500 Гц и выше.

В составе датчика напряжения имеется промежуточный трансформатор, ко вторичной обмотке которого подсоединяется схема преобразования входного напряжения, требующаяся для данного исполнения реле. В серийных реле напряжения применяется датчик, подобный показанному на рисунке 2.2,а., но только с одной первичной обмоткой, последовательно с которой включается добавочное сопротивление. У сложных реле во вторичную цепь датчика напряжения при необходимости может включаться фазоповоротная схема (рисунок 2.2,д).

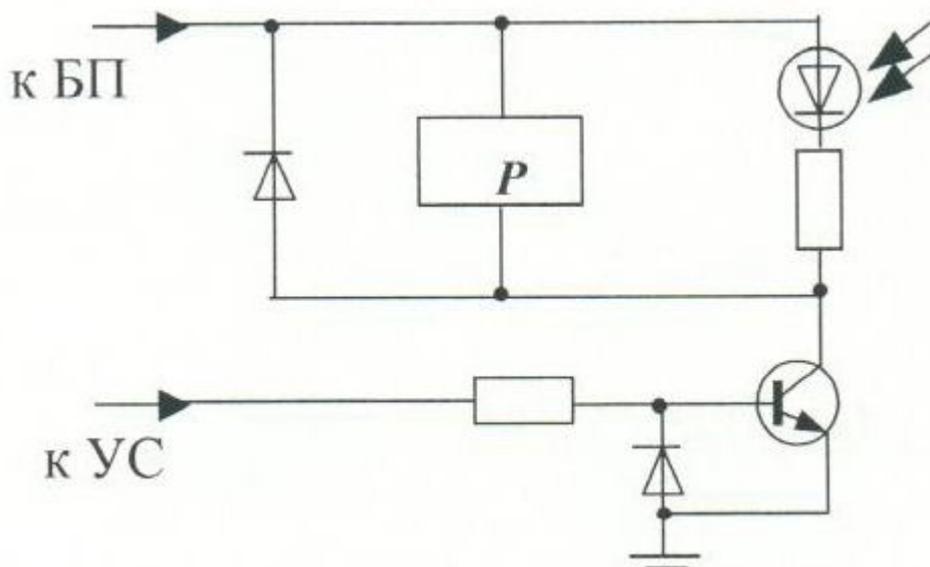
Узлы сравнения, используемые в серийных реле защиты, имеют несколько вариантов исполнения. Одним из них является узел сравнения, применяемый в большинстве серийных реле тока и напряжения, реагирующих на полные значения измеряемых электрических величин. Этот узел работает на времяимпульсном принципе (рисунок 2.3).

Для срабатывания таких реле требуется, чтобы, во-первых, входной сигнал превысил некоторое заданное значение, и, во-вторых, обеспечивалось бы определенное соотношение между временем превышения заданного уровня и временем, когда входной сигнал ниже уровня срабатывания. Эти условия обеспечивают хорошую отстройку реле от помех, возникающих в сети питания реле оперативным током, а также из-за наведенных напряжений от смежных цепей.



**Рисунок 2.3 Узел сравнения.**

Узел выхода реле защиты осуществляется с помощью электромагнитного реле или реле с магнитоуправляемыми контактами, которые связываются с узлом сравнения через усилитель на транзисторах. Одна из возможных схем узла выхода показана на рисунке 2.4.

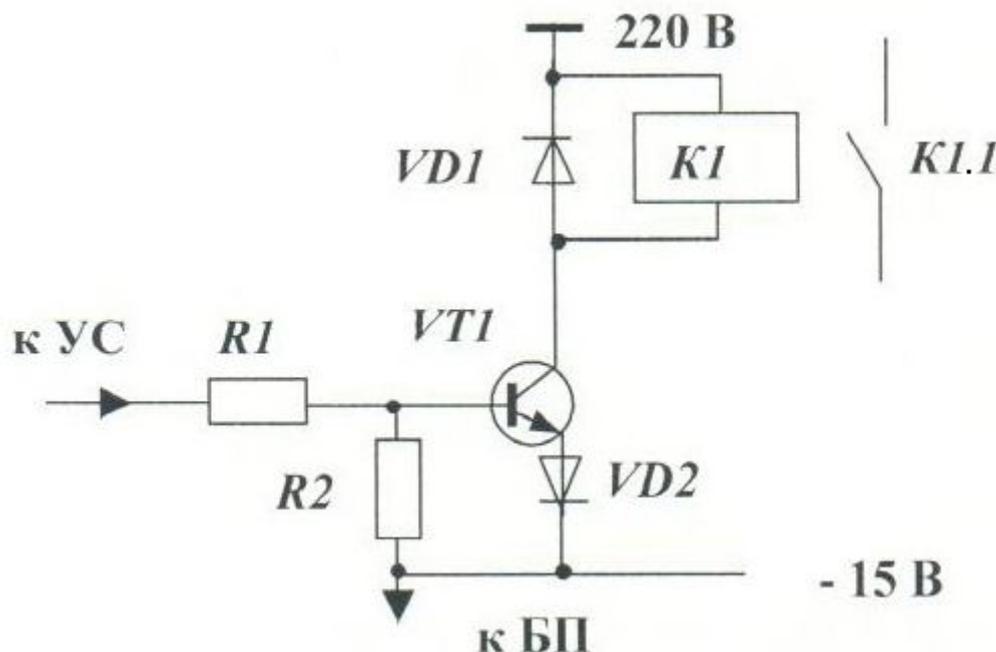


**Рисунок 2.4 Узел выхода на базе электромеханического реле.**

Узел выхода управляется сигналом, поступающим из узла сравнения на транзистор.

В качестве выходных в серийных реле защиты находят применение малогабаритные промежуточные реле (К1) типа

РП13 и герконовое реле типа РПГ-5. Чаще всего используются реле типа РП13, рассчитанные на рабочее напряжение 110В постоянного тока. Схема узла выхода на таком реле показана на рисунке 2.5.



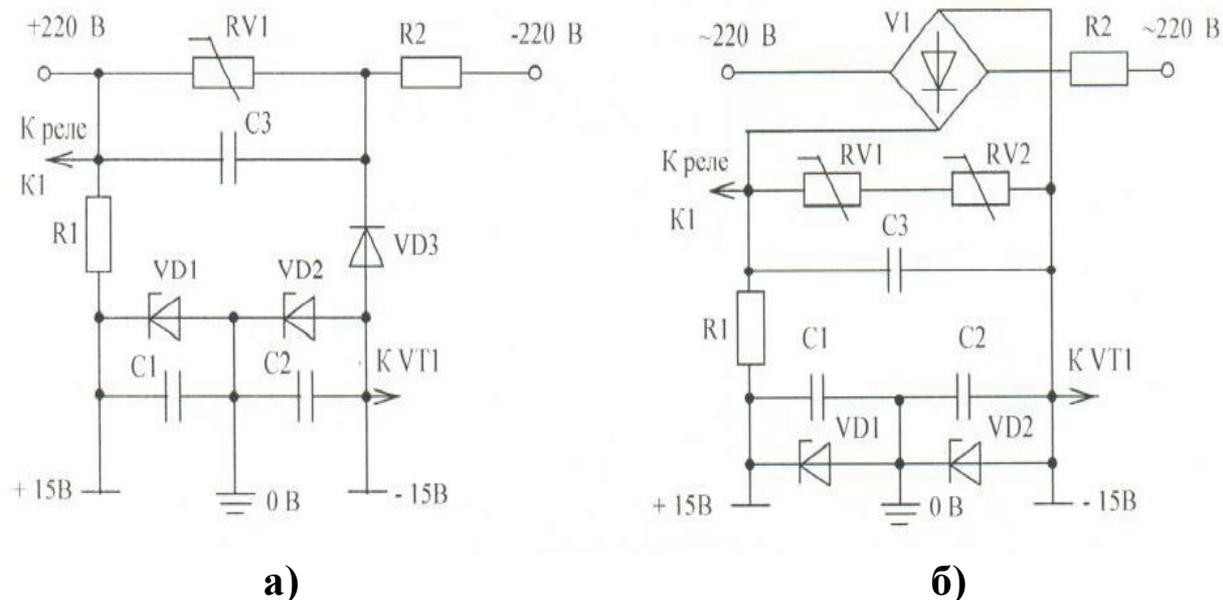
**Рисунок 2.5 Узел выхода на базе герконового реле.**

На один из концов обмотки реле **K1** подается плюс напряжения оперативного тока 220 В, а другой ее конец подключается к коллектору транзистора **VT1**.

Отличие данной схемы от схемы узла выхода по рисунку 2.4 состоит в том, что на входе **VT1** вместо диода установлен резистор **R2**, обеспечивающий требуемое ограничение уровня входного сигнала. Диод **VD2** нужен для надежного запираания транзистора **VT1** в исходном несработанном состоянии выходного реле **K1**. Точка, где объединяются резистор **R2** и диод **VD2**, подсоединена к шинке питания минус 15 В и общей точке делителя напряжения оперативного тока 220 В (рисунок 2.5).

Каких-либо специальных блоков питания оперативных цепей в реле защиты, как правило, не используют. Для получения напряжений  $\pm 15$  В для питания ОУ применяют делители напряжения на резисторах (рисунок 2.6). Необходимые уровни напряжения +15 В и -15 В при допустимых отклонениях напряжения 220 В поддерживаются с помощью стабилитронов типа КС515.

Параллельно стабилитронам подключены конденсаторы, служащие для защиты операционных усилителей от влияния помех, поступающих из сети оперативного тока.



**Рисунок 2.6 Схемы узлов питания: а) - на постоянном оперативном токе; б) – при питании от сети переменного тока 220 В.**

Место подключения шин  $\pm 15$  В к делителю выбрано так, чтобы оно находилось под напряжением, составляющим примерно половину напряжения оперативного тока 220 В. При таком исполнении эти шинки в нормальном состоянии изоляции сети оперативного тока оказываются под потенциалом, близким к нулю по отношению к земле.

Узел питания (рисунок 2.6,а) применяется, когда источником оперативного является аккумуляторная батарея или выпрямительный агрегат на 220 В. Диод *VD3* установлен для того, чтобы не повредить микросхемы, если на вход реле будет подано напряжение, не соответствующее полярности, обозначенной на зажимах.

Узел питания (рисунок 2.6,б) применяется, если источником оперативного тока является сеть переменного тока собственных нужд объекта.

Для защиты от перенапряжений со стороны питания в реле устанавливаются варисторы *RV1* и *RV2* типов СН1 с параллельно подключенным помехозащитным конденсатором *C3*.

Мощность, потребляемая реле при такой схеме питания от источника оперативного тока, равна 6 - 7 ВА, что довольно много.

Это является одной из причин, сдерживающих широкое применение серийных реле защиты, выполненных па ОУ, для замены устаревших электромагнитных реле на действующих предприятиях.

Все вышеперечисленные узлы собираются из отдельных функциональных элементов, каждый из которых предназначается для осуществления одной из частных операций, присущих данному узлу.

К числу наиболее применяемых элементов в реле защиты следует отнести схемы усилителей, повторителей напряжения, компараторов и др.

Описанные схемы применяют во всех серийных реле защиты, кроме реле направления мощности серий РМ11-РМ12.

### **2.3 Типы серийных реле защиты, выполненных на операционных усилителях.**

В номенклатуру статических реле, основные узлы которых выполнены на операционных усилителях или логических интегральных микросхемах, входит большая серия реле тока типа РСТ и серия реле напряжения типа РСН [1]. Несколько раньше были внедрены в производство реле тока обратной последовательности серии РТФ и статические реле направления мощности серии РМ.

**Статические реле максимального тока серий РСТ11-РСТ14** предназначены для использования в качестве измерительных органов токовых защит как мгновенного действия, так и работающие с выдержкой времени любых присоединений электроустановок. Они пригодны для всех случаев, когда не требуются специальные меры по отстройке защиты от апериодических составляющих и высших гармоник, которые могут содержаться в первичных токах защищаемого объекта.

Схема реле выполнена на времяимпульсном принципе, гарантирующем хорошую помехоустойчивость реле. Принятое исполнение обеспечивает также четкую работу реле при больших кратностях тока повреждения по отношению к номинальному току трансформаторов тока, когда их погрешность может достигать 80-90%. Реле обладают повышенной сейсмостойкостью и рассчитаны для применения на объектах атомной энергетики.

Для питания реле этих серий оперативным током должны использоваться надежные источники постоянного или переменного тока напряжением 220 В. В заводских обозначениях реле отражены

условия их применения. Так, реле РСТ11 и РСТ12 рассчитаны на питание переменным оперативным током 220 В, причем первое из них предназначено для сетей с рабочей частотой 50 Гц, а второе с частотой 60 Гц. Реле РСТ13 и РСТ14 рассчитаны на питание постоянным током 220 В, а их рабочие частоты подобно предыдущему равны: 50 Гц для реле РСТ13, 60 Гц для реле РСТ14.

На рисунке 2.7 приведена структурная схема реле РСТ13. Измерительный узел реле представляет собой промежуточный трансформатор тока *ТА*, а узлом формирования служит выпрямительный мост *VI*. Преобразующей частью узла сравнения является однопороговый компаратор *А1*, который используется одновременно как первая ступень сравнения, определяющая ток срабатывания реле, - поступающий сигнал сравнивается с заданным опорным напряжением. Для установки опорного сигнала, с помощью которого задается уставка реле, предусмотрены переключатели уставок *SB1-SB5*. Ими шунтируется часть резисторов, образующих делитель напряжения, питающийся от источника напряжения  $\pm 15$  В. При размыкании переключателей изменяется доля напряжения, подаваемая на вход компаратора.

Выходной сигнал однопорогового компаратора поступает на следующую ступень сравнения - время сравнивающую цепочку, содержащую резисторы *R7, R8*, диод *VD2*, конденсатор *C2* и стабилитроны *VD3*. Пороговым элементом этой цепочки и одновременно исполнительной частью узла сравнения служит триггер Шмитта *A2*.

Узел выхода реле состоит из транзистора *VT1* и выходного электромагнитного реле типа РП13 на рабочее напряжение 110 В. Подобный узел изображен на рисунке 2.5.



оперативного тока. Она равна 7 Вт в нормальном режиме и 8,5 Вт в режиме срабатывания.

**Реле максимального и минимального напряжений** входят в серии РСН14 -17, каждая из которых имеет несколько типовых исполнений. Реле РСН14 и РСН15 являются реле максимального напряжения, которые реагируют на повышение напряжения в сети защищаемого объекта, а реле РСН16 и РСН17 представляют собой реле минимального напряжения, срабатывающие при понижении напряжения в сети.

По своему устройству реле серий РСН14-РСН17 подобны реле РСТ. Различаются они лишь тем, что вместо датчика тока в них установлен датчик напряжения. Датчик напряжения содержит промежуточный трансформатор и два добавочных резистора, включенных последовательно в цепь его первичной обмотки. Датчик имеет три вывода, которые дают возможность использовать реле в двух диапазонах рабочих напряжений. Переход в другой диапазон обеспечивается за счет исключения одного из добавочных резисторов. В остальной части схема реле ничем не отличается от схемы реле РСТ, показанной на рис.2.7. Поэтому в отдельном описании принципа работы реле РСН14-РСН17 не нуждаются.

Технические данные серий РСН14-РСН17 практически совпадают с соответствующими параметрами реле РСТ. Следует выделить только такой параметр, как коэффициент возврата. У реле максимального напряжения он составляет не менее 0,9, а у реле минимального напряжения не выше 1,1. У реле максимального напряжения с высоким коэффициентом возврата, у которых он не должен быть не менее 0,95, предусмотрена регулировка коэффициента возврата с помощью переменного резистора, установленного в цепи выходного триггера Шмитта.

**Реле максимального напряжения обратной последовательности** входят в состав серии РСН13. Они используются в качестве пусковых органов защит, реагирующих на несимметричные КЗ. Измерительная часть реле рассчитана на подключение к источнику трехфазного напряжения переменного тока с линейным напряжением, равным 100 В. Рабочая частота составляет 50 или 60 Гц. Для питания реле оперативным током требуется источник постоянного тока напряжением 220 В.

Напряжение срабатывания обратной последовательности может устанавливаться в пределах от 6 до 24,6 В (линейных) ступенями

через 0,6 В. На входе реле установлен обычный пассивный *RC* фильтр обратной последовательности. К выходу фильтра подключен трансформатор, ко вторичной обмотке которого присоединен пассивный Т-образный фильтр верхних частот, предназначенный для снижения уровня высших гармоник, которые могут содержаться в поступающих на реле напряжениях. Перечисленные звенья образуют воспринимающую часть и узел формирования реле этой серии. Узлы сравнения, выхода и питания соответствуют описанным ранее.

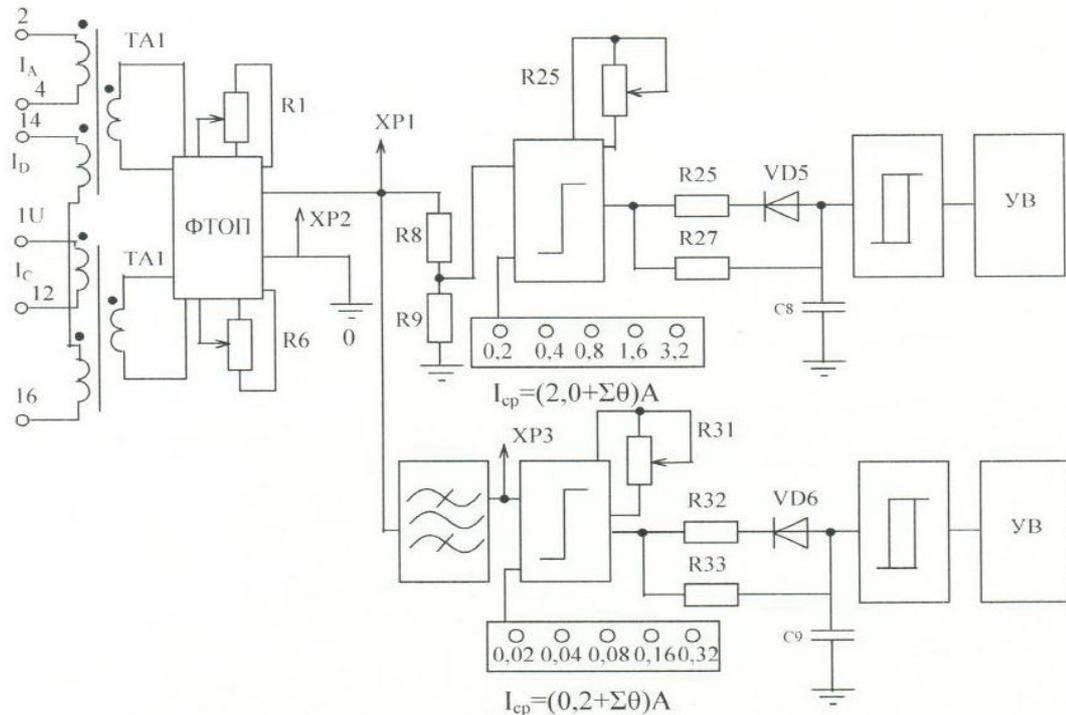
Реле РСН13 имеет коэффициент возврата не менее 0,9. Время срабатывания реле при напряжении, равном удвоенному напряжению срабатывания, не превышает 40 мс. Потребление реле по цепям переменного напряжения в нормальном режиме не более 3 ВА на фазу, по цепям оперативного тока не более 6 Вт.

### **Реле тока обратной последовательности серий РТФ8 и РТФ9.**

Реле РТФ используется в качестве пускового органа токовой защиты обратной последовательности линий и трансформаторов. Реле РТФ9 применяются для аналогичных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор, когда нужно осуществить несколько ступеней защиты обратной последовательности.

Для пояснения устройства и принципа работы реле РТФ8 и РТФ9 на рисунке 2.8 приведена структурная схема реле РТФ9 на **Ином** = 5 А. Схема реле РТФ8 подобна схеме первого, более грубого измерительного органа реле РТФ9.

В реле имеются два датчика тока *ТА1* и *ТА2*, каждый с двумя первичными обмотками, имеющими соотношение витков 3:1, и одной вторичной обмоткой. В первичную обмотку *ТА1* с большим числом витков подается ток фазы **А**, а в соответствующую обмотку *ТА2* - ток фазы **С**. В первичные обмотки с меньшим числом витков подается ток нулевого провода трансформатора тока.



**Рисунок 2.8 Структурная схема реле тока обратной последовательности.**

При таком соединении токовых цепей исключается влияние составляющих нулевой последовательности на работу реле. Фильтр входит в состав узла формирования чувствительного органа и служит для подавления высших гармоник, содержащихся в поступающем на него сигнале.

Узлы сравнения обоих органов выполнены одинаково. В каждом из них имеется однопороговый компаратор, времясравнивающая *RC*-цепочка и триггер Шмитта, служащий одновременно пороговым элементом и исполнительной частью узла. Работа узла сравнения основана на сопоставлении времени превышения входным сигналом заданного опорного напряжения с временем, когда входной сигнал меньше опорного. Выходные узлы обоих органов и делитель питания постоянным оперативным током мало отличаются от примененных в реле РСТ11-РСТ 14 .

**Дифференциальные реле тока серий РСТ15, РСТ16** применяются в качестве измерительных органов дифференциальной защиты понижающих трансформаторов и мощных электродвигателей. Так же как и другие реле серий РСТ, эти реле имеют сейсмостойкую конструкцию.

Реле РСТ 15, РСТ 16 обладают высокой степенью отстройки от переходных токов небаланса, возникающих при включении трансформаторов и двигателей под напряжение. Поэтому ток срабатывания дифференциальной защиты при применении этих реле можно устанавливать на уровне 0,5 номинального тока трансформатора или двигателя.

Структурная схема рассматриваемых реле представлена на рис.2.9, где выделены функциональные звенья, обеспечивающие особые свойства таких реле.

Датчик тока *ТАV* - это трансреактор, нагрузкой которого служит выпрямительный мост, состоящий из двух диодов и двух резисторов. Благодаря трансреактору в узел формирования реле не попадают медленно затухающие апериодические составляющие, содержащиеся в дифференциальном токе.

Нагрузочный мост принятого вида обеспечивают требуемую чувствительность реле при небольших размерах датчика тока. К выходу нагрузочного моста подсоединен делитель из резисторов *R3-R6*, с которого берется доля дифференциального тока, подаваемого в активный фильтр нижних частот *A1*. Нагрузочный мост, делитель и фильтр нижних частот образуют узел формирования реле. С помощью переключателя *K* резистор *R5* может быть исключен из схемы делителя. За счет этого значение выходного сигнала, подаваемого на ФНЧ, изменяется в отношении 1:2.

Форма сигналов, образующихся на выходе узла формирования при появлении повышенного дифференциального тока, резко различается в зависимости от того, является он током КЗ или током включения. Это позволяет получать управляющий сигнал на выходе узла сравнения только при КЗ в зоне защиты. Сам узел сравнения выполнен применительно к этой задаче. Он состоит из компаратора *A2* и элемента выдержки времени *A3*.

По своим характеристикам реле РСТ15, РСТ16 лучше выпускаемых электромеханических реле серии РНТ565.

Ток срабатывания может устанавливаться в пределах от 0,4 до 2,4 номинального. Коэффициент выравнивания при неравенствах вторичных токов плеч может изменяться от 0,627 до 1,6. Точность выравнивания составляет 7%. Время срабатывания реле при токе, равном утроенному току срабатывания, не более 40 мс. Потребление цепей оперативного тока в нормальном режиме равно 7 Вт, а при срабатывании реле - 9 Вт.

## **2.4 Тенденции перевода релейной защиты на средства вычислительной техники.**

Для оценки качества (эффективности) функционирования системы релейной защиты (РЗ) выявляются аварийные предельные режимы, грозящие переходом объекта защиты (ОЗ) в закритические состояния, которые определяются конкретными условиями эксплуатации (динамической устойчивостью ЭЭС, обеспечением электродинамической и термической стойкости электрооборудования и др.). Свойство гибкости РЗ, присущее в той или иной степени как традиционным, так и микропроцессорным защитам, благоприятно влияет на показатели их живучести и качества функционирования в части обеспечения безаварийности ОЗ при соблюдении заданных требований надежности. Указанные свойства по-разному проявляются у основных и резервных защит.

Основные защиты предотвращают развитие на ОЗ аварии, т.е. обеспечивают безаварийность функционирования ОЗ. Резервные РЗ благодаря присущему им свойству живучести (способности дальнего резервирования) обеспечивают локализацию аварии, т.е. предотвращают ее каскадное развитие.

Свойство гибкости позволяет повысить качество функционирования основных и резервных защит, в частности аппаратную надежность, обеспечивая их техническую реализацию на базе общих функциональных узлов. В пределе можно ожидать соизмеримого уровня качества функционирования основных и резервных защит, что существенно повысит функциональную надежность и эффективность системы защиты в целом [2].

Так как устройства РЗ по своему функциональному назначению являются автоматами, осуществляющими обработку информации о состоянии элементов ЭЭС, т.е. решающими управляющими устройствами, то правомерен проявляемый в последние годы интерес к использованию в них средств вычислительной техники (ВТ). В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию для объединенных и автономных ЭЭС (соответственно высоких и низких напряжений) устройств РЗ нового поколения программируемых защит, использующих средства современной цифровой микроэлектроники, и в первую очередь микропроцессоры (МП) и ПЭВМ.

Как известно, предыдущие поколения устройств РЗ выполнялись на базе электромеханических реле, а затем с использованием полупроводниковых элементов и интегральных микросхем (ИМС). Следует отметить, что основное отличие указанных поколений устройств РЗ заключалось прежде всего в том, что они имели различные технические средства реализации. Принципы выявления повреждений и алгоритмы функционирования РЗ заключались прежде всего в том, что они имели различные технические средства реализации.

Принципы выявления повреждений и алгоритмы функционирования РЗ на базе электромеханических реле, полупроводниковых реле и ИМС отличались незначительно. Однако перечисленные технические средства позволяли в отдельных случаях придавать системам РЗ свойства параметрической адаптации к изменяющимся режимам защищаемых объектов. В целом предыдущие поколения устройств РЗ, созданные на основе непрограммируемых элементов, функционально представляют собой конечные автоматы второго рода с жесткой архитектурой. По всей видимости такие системы еще длительное время будут находить применение, в первую очередь при реализации относительно простых алгоритмов выявления повреждений. При этом следует учитывать, что дальнейшее развитие подобных устройств РЗ (повышение технического совершенства, надежности и живучести, совершенствование организации контроля и диагностики технического состояния) может осуществляться только экстенсивным путем, т.е. наращиванием дополнительных технических (аппаратных) средств.

Отмеченный выше подход - смена элементной базы и почти механическое перенесение известных принципов построения на новое поколение РЗ - был использован и на первых этапах внедрения в РЗ среде  $i$  в цифровой ВТ. При этом использование ЭВМ в технике РЗ столкнулось с определенными трудностями при решении проблем обеспечения необходимых требований к быстродействию, надежности функционирования, экономическим показателям. Представляется, что решение упомянутых проблем необходимо искать в новых принципах рациональной организации процесса функционирования систем РЗ, во многом определяемых способами формирования и настройки их архитектуры РЗ. Если раньше основное внимание уделялось разработке новых алгоритмов

распознавания аварийных ситуаций, то при создании современных и перспективных типов РЗ, особенно предназначенных для электрических распределительных сетей (ЭРС) с часто изменяемой в процессе функционирования топологией, должно быть уделено особое внимание вопросу формирования архитектуры РЗ. Интересно отметить, что схожая проблема актуальна и для специалистов в области ВТ на современном этапе ее развития [3].

Универсальные гибкие РЗ позволяют реализовывать как структуры защит с параметрической адаптацией, основанной на использовании информации об изменении параметров переходных процессов в различных режимах функционирования ОЗ (аварийных и эксплуатационных). так и самоорганизующиеся структуры защиты, которые осуществляют адаптацию устройств РЗ и режимам, и к топологии защищаемого объекта.

Разработка программируемых защит, реализуемых на базе МП-техники, является в настоящее время перспективным направлением в РЗ. Впервые результат исследований в этой области был опубликован фирмой *Westinghouse* (США) в 1969 г. Почти в это же время Мэн и Морисон (Австралия) опубликовали результаты аналогичных исследований. Это было время широкого внедрения в различных областях техники мини - ЭВМ. Попытки использования именно этого класса ВТ в РЗ не увенчались успехом, поскольку слишком очевидными по сравнению с традиционными РЗ оказались такие недостатки централизованных миникомпьютерных защит, как низкие быстродействие и надежность, высокая стоимость, большие масса и габариты. Именно это замедлило широкое внедрение компьютерных РЗ. Вместе с тем следует отметить, что упомянутый этап дал мощный импульс исследованиям в создании РЗ на средствах ВТ.

В связи с бурным развитием МП-техники, а также техники преобразования и передачи информации, признано, что к настоящему времени появился мощный фундамент для развития РЗ в цифровом исполнении. С другой стороны, в электроэнергетике сформировались условия, стимулирующие это развитие. В частности, проблемы контроля и защиты ЭЭС существенно углубились из-за усложнения топологии ЭЭС (территориальное распределение большого числа источников электроэнергии), увеличения мощностей и нагрузок, протяженности электропередач, усложнения характера протекания переходных процессов в аварийных режимах. Резко возросшие расходы на содержание обслуживающего персонала и потребность в

повышении качества электроэнергии также стимулируют меры, направленные на повышение степени автоматизации подстанций и рационализацию эксплуатационного контроля. При решении этих задач традиционная РЗ на аналоговых элементах не в состоянии конкурировать с цифровой РЗ, использующей ПЭВМ.

***Отечественный и зарубежный опыт создания МПРЗ.*** Использование ВТ для диспетчерского управления режимами ЭЭС, в системах технологической автоматики энергетического оборудования и создание АСУТП энергоблоков интенсифицировали работы по использованию средств ВТ для автоматизации ЭЭС. При этом систему РЗ электроэнергетических объектов следует рассматривать как подсистему АСУТП ЭЭС, обладающую высокой степенью однородности комплекса аппаратных средств. Кроме того, стало очевидно, что развитие объединенных и автономных ЭЭС, внедрение высокоманевренного электрооборудования, использование постоянного тока, силовых статических преобразователей требуют создания для ЭЭС гибких многофункциональных РЗ. Статистика работы РЗ показывает, что значительная доля отказов функционирования устройств в настоящее время вызвана ошибками обслуживающего персонала при проверках, настройке и регулировке параметров РЗ. Использование средств ВТ позволяет в принципе автоматизировать эти процессы.

## **2.5 Архитектурные особенности и основные свойства гибких систем релейной защиты.**

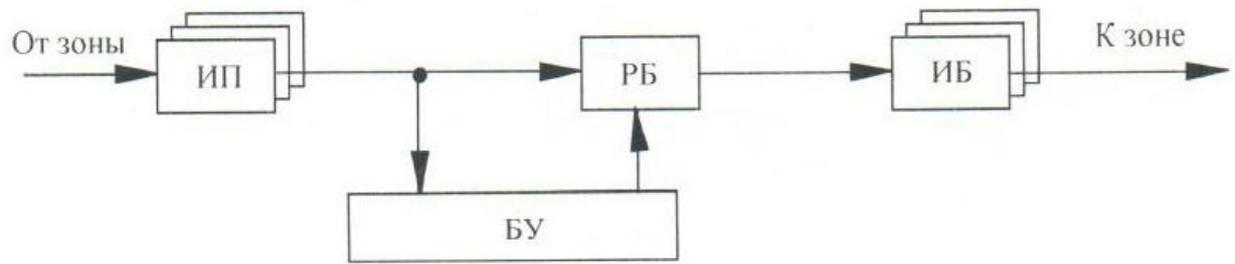
***Основные понятия об архитектуре РЗ.*** Исходя из того, что устройства РЗ по своему функциональному назначению являются решающими устройствами, и учитывая все более широкое использование в РЗ средств МП-техники, по аналогии с ВТ целесообразно сформулировать понятие архитектуры РЗ, которая определяется принципами информационного взаимодействия устройств РЗ и ОЗ, особенностями обмена информацией между функциональными частями системы, способами организации и перестройки каналов связи внутри системы, а также способами и средствами программирования структуры РЗ и алгоритма выявления повреждения [3].

Рассмотрим архитектурные особенности систем РЗ различного назначения. При организации системы РЗ объекта со сложной

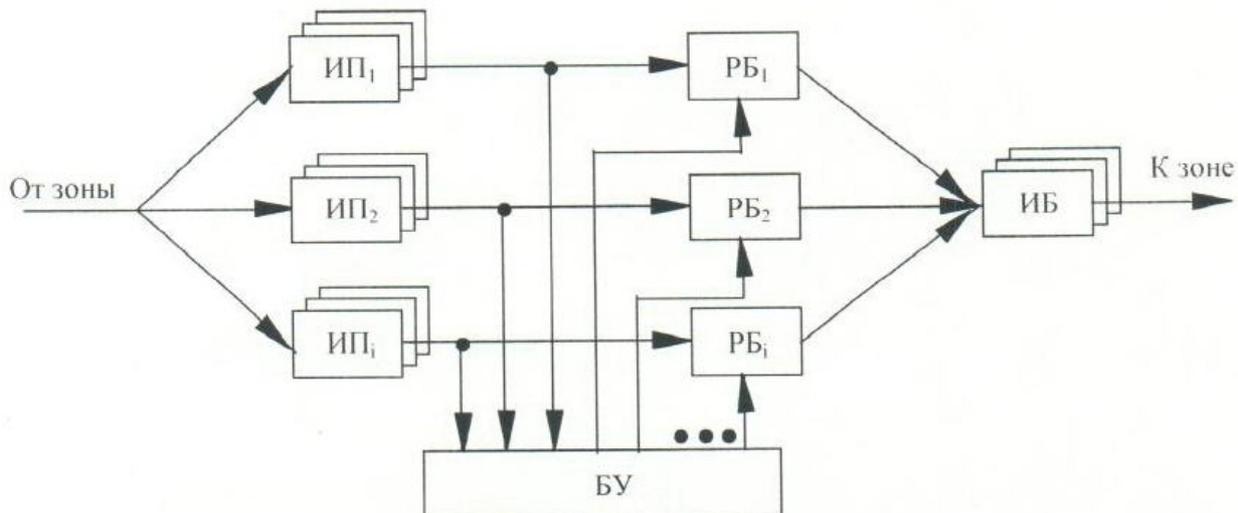
топологией его обычно декомпозируют на отдельные зоны, контролируют параметры в тех или иных точках каждой зоны, анализируют состояние зон по заданным алгоритмам выявления повреждений различных видов. После этого принимают решение об отключении соответствующих зон при выполнении условий, свидетельствующих о возникновении в их пределах повреждений того или иного вида и инициируют запуск исполнительных органов. Описанный алгоритм на практике реализуется системами с различной архитектурой: автономными (АРЗ), комплексными (КРЗ) и централизованными (ЦРЗ).

Автономные системы РЗ являются наиболее простым вариантом архитектуры РЗ и предназначены для защиты одной выделенной в ОЗ зоны по возможному виду повреждения (например, защиты линии от междуфазных КЗ). Структурная схема архитектуры АРЗ (рисунок 2.9,а) образована совокупностью измерительных преобразователей параметров **ИП**, решающего блока **РБ**, исполнительных блоков **ИБ** и блока управления **БУ**. При этом **РБ** реализует какой-либо один алгоритм выявления повреждения: максимально-токовый, дифференциальный, дифференциально-фазный и т.п. В рассматриваемой архитектуре **БУ** обеспечивает адаптацию АРЗ к изменяющимся во времени контролируемым параметрам путем введения торможения, блокировок, автоматической коррекции уставок и т.п.

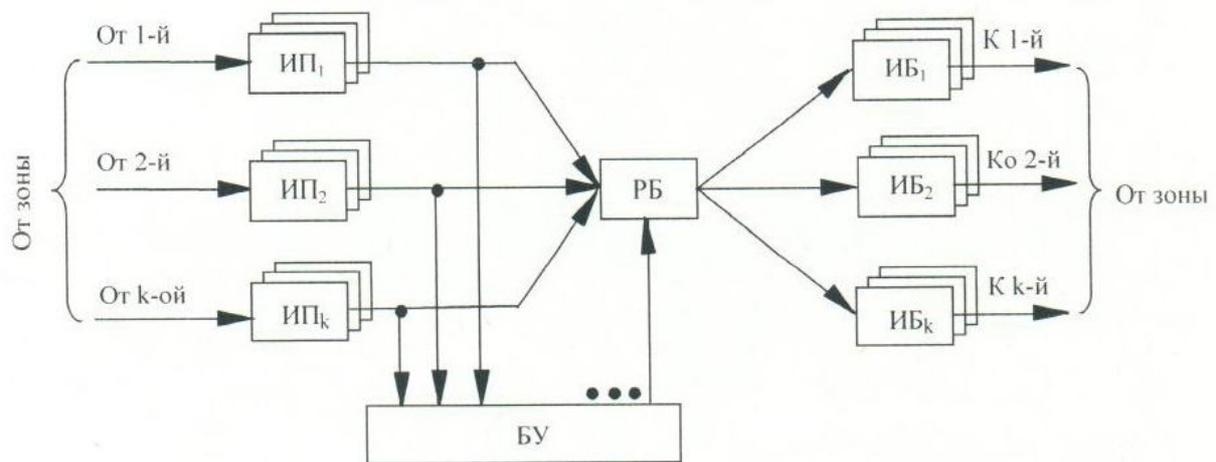
Комплексные системы РЗ предназначены для защиты одной из выделенных в ОЗ зон (например, генератора) по нескольким видам возможных повреждений и представляют собой набор из нескольких АРЗ, в отношении которых выполняются условия непротиворечивости их функционирования. Структурная схема архитектуры КРЗ (рисунок 2.9,б) отличается от архитектуры АРЗ тем, что может содержать несколько групп **ИБ**, каждая из которых обеспечивает контроль параметров, характеризующих соответствующий вид повреждений в контролируемой зоне, и несколько **РБ**, каждый из которых реализует один из заданных алгоритмов выявления повреждения. На **БУ** при такой архитектуре возлагается дополнительная функция обеспечения условий непротиворечивости совместной работы нескольких РБ относительно одной зоны.



а)



б)



в)

**Рисунок 2.9 Структурные схемы релейной защиты различной архитектуры: а)- автономной, б)- комплексной, в)- централизованной.**

Функционально централизованные РЗ (ЦРЗ) предназначены для защиты нескольких зон, например нескольких ступеней распределения электроэнергии, по одному из возможных видов повреждений. Отличительной особенностью структурной схемы

архитектуры ЦРЗ (рисунок 2.9,в) является наличие нескольких групп **ИП**, каждая из которых контролирует одну из защищаемых зон, и нескольких групп **ИБ**, каждая из которых предназначена для отключения коммутационных аппаратов одной зоны. На **БУ** при этом возлагается новая функция - обеспечение условий непротиворечивости между несколькими решениями одного **РБ** относительно нескольких контролируемых зон.

Необходимо отметить, что **РБ**, входящие в состав РЗ различной архитектуры (АРЗ, КРЗ, ЦРЗ), обеспечивают выполнение различных решающих правил, соответственно  $\Pi_A$ ,  $\Pi_K$ ,  $\Pi_U$ :

$$\Pi_A = a\{z\}, \quad (2.1)$$

где  $z$  - индекс контролируемой зоны;  $a$  - символ операции контроля  $z$ -й зоны по определенному виду повреждения;  $\{ \}$  - символ-ограничитель области распространения операции контроля;

$$\Pi_K = \sum_{i=1}^q a_i\{z\}, \quad (2.2)$$

где  $q$  - число выявленных видов повреждения;

$$\Pi_U = a\{\sum_{j=1}^p z_j\}, \quad (2.3)$$

где  $p$  - число контролируемых зон.

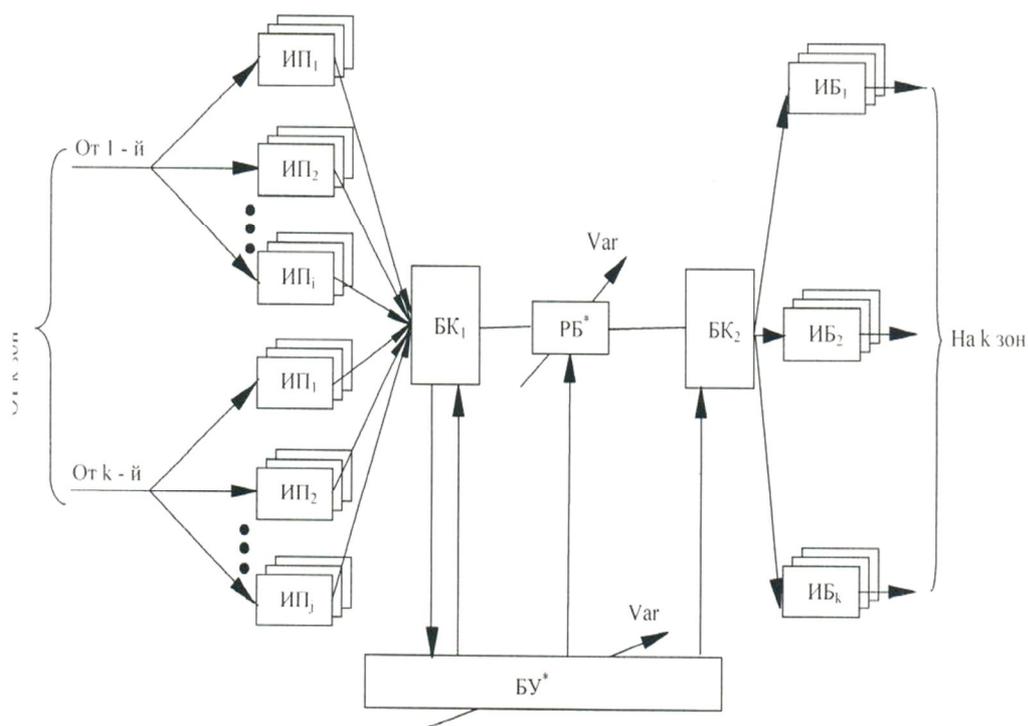
Очевидно, что КРЗ, обладая многофункциональностью в отношении выявления различных видов повреждения, обеспечивает защиту только одной зоны. С другой стороны, ЦРЗ обладает многофункциональностью в отношении одновременного контроля нескольких зон, но обеспечивает выявление только одного вида повреждения. Иными словами, каждая из двух рассмотренных архитектур РЗ обладает ограниченными функциональными возможностями. Этот недостаток исключается в архитектуре универсальных гибких РЗ (УРЗ), решающее правило для РБ которых имеет вид

$$\Pi_U = \sum_{i=1}^q a_i\{\sum_{j=1}^p z_j\}. \quad (2.4)$$

Очевидно, что решающие правила (2.1) - (2.3) являются частными случаями универсального решающего правила (2.4). Так, при  $p=q=1$  получим  $\Pi_U=\Pi_A$ , т.е. защищаемый объект «стягивается» в одну зону, в пределах которой выявляется один вид повреждения. При  $p=1, q>1$  получим  $\Pi_U=\Pi_K$ , т.е. защищаемый объект вырождается в одну зону, в пределах которой выявляются несколько видов повреждений. При  $p>1, q=1$  получим  $\Pi_U=\Pi_U$ , т.е. защищаемый объект

вырождается в совокупность нескольких зон, в пределах любой из которых возможно выявление только одного вида повреждения. Отсюда следует, что, управляя архитектурой УРЗ и настраивая РБ на реализацию заданного решающего правила ( $P_C, P_A, P_K$ ), можно обеспечить синтез любой структуры РЗ, выявляющей все возможные виды повреждения во всех зонах защищаемого объекта.

Структурная схема архитектуры УРЗ приведена на рисунке 2.10. Ее отличительной особенностью является наличие управляемых блоков коммутации  $БК_1, БК_2$  и перенастраиваемых (индекс \*) управляющего  $БУ^*$  и решающего  $РБ^*$  блоков. При этом на  $БУ^*$  возлагаются дополнительные функции по настройке  $РБ^*$  на заданный алгоритм выявления повреждения и автоматической перекоммутации с помощью  $БК_1$  и  $БК_2$  архитектуры РЗ по заранее заданным условиям. Реализацию решающего правила (2.4) в случае необходимости можно поручить гибридной системе РЗ, в которой операции контроля  $a$  осуществляется аналоговыми устройствами, а операции перестройки  $РБ^* (\sum_{i=1}^q)$  и выбора контролируемой зоны  $\{\sum_{j=1}^p z_j\}$  – цифровыми устройствами, в первую очередь средствами МП-техники. Достоинством такого подхода является обеспечение возможности сохранения и использования накопленного опыта реализации аналоговых устройств РЗ и предшествующих поколений при одновременном рациональном использовании средств ВТ, т.е. решение проблем, возникающих при создании РЗ нового поколения, при сохранении основного достоинства таких РЗ - их широкой универсальности за счет возможности перепрограммирования. Свойственная РЗ с использованием средств ВТ проблема обеспечения быстродействия снимается здесь благодаря аналоговой реализации устройств выявления повреждения, а цифровая реализация при помощи  $БУ^*$  функций настройки  $РБ^*$  и автоматической перестройки архитектуры РЗ в процессе контроля защищаемого объекта обеспечивает достаточно полное использование вычислительной мощности средств ВТ. В случае необходимости  $РБ^*$  УРЗ можно реализовать также с использованием цифровой технологии обработки информации.



**Рисунок 2.10 Структурная схема универсальной релейной защиты.**

Классификация основных архитектурных особенностей РЗ иллюстрируется в таблице 2.1. Приведенные в ней положения не претендуют на исчерпывающую полноту, однако, они в значительной мере охватывают основные особенности создаваемого поколения гибких УРЗ и учитывают специфику следующего поколения (кибернетических) РЗ. Кратко рассмотрим некоторые положения таблицы 2.1 [3]. Большинство ее пунктов не требуют дополнительных пояснений, поэтому остановимся только на отдельных из них.

Для нового поколения РЗ характерен не только локальный (п. 9) сбор информации об ОЗ, но и в большинстве случаев и распределенный, т.е. сбор информации о защищаемом, смежных, а при необходимости - и других объектах. Преимущественное распространение для основных защит получает полносвязная организация связи объекта с РЗ (т.е. контроль всех входов и выходов ОЗ). Указанные тенденции приводят к тому, что наряду с локальной идентификацией (т.е. принятием решения о состоянии ОЗ по информации только о его параметрах) шире будет применяться глобальная идентификация, когда процесс принятия решения требует

обработки информации не только об ОЗ, но и о других объектах. В п. 12 рассматриваются виды обработки информации устройствами РЗ. В РЗ с жесткой структурой преобладал один вид обработки (основной), который выполнялся РБ путем реализации алгоритма выявления аварийной ситуации. В связи с появлением РЗ с более сложной структурой (в том числе и УРЗ) возникла необходимость в ряде случаев в дополнительной обработке информации. Достаточно широко используются алгоритмы предварительной обработки информации [4] : частотная фильтрация, выделение симметричных и аварийных составляющих электрических величин. В последние годы начала использоваться и вторичная обработка информации - после РБ. Возможные варианты ее реализации рассмотрены в [5]. Например, рассмотрены взаимные связи для РЗ участков сети: продольная - объединяющая РЗ, установленные на разных концах одного объекта; поперечная - объединяющая РЗ, установлены на разных объектах, присоединенных к общим шинам.

Необходимо особо подчеркнуть, что все виды дополнительной обработки информации (включая взаимные связи и ситуационную оценку защищаемого объекта) целесообразны и применимы для РЗ всех архитектур. Следует ожидать более широкого ее использования в РЗ новых поколений.

Таблица 2.1 Архитектурные особенности систем релейной защиты.

№	Признаки классификации	Архитектурные особенности РЗ
1	2	3
1	Полнота функциональных возможностей РЗ	АРЗ; КРЗ; ЦРЗ; УРЗ
2	Способы организации структуры РЗ	Жесткая (фиксированная); гибкая (перестраиваемая)
3	Виды гибкости структуры РЗ	Параметрическая; алгоритмическая; функциональная
4	Уровни гибкости структуры РЗ	Абсолютная (наличие всех трех видов гибкости); относительная (наличие параметрической и (или) алгоритмической гибкости)
5	Основные функциональные блоки структуры РЗ	Измерительный; решающий (логический); исполнительный; управляющий

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
6	Способы программирования РЗ	Процедурный; аппаратный; комбинированный (процедурно-аппаратный)
7	Организация вычислительных систем для РЗ	Централизованные; децентрализованные; распределенные
8	Способы организации и настройки структур РЗ в процессе эксплуатации	Априорно задается одна структура РЗ; априорно задается алгоритм перестройки структур РЗ (перекоммутация при изменении режимов и конфигурации ОЗ, периодическая перекоммутация, перекоммутация с приоритетами и др.); программирование структуры осуществляется в процессе работы РЗ (критерий настройки защиты выбирается автоматически в зависимости от конфигурации и режимов работы ОЗ) - кибернетические РЗ
9	Способы получения РЗ информации об ОЗ	Локальный (сбор информации только о собственном ОЗ); распределенный (сбор информации о собственном ОЗ и ОЗ смежных систем РЗ)
10	Способы организации информационной связи РЗ с ОЗ	Полносвязный (контроль всех входов и выходов ОЗ - абсолютная селективность); неполносвязный (контроль одного или части входов и выходов ОЗ -относительная селективность)
11	Способы идентификации состояния ОЗ	Локальная идентификация - принятие решения о состоянии ОЗ по информации только о его параметрах; глобальная (ситуационная) - принятие решения о состоянии ОЗ по информации о его параметрах и параметрах других -смежных ОЗ
12	Виды обработки информации устройствами РЗ	Основная: алгоритм выявления РБ РЗ аварийной ситуации; дополнительная: предварительная (фильтрация, выделение симметричных составляющих и др.) - до БР РЗ, вторичная (РЗ с взаимными связями, ситуационная оценка и др.) -после РБ РЗ

1	2	3
13	Уровень адаптации РЗ	Без адаптации (априорное программирование структуры и настройки параметров на фазе проектирования РЗ) - жесткие и гибкие структуры; адаптивные (текущее программирование и настройка параметров на фазе эксплуатации РЗ) - самонастраивающиеся (параметрическая адаптация), самоорганизующиеся (структурная адаптация)
14	Масштабы времени обработки информации РЗ	Реальный; опережающий (прогнозирующий)
15	Способы и средства обработки информации	Аналоговые; цифровые; аналого-цифровые (гибридные)

Гибкие УРЗ открывают новые возможности в отношении уровней адаптации РЗ и способов организации и настройки структур РЗ при эксплуатации. В качестве примера рассмотрим возможные варианты адаптации структур гибких устройств РЗ к конфигурации распределительных сетей. Если конфигурация сетей при эксплуатации и аварийных переключениях изменяется редко (например, единицы раз за несколько десятков - сотен часов работы), целесообразно использование простейшего варианта, при котором одновременно с изменением конфигурации автоматически формируется более рациональная структура системы РЗ процедурным или процедурно-аппаратным путем. Информация о конфигурации сети выдается устройству РЗ в простейшем случае при помощи вспомогательных контактов ЛВ. Решения о том, какие структуры устройств РЗ целесообразно сформировать для той или иной конфигурации сети, возникающей при оперативных переключениях силовых коммутационных аппаратов, и о соответствующей настройке их РБ принимаются разработчиком на стадии проектирования и закладываются в базу данных БУ. В зависимости от сложности защищаемой сети БУ, построенный на базе средств ВТ, может реализовать те или иные структуры РЗ. Важной особенностью такой РЗ является возможность как разделения функций организации структуры РЗ и выявления повреждений соответственно между ЭВМ и традиционным для РЗ набором аналоговых или в перспективе цифровых функциональных узлов при

процедурно-аппаратной реализации архитектуры, так и объединения этих функций в ЭВМ или ММС при процедурной реализации архитектуры. В первом случае функции ЭВМ сводятся к анализу соответствия структуры защиты конфигурации защищаемой сети, который приводится в нормальных режимах работы электрооборудования, что не предъявляет жестких, трудно выполнимых требований к ее быстродействию.

В сетях более динамичной реконфигурацией (особенно это относится к распределительным сетям разьединенных ЭЭС и к автономным ЭЭС) перспективны гибкие РЗ с элементами самоорганизации, которые являются дальнейшим развитием, которые являются дальнейшим развитием рассмотренного выше принципа формирования структур защиты с процедурно-аппаратной реализацией архитектуры. С целью экономии аппаратных средств (и их типов) в данном случае осуществляют перекоммутацию не готовых, заранее сформированных структур РЗ, а узлов из набора, представляющего собой совокупность функционально законченных, не связанных между собой в исходном состоянии устройств, традиционно используемых в РЗ (сумматоров компараторов, реле, элементов выдержки времени, выходных органов и т.д.), из которых одновременно с коммутационными переключениями в сети автоматически формируются необходимые структуры РЗ путем организации соответствующих связей между узлами. Возможно, дальнейшее развитие последнего варианта универсальной гибкой РЗ, позволяющее рационально использовать минимальный набор функциональных узлов благодаря их периодической перекоммутации с циклическим перебором (или перебором с приоритетом по определенному закону) структур РЗ из заданного ансамбля.

## **2.6 Особенности гибких систем релейной защиты.**

Свойство гибкости, один из важнейших отличительных признаков РЗ нового поколения [6, 7], позволяет заметно расширять их функциональные возможности, выполнять их универсальными (т.е. инвариантными к числу видов выявляемых повреждений и сложности ОЗ) без пропорционального наращивания аппаратных средств и неоправданного расширения номенклатуры проектируемых устройств РЗ. Это свойство открывает перспективу перехода техники РЗ от экстенсивного к интенсивному пути развития. Необходимо

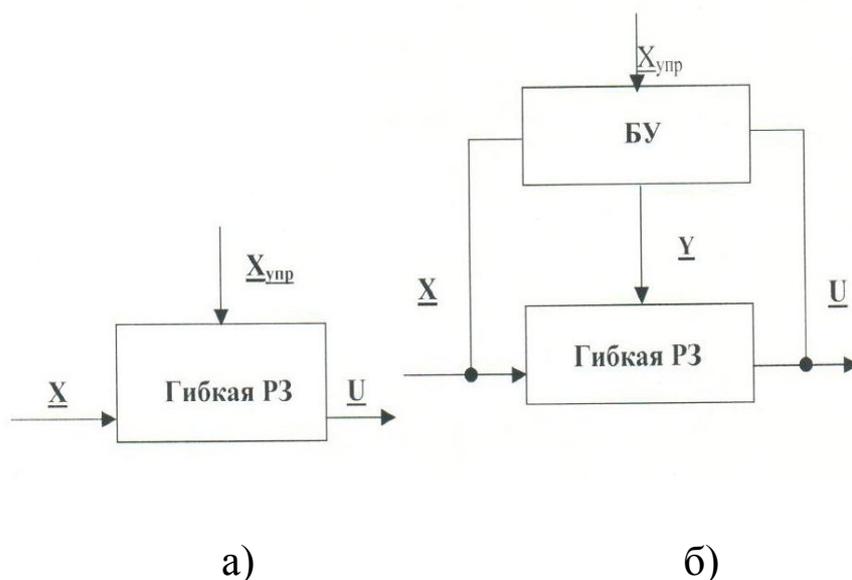
отметить, что свойство гибкости является определяющим на данном этапе развития и для многих других технических систем [8]. Гибкость структуры РЗ позволяет рационально сочетать очень важные для нее основные свойства - надежность, живучесть и качество (эффективность) функционирования, проявляемое в обеспечении безаварийности ОЗ. В [4] отмечается, что качество является обобщающим свойством, характеризующим устройства РЗ. Существенными составляющими этого свойства РЗ являются их техническое совершенство и надежность. Свойства живучести и качества функционирования в обеспечении безаварийности ОЗ рассмотрены подробно ниже. При этом учитывалось, что РЗ, являясь системой аварийного управления, осуществляет воздействие на ОЗ с целью минимизации степени опасности его критического состояния после изменения внешних условий (режимов и типологии ЭЭС).

К настоящему времени описан и создан ряд элементов, устройств, систем управления, в том числе вычислительных, которые называют гибкими, универсальными, перестраиваемыми, самонастраиваемыми и т.д. [ 9 ] . Понятие «гибкость» трактуется по-разному: в одних случаях под гибкостью понимают число различных режимов функционирования аппаратуры, в других термин «гибкость» - синоним многофункциональности. Под гибкостью понимается также возможность использования аппаратуры для достижения различных целей [10]. Во всех приведенных определениях гибкости отмечена лишь одна ее сторона - возможность получения множества режимов, функций, достижения множества целей и не раскрыто главное - каким путем достигается гибкость. Перестройка структуры системы, ее элементов и функциональных устройств (ФУ) - основная особенность гибкой системы, которая позволяет достигать различные цели. Таким образом, гибкость - это способность системы путем перестройки структуры решать с заданным качеством поставленные задачи [11]. И до появления гибких систем были известны универсальные и многофункциональные системы, но в таких системах многофункциональность обеспечивалась избыточностью аппаратных средств при жесткой системе связей. Перестройка структуры связей осуществлялась в большинстве случаев вручную и не была определяющим фактором для количественной и качественной оценки параметров системы. Поскольку любая техническая система, в том числе и система РЗ, характеризуется совокупностью элементов и

связей между ними, то перестройка системы заключается в изменении состава элементов ПО или КТС, их параметров, логических и физических связей между ними. Перестройка системы может приводить к изменению функциональных параметров системы; изменению алгоритмов функций без изменения самих функций; изменению функций системы. Соответственно следует различать виды гибкости: параметрическую, алгоритмическую и функциональную. Абсолютно гибкие РЗ обладают всеми видами гибкости, относительно гибкие - хотя бы одним из первых двух. Свойство гибкости позволяет при синтезе и технической реализации систем и устройств РЗ использовать принципы параметрической и структурной адаптации, что является одним из перспективных путей, например для электрических распределительных сетей, где обычно наблюдается достаточно частое изменение их конфигурации. Это приводит к существенному изменению режимов сети, а в некоторых случаях вызывает необходимость изменения параметров, алгоритмов и функций устройств РЗ. Следует подчеркнуть, что гибкие системы РЗ могут и не обладать таким качеством, как адаптация, однако адаптивные системы РЗ не могут быть реализованы при отсутствии у системы свойств гибкости. Защиты, обладающие функциональной гибкостью (многофункциональные), являются разновидностью универсальных РЗ. В общем случае понятие универсальности может включать три вышеуказанных вида гибкости структуры РЗ.

Существующие устройства РЗ обладают различными видами гибкости. Изменение уставок, характеристик срабатывания защит (ручное или автоматическое) является проявлением параметрической гибкости. Односистемная дистанционная защита с пусковыми органами - пример защиты с алгоритмической гибкостью. Анализ показывает, что современным устройствам РЗ присуща параметрическая и в меньшей мере алгоритмическая гибкость, но практически отсутствует функциональная гибкость. Реализуются эти свойства в большинстве ручным способом. Микропроцессорные средства открывают новые возможности для создания РЗ, обладающих всеми видами гибкости и особенно функциональной гибкостью. Цели, достигаемые за счет гибкости системы РЗ, следующие: расширение диапазонов контролируемых параметров объекта, если существующие средства контроля и измерения не могут их перекрыть; повышение селективности, быстродействия и

чувствительности за счет изменения параметров защит (уставок, характеристик) в зависимости от режимов и состояния ОЗ или внешней среды (ЭЭС), а также использование принципов прогнозирующего распознавания аварийных ситуаций; изменение алгоритмов защиты в зависимости от вида КЗ и топологии ОЗ; повышение надежности и живучести; экономия аппаратных средств за счет использования средств функциональной избыточности. В результате свойство гибкости позволяет повысить качество (эффективность) функционирования РЗ в обеспечении безаварийности ОЗ.



**Рисунок 2.11 Структура гибкой РЗ: а) - укрупненная схема; б) - схема с блоком управления.**

В общем случае гибкая РЗ представляет собой устройство, преобразующее вектор входной информации об объекте защиты  $X$  и вектор входных управляющих воздействий  $X$  в вектор выходных сигналов  $U$  (рисунок 2.11,а):

$$U = F_1(X, X_{упр}).$$

Входные управляющие воздействия формируются и вводятся в гибкую РЗ оперативным дежурным персоналом или АСУТП объекта (блока, станции и т.д.). Для выполнения перестройки в гибкой РЗ необходимы технические средства, на рисунке 2.11,б выделенные в виде блока БУ, управляющего перестройкой, который формирует управляющий сигнал  $Y$ , непосредственно производящий перестройку аппаратных и программных средств РЗ. Эта перестройка может зависеть не только от  $X_{упр}$ , но и от  $X$  и  $U$ , т.е.

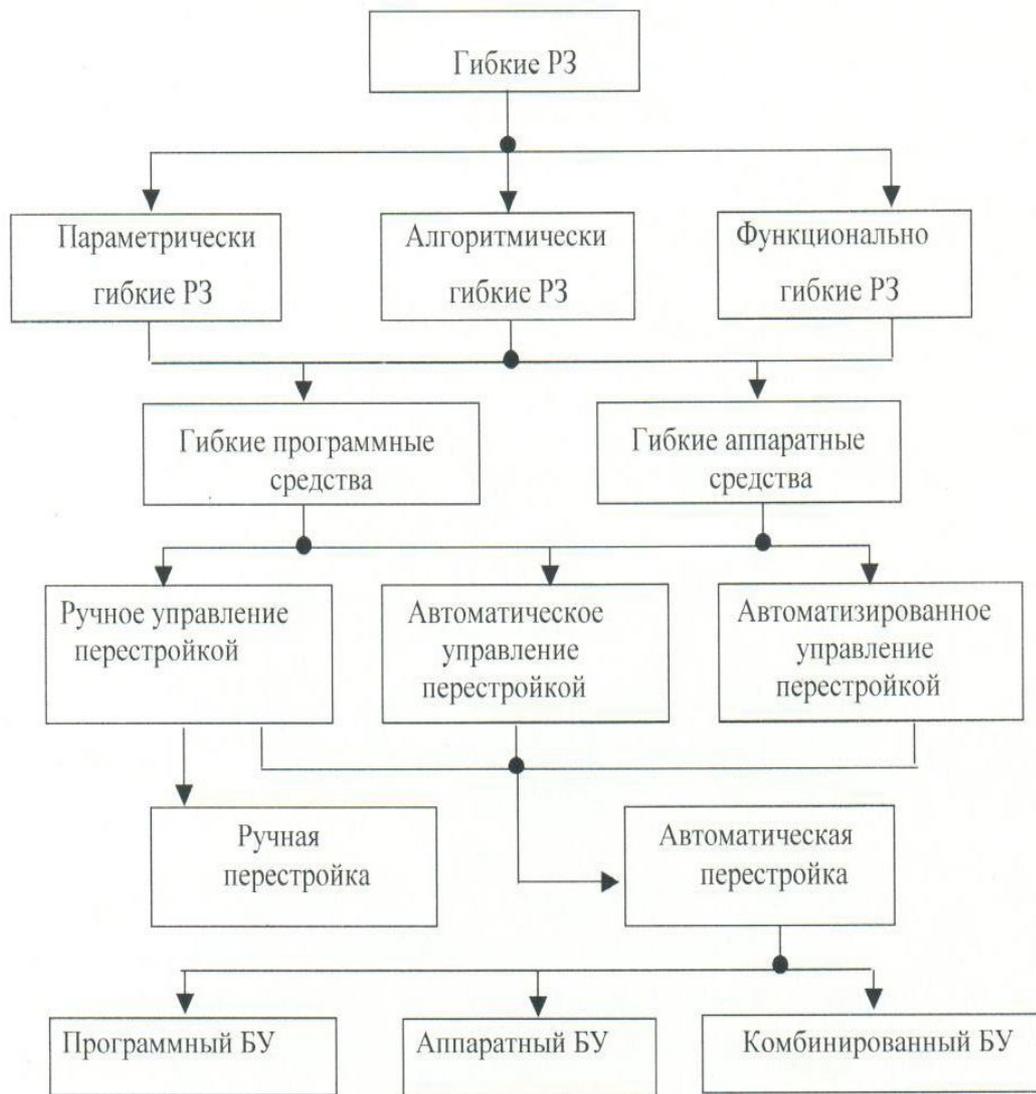
$$Y = F_2(X_{упр}, X, U).$$

Основной процедурой при организации систем РЗ является их классификация по ряду признаков, влияющих на выбор средств и методов реализации системы. Классификацию гибких систем РЗ целесообразно провести по следующим признакам: вид гибкости; тип средств РЗ, реализующих гибкость; способ управления перестройкой структур РЗ; способ самой перестройки и способ выполнения самого перестраиваемого элемента РЗ. Классификация показана на рисунке 2.12. О видах гибкости было сказано выше, а что касается средств системы, то нужно различать РЗ с гибкостью аппаратных или программных средств. Следует отметить, что наибольшей потенциальной гибкостью при минимальных аппаратных затратах обладают программные средства.

Реализация аппаратной гибкости традиционна для систем РЗ, т.к. она, будучи относительно простой, обеспечивает высокое быстродействие РЗ. В создаваемом поколении универсальных гибких РЗ наряду с более широко используемой процедурной гибкостью в необходимых случаях также целесообразно применять комбинированную (процедурно-аппаратную) гибкость, сочетающую в себе достоинства процедурного и аппаратного способов организации РЗ. Поэтому в общем случае реальные цифровые и гибридные РЗ могут иметь гибкие программные и аппаратные средства.

Важным признаком гибкой РЗ является степень участия дежурного персонала в управлении перестройкой РЗ. Здесь следует выделить, прежде всего, ручное управление перестройки РЗ, когда дежурный должен дать команду о перестройке. Если такая команда формируется автоматически в самой гибкой РЗ или других элементах АСУТП защищаемого объекта без участия дежурного персонала на основе информации о состоянии ОЗ или других объектов ЭЭС, то имеет место автоматическое управление перестройкой структуры РЗ. Возможна и комбинация ручного и автоматического управления - автоматизированное управление перестройкой.

Если в системе гибкой РЗ отсутствует специальный элемент БУ, выполняющий автоматическую перестройку РЗ, то перестройка производится дежурным персоналом вручную (ручная перестройка): перевод действия реле на сигнал, различные блокировки и т.д. В гибкой РЗ с автоматической перестройкой имеется БУ; его реализация может быть программой, аппаратной или комбинированной.



**Рисунок 2.12 Классификация гибких РЗ.**

Тот или иной способ реализации определяется техническими требованиями к гибкой РЗ: программный БУ не требует специальных аппаратных средств, кроме памяти, обеспечивает большую гибкость РЗ, но может не удовлетворять требованиям быстродействия. Аппаратно реализованный БУ, являясь жестким устройством, в определенной мере ограничивает гибкость РЗ. Поэтому для повышения гибкости БУ может быть также рекомендована комбинированная реализация БУ, например, в виде МП-устройства управления в сочетании с перестраиваемой универсальной коммутирующей структурой (УКС). Аналоговая гибкая РЗ может иметь любую реализацию БУ.

До последнего времени техническое совершенство устройств и систем РЗ оценивалось следующими основными их свойствами: селективностью, быстродействием, чувствительностью и надежностью. Дальнейшее совершенствование техники РЗ потребовало учета свойств более низкого уровня: защитоспособности, устойчивости функционирования [4]. Однако такие основные свойства РЗ, как и гибкость, живучесть, интегральное свойство качества функционирования в обеспечении безаварийности ОЗ, которые были присущи всем поколениям РЗ, не нашли ранее в литературе должного освещения. В новом поколении универсальных гибких РЗ благодаря широкому использованию в их структурах программируемых элементов получает существенное развитие свойство гибкости. Это заставляет рассмотреть влияние свойства гибкости РЗ на свойства живучести и качества (эффективности) функционирования в обеспечении безаварийности ОЗ при соблюдении заданных требований надежности. Указанные свойства в различной мере проявляются у систем, выполняющих функции основных и резервных защит. Известно [4], что основной обычно является полностью селективная, т.е. обладающая абсолютной селективностью, РЗ, предназначенная для функционирования при всех заданных видах повреждений в пределах всего защищаемого участка (зоны) с заданными параметрами по быстродействию, чувствительности, селективности и другими, обеспечивающими безаварийность функционирования защищаемого участка в аварийных ситуациях, что определяется интегральным свойством качества функционирования основной РЗ. Резервной является РЗ, предназначенная для работы вместо основной защиты данного участка в случае ее отказа или вывода из работы (ближнее резервирование), а также при КЗ на смежных участках и отказах (внезапных повреждениях) их защит или автоматических выключателей (дальнее резервирование). Поэтому свойство живучести системы РЗ в целом для ОЗ ЭЭС обеспечивается за счет дальнего резервирования РЗ смежных и других участков. Следует особо отметить, что из всех видов систем управления практически только системы РЗ обладают уникальными функциональными возможностями дальнего резервирования при условии получения необходимой информации только на защищаемом участке.

Свойство живучести системы РЗ обеспечивается резервными защитами, локально расположенными на различных участках ОЗ,

благодаря внутренней функциональной связи через ОЗ отдельных устройств РЗ. Указанная связь не требует организации каких-либо специальных каналов связи для непосредственного обмена информацией между устройствами РЗ смежных участков.

## **2.7 Свойства живучести гибких систем релейной защиты.**

Рассмотрим основные различия родственных свойств: надежности и живучести систем РЗ. Надежность обычно трактуется как сложное свойство системы, включающее показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Действующий ГОСТ 27.002 83 детально регламентирует сущность указанных понятий. В литературе освещены методы анализа и обеспечения необходимого уровня показателей, характеризующих эти свойства [12]. Важнейшей составляющей надежности систем является свойство безотказности, характеризующее способность системы непрерывно сохранять работоспособность в заданных регламентных условиях и на заданном по времени интервале эксплуатации. Для систем, модель работоспособности определяется как вероятная оценка способности РЗ выполнять заданные функции работоспособности с заданным качеством функционирования (по селективности, чувствительности, быстродействию и др.) при регламентных условиях ее эксплуатации в течение заданного интервала времени. Показатели и способы, принятые для оценки и повышения надежности устройств защит предыдущих поколений, целесообразно использовать и для систем гибких РЗ. Основное отличие заключается в том, что необходимый уровень функциональной надежности систем РЗ с жесткой архитектурой обычно обеспечивается избыточным наращиванием аппаратных средств, что сопровождается определенным ухудшением их аппаратной надежности. Гибкие системы РЗ без наращивания аппаратных средств, а в некоторых случаях и при их сокращении позволяют обеспечить заданный уровень работоспособности за счет функциональной избыточности при сохранении или повышении аппаратной надежности системы. Необходимо отметить, что свойство гибкости позволяет реализовать ОРЗ и РРЗ на основе общих технических средств, что, например, используется в панелях дистанционных защит.

Системы РЗ всех поколений создавались таким образом, чтобы обеспечивались не только необходимые показатели их надежности, но и не менее важные для систем РЗ показатели их живучести, не рассмотренные в литературе в достаточном объеме. Анализируя приведенные в [4,13,14] сведения о живучести систем электроэнергетики, управляющих и вычислительных систем, а также сведения о характере тяжелых системных аварий в ЭЭС, носящих каскадный характер, можно обобщенно сформулировать понятие свойства живучести технического объекта, которое заключается в его способности выполнять заданные функции в процессе внешних неблагоприятных воздействий (НВ) на весь объект или отдельные его элементы, поддерживая в допустимых пределах свои эксплуатационные показатели. Следовательно, под свойством живучести системы РЗ следует понимать способность системы сохранять свои основные функции (хотя бы с допустимой потерей качества) при внешних НВ, выходящих за рамки регламентных условий. При этом надежность как свойство системы РЗ проявляется при регламентном уровне внутренних возмущающих воздействий, а живучесть - при внешних воздействиях, существенно превышающих регламентные условия, для РЗ граница между внутренними регламентными и внешними нерегламентными воздействиями может быть установлена следующим образом. К первым относятся режимы, при которых возникает аварийная ситуация (обычно КЗ) в электрооборудовании защищаемого участка, причем устройства РЗ указанного участка сохраняют работоспособность а условия их функционирования соответствуют регламентным. Ко вторым относятся все нерегламентные режимы функционирования ЭЭС, связанные с внезапным внешним НВ (землетрясения, пожары и т.д.), выводящие из строя как электрооборудование участка, так и устройства РЗ, установленные на нем.

## Вопросы для самопроверки по главе

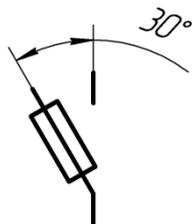
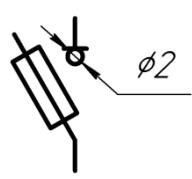
1. Назовите и охарактеризуйте основные элементы релейной защиты.
2. Каковы основные недостатки релейной защиты, выполняемой на электромеханических устройствах?
3. Назовите типы релейной защиты, выполненной на основе интегральных микросхем.
4. Охарактеризуйте структурную схему статических реле защит.
5. Почему выходной узел статических реле выполняется на основе электромагнитного реле?
6. Охарактеризуйте понятие архитектуры релейной защиты (РЗ).
7. Какие вы знаете типы архитектур РЗ? Охарактеризуйте их.
8. Виды обработки информации устройствами РЗ.
- 9 Способы организации информационной связи РЗ с объектами защиты
10. Понятие гибкости структуры РЗ и его составляющие.
11. Классификация гибких РЗ.
12. Свойства живучести гибких РЗ.

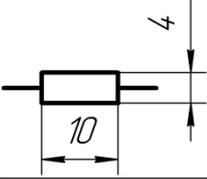
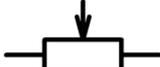
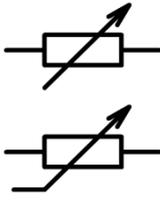
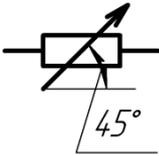
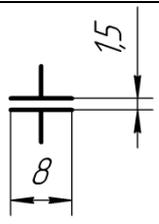
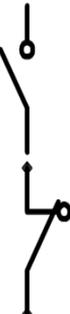
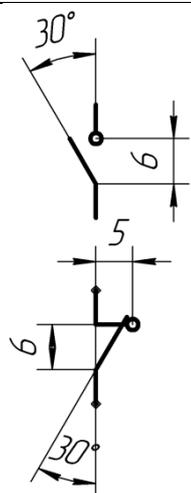
## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Линт Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. -112с.
2. Калявин В.П. Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок: учебное пособие / Мар. Гос.. Университет. – Йошкар-Ола, 2000. – 348 с.
3. Михайлов В.В., Кириевский Е.В., Ульницкий Е.М. и др. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты/Под ред. В.П. Морозкина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 398 с.
5. Поляков В.Е., Штейнберг Е.Г. Ситуационная релейная защита энергосистем/ Энергетика и транспорт. – 1982. -№3. – с. 26 -33.
6. Михайлов В.В., Сычев В.А., Ханжиев А.С. Гибридные релейные защиты с гибкой структурой // Изв. Северо – Кавказского научного центра высшей школы. Сер. Технические науки. – 1986. - №2. – с. 65-72.
7. Каралькин М.Е., Кириевский Е.В., Михайлов В.В., Ханжиев А.С. Перспективы реализации гибких релейных защит на современной микроэлектронной базе // Изв. Северо – Кавказского научного центра высшей школы. Сер. Технические науки. – 1986. - №2. – с. 65 – 72.
8. Лещенко В.А., Киселев В.М., Куприянов Д.А. и др. Гибкие производственные комплексы. - М.: Машиностроение, 1984. – 587 с.
9. Системы параллельной обработки / Под ред. Д. Ивенса. – М. : Мир, 1985. – 283 с.
10. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. – М.: Наука, 1967. – 417 с.
11. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска/ Под ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
12. Пупырев Е.И. Перестраиваемые аппараты и микропроцессорные системы. – М.: Наука, 1984. – 342 с.
13. Фокин Ю.А. Надежность и эффективность сетей электрических систем. – М.: Высшая школа, 1989. -213 с.
14. Правила технической эксплуатации электрических сетей и станций Российской Федерации. – М.: Министерство топлива и энергетики, 1996. – 714 с.

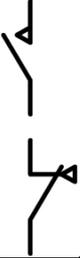
15. Кукеков Г.А., Васерина К.Н., Лукин В.П. Полупроводниковые электрические аппараты : учебн. пособие для вузов. –Л.: Энергоатомиздат, 1985. -328 с.
16. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
17. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
18. Чуников А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 453 с.
19. Мухортова Е.И., Белкин А.К., Шуляк А.А. Пассивные элементы электрических цепей: учебн. пособие/ Е.И. Мухортова, А.К. Белкин, А.А. Шуляк – Уфа, 2012. -359 с.
20. Мухортова Е.И., Валишин Д.Е. Учебные графические и буквенные обозначения наиболее распространенных элементов электрических схем/ Справочные материалы для дипломного и курсового проектирования. – Уфа, 2009. – 24 с.
21. Аипов Р.С., Костюкова Т.П. Бесконтактные и гибридные электрические аппараты: учебн. пособие. – Уфа: БГАУ, 2002. – 146с.

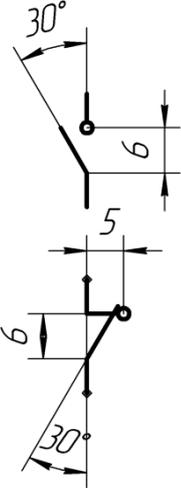
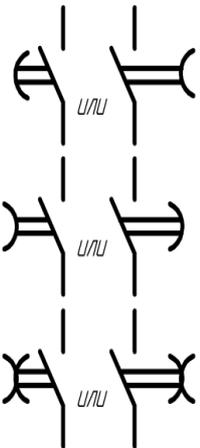
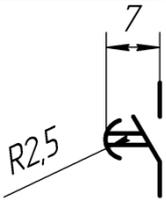
Таблица 1. Условные графические и буквенные обозначения наиболее распространенных элементов, применяемых в электрических схемах

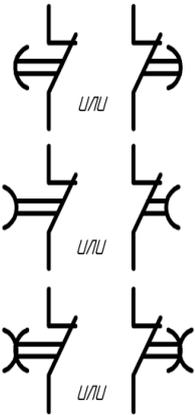
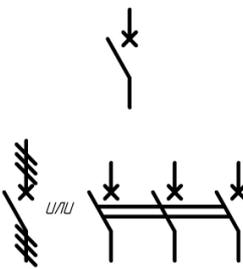
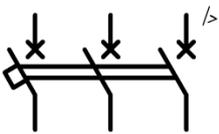
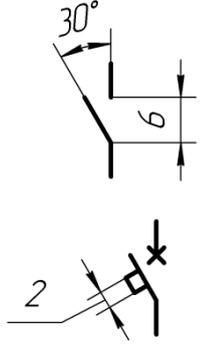
Наименование	Графическое обозначение	Размеры	Примечание	Бук - венный код
1	2	3	4	5
<b>Предохранители ГОСТ 2.727 - 02</b>				
Предохранитель плавкий. Общее обозначение				FU
Выключатель-предохранитель				QF
Разъединитель-предохранитель				F
Выключатель-разъединитель (с плавким предохранителем)				QF

Резисторы, конденсаторы ГОСТ 2.728 - 02				
Резистор постоянный				R
Резистор переменный				R
Переменный резистор в реостатном включении а) общее обозначение б) нелинейным регулированием				R
Конденсатор постоянной емкости				C
Конденсатор поляризованный				C
Устройства коммутационные и контактные соединения ГОСТ 2.755 - 00				
Контакт самовозврата а) замыкающий б) размыкающий				K

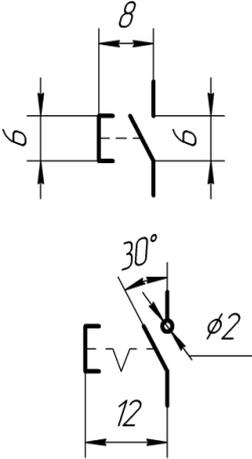
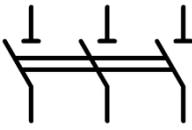
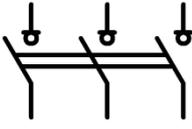
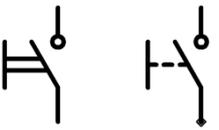
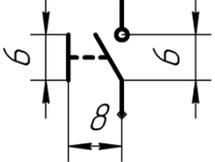
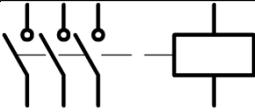
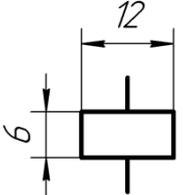
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Контакт самовозвратом</p> <p>а) замыкающий</p> <p>б) размыкающий</p>				К
<p>Контакт контактора</p> <p>а) замыкающий</p> <p>б) размыкающий</p> <p>в) замыкающий дугогасительный</p> <p>г) размыкающий дугогасительный</p> <p>д) замыкающий автоматическим срабатыванием</p>				К
<p>Контакт выключателя</p>				К
<p>Контакт разъединителя</p>				К
<p>Контакт выключателя-разъединителя</p>				К

1	2	3	4	5
<p>Контакт концевого выключателя:</p> <p>а) замыкающий</p> <p>б) размыкающий</p>				К
<p>Контакт, чувствительный к температуре (термоконтакт)</p> <p>а) замыкающий</p> <p>б) размыкающий</p>				К
<p>Контакт замыкающий замедлением, действующим:</p> <p>а) при срабатывании</p> <p>б) при возврате</p> <p>в) при срабатывании и возврате</p>			<p>Замедление происходит при движении в направлении от дуги к ее центру</p>	К

1	2	3	4	5
<p>Контакт размыкающий с замедлением, действующим: а) при срабатывании  б) при возврате  в) при срабатывании и возврате</p>				К
<p>Контакт замыкающий выключателя а) однополюсный;  б) трехполюсный.</p>				SB
<p>Контакт замыкающий выключателя трехполюсного с автоматическим срабатыванием максимального тока</p>				QF

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Контакт замыкающий нажимного кнопочного выключателя без самовозврата, с размыканием и возвратом элемента управления</p> <p>а) автоматический</p> <p>б) посредством вторичного нажатия кнопки</p> <p>в) посредством вытягивания кнопки</p>				SB
<p>Разъединитель трехполюсный</p>				QS
<p>Выключатель разъединитель</p>				QS
<p>Выключатель ручной</p>				
<p>Выключатель электромагнитный (реле)</p>				

Приборы электроизмерительные ГОСТ 2.729 - 02				
1	2	3	4	5
Прибор электроизмерительный а) показывающий б) регистрирующий  в) интегрирующий (например, счетчик электрической энергии)			*При отсутствии двухбуквенного кода использовать общее обозначение	Р*  PS
Назначение прибора:				
а) амперметр	<b>A</b>		Буквенные обозначения единиц измерения или измеряемых величин, которые помещают внутри графического обозначения электроизмери- тельного прибора	PA
б) вольтметр	<b>V</b>			PV
в) вольтамперметр	<b>VA</b>			P
г) ваттметр	<b>W</b>			PW
д) микроамперметр	<b><math>\mu</math>A</b>			PA
е) миллиамперметр	<b>mA</b>			PA
ж) милливольтметр	<b>mV</b>			PV
з) омметр	<b><math>\Omega</math></b>			PR
и) мегомметр	<b>M<math>\Omega</math></b>			PR
к) частотомер	<b>Hz</b>			PF
л) фазомер: - измеряющий сдвиг фаз -измеряющий коэффициент мощности	$\varphi$  Cos $\varphi$			
м) счетчик ампер-часов	<b>Ah</b>			

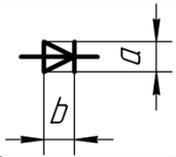
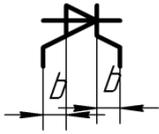
1	2	3	4	5						
н) счетчик ватт-часов	Wh									
о) счетчик вольт-ампер- часов реактивный	varh									
п) термометр, пилومتر	t°									
р) тахометр	n									
с) измеритель давления	Pa или P									
т) измеритель уровня жидкости										
<b>Приборы полупроводниковые ГОСТ 2.730 -02</b>										
Диод			<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>a</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> </table>	a	5	6	b	4	5	VD
a	5	6								
b	4	5								
Тиристор триодный симметричный			VS							
Тиристор триодный запираемый в обратном направлении управлением а) по аноду б) по катоду	 		VS							

Таблица 2 Характеристика преобразователя частоты фирмы SEW для двигателя мощностью 30кВт

показатель	
Вход	
1	2
Напряжение сети, $U_c$	Трехфазная сеть 3 x 380 В
Частота сети, $f_c$	50/60 Гц
Номинальный ток сети, $I_c$	54 А
Выход	
Выходное напряжение	$3 \cdot 0 \div 380 \text{ В}, \frac{U}{f} = \text{const} \cdot I \times R$ - компенсацией
Выходная частота	0 ÷ 400 Гц
Выходной ток, $I_n$	60 А
Частота ШИМ	4/8/12/16 кГц
Разрешение по частоте	0,005 Гц
1	2
Потери мощности при $I_n$	950 Вт
Ограничение тока	125% $I_n$ в положительном режиме, 150 % $I_n$ до 60 с
Время пуска	0 ÷ 999 с
Масса	15 кг

Таблица 3 Параметры стандартных IGBT - модулей (ОАО «Электровыпрямитель»)

Тип	$U_k$	$I_{коль}$	$I_{к.имп}$	$U_{кэ}$	$t_{отк}$	$t_{зак}$	$\Theta_{max}$	$U_{изм}$	$m$
	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	$\mu\text{с}$	$\mu\text{с}$	$^{\circ}\text{C}$	<i>B</i>	<i>кг</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Корпус 25 x 38 мм									
МТКИ-15-12	1200	15	30	2.5	0.1	0.4	150	2500	0.025
МТКИ-25-12	1200	25	50	2.5	0.14	0.42	150	2500	0.025
МТКИ-50-12	1200	50	100	2.5	0.1	0.38	150	2500	0.025
МТКИ-50-12-1	1200	50	100	2.5	0.1	0.38	150	2500	0.025
Корпус 61.5 x 106.5 мм									
МТКИ2-200-12	1200	200	400	2.5	0.19	0.55	150	2500	0.35
МТКИ2-300-12	1200	300	600	2.5	0.21	0.6	150	2500	0.35
МТКИ2-400-12	1200	400	800	2.5	0.21	0.55	150	2500	0.35
Корпус 130 x 140 мм									

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
МТКИ-800-12	1200	800	1600	2.7	0.8	1.0	150	2500	1.5
МТКИ-1200-12	1200	1200	2400	2.7	0.8	1.0	150	2500	1.5
МТКЛ-1600-12	1200	1600	3200	2.7	0.8	1.0	150	2500	1.5
МТКИ-1000-25	2500	1000	2000	3.0	1.05	2.2	150	5000	1.5
МТКИ-800-33	3300	800	1600	3.5	0.62	1.7	150	6000	1.5
Корпус 140 x 190 мм									
МТКИ-1800-12	1200	1800	3600	2.7	0.8	1.0	150	2500	2.1
МТКИ-2400-12	1200	2400	4800	2.7	0.8	1.0	150	2500	2.1
МТКИ-1500-25	2500	1500	3000	3.0	1.05	2.2	150	5000	2.1
МТКИ-1200-33	3300	1200	2400	3.5	0.62	1.7	150	6000	2.1
Корпус 61.5 x 106.5 мм									
МТКИ-200-12Н	1200	200	400	2.1	0.19	0.59	150	2500	0.35
МТКИ-300-12Н	1200	300	600	2.1	0.19	0.59	150	2500	0.35
МТКИ-400-12Н	1200	400	800	2.1	0.19	0.59	150	2500	0.35
МТКИ2-200-12Н	1700	200	400	2.7	0.2	0.9	150	4000	0.35
МТКИ2-300-12Н	1700	300	600	2.7	0.2	0.9	150	4000	0.35
МТКИ2-400-12Н	1700	400	800	2.7	0.2	0.9	150	4000	0.35
Корпус 130 x 140 мм									
МТКИ2-800-12Н	1200	800	1600	2.1	0.45	1.0	150	2500	1.5
МТКИ2-1200-12Н	1200	1200	2400	2.1	0.75	1.14	150	2500	1.5
МТКИ2-1600-12Н	1200	1600	3200	2.1	0.49	1.16	150	2500	1.5
МТКИ2-800-12Н	1700	800	1600	2.7	0.44	1.1	150	4000	1.5
МТКИ2-1200-12Н	1700	1200	2400	2.7	0.46	1.1	150	4000	1.5
МТКИ2-1600-12Н	1700	1600	3200	2.7	0.49	1.2	150	4000	1.5
МТКИ2-800-33Н									

Таблица 4 Магнитные пускатели серий ПМЕ и ПАЕ

Тип	Номинальный ток, А при напряжениях 380/500 В	Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
1	2	3	4
ПМЕ-001	3/1,5	75x65x119	нет
ПМЕ-002	3/1,5	121x83x101	есть
ПМЕ-003	3/1,5	90x150x118	нет
ПМЕ-004	3/1,5	135x150x118	есть
ПМЕ-111	10/6	68x85x84	нет
ПМЕ-112	10/6	154x102x91	есть
ПМЕ-113	10/6	164x90x106	нет
ПМЕ-114	10/6	232x 90x107	есть
ПМЕ-211	25/14	102x90x118	нет
ПМЕ-212	25/14	195x98x126	есть
ПМЕ-213	25/14	130x205x155	нет
ПМЕ-214	25/14	180x205x155	есть
ПАЕ-311	40/21	214x114x144	нет
ПАЕ-312	40/21	275x114x121	есть
ПАЕ-313	40/21	214x239x114	нет
ПАЕ-314	40/21	264x239x121	есть
ПАЕ-411	63/35	290x183x135	нет
ПАЕ-412	63/35	290x183x135	есть
ПАЕ-413	63/35	275x343x135	нет
ПАЕ-414	63/35	275x343x135	есть
ПАЕ-511	110/61	335x200x156	нет
ПАЕ-512	110/61	335x200x156	есть
ПАЕ-513	110/61	320x338x170	нет
ПАЕ-514	110/61	320x338x170	есть
ПАЕ-611	146/80	380x230x190	нет
ПАЕ-612	146/80	380x230x190	есть
ПАЕ-613	146/80	385x435x190	нет
ПАЕ-614	146/80	385x435x190	есть

Таблица 5 Трехфазные тиристорные пускатели

Параметр	ПТ-16-380-У5, ПТ-16-380Р- У5	ПТ-40-380- У5, ПТ-40- 380Р-У5	ПТК-100- 380-БПК- 1000	ПТУ-63-380
1	2	3	4	5
Назначение	Включение и отключение асинхронных двигателей	Включение, отключение и реверс асинхронных двигателей	Для коммутации и защиты от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз	Для коммутации и защиты от коротких замыканий и перегрузок
Номинальное напряжение, В	380	380	380	380
Номинальный ток, А	16	40	100	63
Ток включения, А	100-130	200-360	-	-
Ток отключения, А	16-25	40-63	-	-
Стойкость при сквозных токах, А: термическая (при 0,1 с), электродинамическая	400 560	900 1650	-	-
Ток утечки, мА	20	20	20	20
Сопротивление изоляции в холодном состоянии, МОм	50	50	-	-
Коммутационная способность, А	400	900	1000	1700
Включающая способность, А	580	1650	1700	1700

Таблица 6 Параметры предохранителей типа ПР-2, 500 В

Тип предохранителя	Номинальный ток, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный ток отключен при напряжении		Габаритные размеры, мм
			380 В	500 В	
1	2	3	4	5	6
ПР-2-15	15	6; 10; 15	8000	7000	171x24,5x33
ПР-2-60	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	4500	3500	173x30,5x43
ПР-2-100	100	60; 80; 100	-	-	247x43x56
ПР-2-200	200	100; 125; 160; 200	11000	10000	296x56x76,5
ПР-2-350	350	200; 225; 260; 300; 350	13000	11000	346x72x10
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	23000	-	442x140x154
ПР-2-1000	1000	600; 700; 850; 1000	20000	20000	580x155x154

Таблица 7 Технические данные автоматов из серии АК, АЕ, АП

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА	
					Посто - янный	Пере - менный
1	2	3	4	5	6	7
АК-63	63	200-440	2,3	0,63-63	5	9
ЛК-50	50	320-400	2,3	2-50	4,5	9
АП-50	50	220-500	2,3	1,6-50	1,252	0,3-2
А-63	25	110-220	1	0,63-25	2	2,5
АЕ-1000	25	240	1	6-25	-	1,5
АЕ-2000	25, 63, 100	220-500	1, 2, 3		10	16
АС-25	25	220-380	2,3	1-20	3,2	2
АСТ-2/3	25	380	2,3	-	90	-
АЕ-2443	16, 20, 25, 5, 31, 40, 50, 63	380	3	-	-	-

## Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
1. Электрические аппараты	5
1.1 Общие сведения	5
1.2 Электрический контакт	9
1.3 Общие свойства электрической дуги и условия ее гашения	12
1.4 Аппараты ручного управления	17
1.5 Аппараты автоматического управления и защиты	20
1.6 Предохранители	26
1.7 Электромагнитные контакторы	28
1.8 Электромагнитное реле и контакторы переменного тока	32
1.9 Электромагнитное реле и контакторы постоянного тока	35
1.10 Реле	37
1.11 Бесконтактные аппараты	39
1.12 Тиристорные пускатели	40
1.13 Общая характеристика полупроводниковых аппаратов высокого напряжения	41
1.14 Гибридные электрические аппараты	43
1.15 Встроенная температурная защита	48
1.16 Фазочувствительные устройства защиты	49
1.17 Руководящие технические материалы (РТМ) «Методика выбора элементов пуско-регулирующей и защитной аппаратуры электроприводов машин»	51
2. Микропроцессорные системы релейной защиты	54
2.1 Интегральные микросхемы - техническая основа для создания аппаратуры релейной защиты	54
2.2 Основные узлы реле защиты, выполненные на операционных усилителях	56
2.3 Типы серийных реле защиты, выполненных на операционных усилителях	64
2.4 Тенденция перевода релейной защиты на средства вычислительной техники	71
2.5 Архитектурные особенности и основные свойства гибких систем релейной защиты	74
2.6 Особенности гибких систем релейной защиты	83
2.7 Свойства живучести гибких систем релейной защиты	90
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	93
ПРИЛОЖЕНИЯ	95