



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

**Д. И. Зализный**

**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ  
И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА  
В ЭНЕРГЕТИКЕ**

**КУРС ЛЕКЦИЙ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2014

УДК 621.317(075.8)  
ББК 31.2я73  
3-22

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 25.03.2014 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *К. С. Курочка*

**Зализный, Д. И.**

3-22 Микропроцессорные и электронные устройства в энергетике : курс лекций по од-  
ноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по от-  
раслям)» днев. и заоч. форм обучения / Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухо-  
го, 2014. – 99 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ;  
свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим  
доступа: [http:// library.gstu.by/StartЕК/](http://library.gstu.by/StartЕК/). – Загл. с титул. экрана.

Предназначен для подготовки к зачету по дисциплине «Микропроцессорные и электронные  
устройства в энергетике». Изложены принципы функционирования, основные характеристики и  
особенности применения микроэлектронных и микропроцессорных устройств для нужд энергетики.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заоч-  
ной форм обучения.

УДК 621.317(075.8)  
ББК 31.2я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2014

## Содержание

Введение	5
1 Помехоустойчивость электронных устройств	7
1.1 Причины помех и способы борьбы с ними	7
1.2 Испытания на помехоустойчивость	9
2 Принципы построения микроэлектронных устройств для нужд энергетики	14
2.1 Общие принципы	14
2.2 Входные преобразователи аналоговых и дискретных сигна- лов	15
2.3 Унифицированный измерительный орган реле тока и на- пряжения	17
2.4 Измерительный орган реле направления мощности	19
3 Принципы построения микропроцессорных устройств для нужд энергетики	23
3.1 Общие принципы	23
3.2 Микроконтроллеры и их функциональные возможности	24
4 Интерфейсы связи	28
4.1 Общая характеристика интерфейсов связи	28
4.2 Интерфейс связи ИРПС	34
4.3 Интерфейс RS232	34
4.4 Интерфейс RS485	36
4.5 Интерфейс Ethernet	37
5 Измерительные приборы для нужд энергетики	41
5.1 Мультиметры	41
5.2 Измерители сопротивлений	44
5.3 Диагностические приборы	51
6 Микропроцессорные приборы для учёта электрической и те- пловой энергии	61
6.1 Счётчики электроэнергии	61
6.2 Счётчики тепловой энергии	68
6.3 Автоматизированные системы контроля и учёта энергии	70
7 Микропроцессорные приборы для релейной защиты и авто- матики	73
8 Микропроцессорные приборы для систем автоматического управления	82
8.1 Электропривод	82
8.2 Автоматика управления освещением	85

8.3 Автоматика управления компенсацией реактивной мощности	86
8.4 Автоматика РПН силовых трансформаторов	89
9 Микропроцессорные системы диагностики электрооборудования	92
Литература	99

## Введение

Электронные устройства применяются в следующих областях энергетики:

- средства измерений;
- средства учёта;
- системы релейной защиты и автоматики;
- коммутационные аппараты;
- системы автоматического управления;
- системы диагностики;
- системы телемеханики и диспетчерского управления.

К электронным **средствам измерений** относят измерительные преобразователи и измерительные приборы.

**Электронные измерительные преобразователи** – это устройства, преобразующие напряжения, токи, температуры и другие измеряемые величины в нормированный электрический сигнал, пропорциональный значению требуемой расчётной величины и который может быть передан на расстояние. Бывают измерительные преобразователи напряжения, тока, частоты, активной, реактивной и полной мощности, температуры, давления и других величин.

**Электронные измерительные приборы** – это устройства, отображающие результаты измерений электрических и неэлектрических величин на дисплее. В энергетике применяют электронные вольтметры, амперметры, измерители сопротивлений и другие приборы. Измерительные приборы, совмещающие более трёх функций измерения, называют **мультиметрами**.

К **электронным средствам учёта** относят счётчики электрической и тепловой энергии, а также вспомогательные средства, обеспечивающие работу **АСКУЭ** – автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии.

Для организации **систем релейной защиты и автоматики** применяют **электронные реле** – устройства, осуществляющие сравнение измеряемых величин с заранее заданными их значениями - уставками, - и осуществляющие воздействие на коммутационные аппараты (как правило, высоковольтные выключатели) и средства сигнализации.

**Электронные коммутационные аппараты** – это автоматические выключатели, пускатели, и другие аппараты, которые могут применяться взамен их электромеханических аналогов.

**Электронные системы автоматического управления** – это устройства, обеспечивающие работу различных установок в требуемом режиме. К таким системам относят электроприводы, автоматику силовых трансформаторов и генераторов, режимную автоматику энергосистем.

**Электронные системы диагностики** – это устройства, осуществляющие анализ технического состояния электрооборудования и раннее выявление неисправностей, развивающихся в этом оборудовании.

**Электронные системы телемеханики и диспетчерского управления** – это набор устройств, обеспечивающих дистанционное воздействие на энергосистему специально обученных людей - диспетчеров.

Все электронные устройства, применяющиеся в энергетике, можно разделить на микроэлектронные и микропроцессорные.

**Микроэлектронные** – это устройства, состоящие из аналоговых и цифровых электронных средств, но не имеющие микропроцессорной системы.

**Микропроцессорные** – это устройства, основным блоком которых является микропроцессорная система, выполненная, как правило, в пределах одной микросхемы – микроконтроллера. Микропроцессорные устройства в энергетике принято также называть **цифровыми**.

Достоинства микроэлектронных устройств:

- относительная простота электронных схем и высокая надёжность работы;
- высокая ремонтпригодность;
- высокая помехоустойчивость.

Достоинства микропроцессорных устройств:

- широкие функциональные возможности;
- возможность работы в сети и обмена данными с компьютером;
- высокая информативность отображаемой информации.

На сегодняшний день большинство микроэлектронных устройств считаются морально устаревшими и заменяются на более совершенные микропроцессорные.

# 1 Помехоустойчивость электронных устройств

## 1.1 Причины помех и способы борьбы с ними

Большинство электронных устройств, применяющихся в энергетике, работают в условиях значительных электромагнитных помех из-за высоких напряжённостей электрического и магнитного полей возле силовых элементов систем электроснабжения. Дополнительным источником помех являются грозовые и коммутационные перенапряжения в электрических сетях.

**Грозовые перенапряжения** обусловлены следующими факторами:

- при непосредственном ударе молнии в линию из-за протекания разрядного тока;
- при косвенном ударе молнии (внутри облака, между облаками, или в находящиеся вблизи объекты) образующиеся электромагнитные поля индуцируют напряжения или токи в линиях;
- при ударе молнии в грунт разрядный ток, протекая по земле, может создать разность потенциалов в системе заземления.

**Коммутационные перенапряжения** обусловлены следующими факторами:

- переключениями в мощных системах электроснабжения, например, коммутацией конденсаторных батарей;
- переключениями в системах электроснабжения малой мощности или изменениями нагрузки в электрических распределительных системах;
- резонансными колебаниями в электрических сетях, обусловленными работой таких переключающих приборов, как тиристоры;
- повреждениями в системах, такими как короткие замыкания на землю и дуговые разряды в электрических установках.

Существуют следующие **виды помех**, воздействующих на электронные устройства:

- помехи, проникающие по цепям измерения;
- помехи, проникающие по цепям питания;
- помехи, проникающие по цепям линий связи;
- помехи, проникающие по воздуху посредством радиоволн.

Все эти виды помех могут привести к ложным срабатываниям электронных устройств, их несрабатываниям, или даже вывести устройства из строя. Рассмотрим подробнее причины влияния помех на работу устройств и способы борьбы с ними.

Напряжения и токи, измеряемые в системах электроснабжения, подаются на измерительные цепи электронных устройств, как правило, через измерительные трансформаторы напряжения и тока, имеющие паразитные ёмкости между первичными и вторичными обмотками, и через контрольные кабели, проложенные параллельно силовым кабелям, где также имеют место паразитные ёмкости. Высокочастотные составляющие импульсных помех проникают через эти ёмкости в измерительные цепи устройства, влияя на его работу. Существуют следующие **способы борьбы** с такими помехами:

- используют промежуточные трансформаторы, обмотки которых секционируют, а между обмотками помещают электростатический экран в виде медной фольги или намотки одного слоя тонкого провода, которые заземляются;
- входные цепи устройства шунтируют варисторами и безиндуктивными конденсаторами;
- во входных преобразовательных устройствах применяют интегрирующие цепи и частотные фильтры с целью искусственного снижения быстродействия функциональных элементов устройства, то есть принимают компромиссное решение между быстродействием и помехоустойчивостью.

Паразитные ёмкости являются также причиной проникновения импульсных **помех по цепям питания** электронных устройств. Наиболее негативное влияние такие помехи оказывают на работу цифровых интегральных микросхем, в том числе и микропроцессорных. В блоках питания от переменного напряжения для борьбы с этим видом помех используют входные заграждающие фильтры. Наиболее распространённая схема такого фильтра приведена на рис. 1.1. Эта схема применяется в подавляющем большинстве блоков питания современных электронных устройств как промышленного, так и бытового назначения.

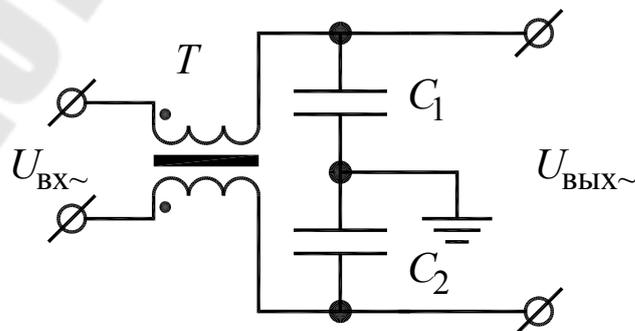


Рис. 1.1 Схема фильтра питания

Схема состоит из последовательно включенного трансформатора  $T$  с коэффициентом трансформации, равным единице, и конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  с равными ёмкостями. Индуктивности трансформатора оказывают сопротивление импульсным помехам. Конденсаторы дополнительно отфильтровывают высокочастотные составляющие помехи на землю.

**Помехи, проникающие по цепям линий связи**, обусловлены ёмкостью жила-оболочка сигнального кабеля. Для снижения значения этой ёмкости применяют экранирование кабелей в виде медной оплётки, охватывающей изоляцию жилы. Экран разбивает ёмкость изоляции на две ёмкости, включенные последовательно, что, соответственно, снижает суммарную ёмкость.

**Помехи, проникающие по воздуху посредством радиоволн**, обусловлены тем, что все проводники и провода печатной платы электронного устройства действуют как приёмные антенны, в которых индуцируется ЭДС, что приводит к сбоям в работе устройства. Борьба с этим видом помех наиболее сложна. Самый распространённый способ – экранирование корпуса прибора. Как правило, корпуса электронных устройств для автоматизации электрических сетей выполняют из металла – алюминия или стали. Сталь более предпочтительна, так как, являясь магнитным материалом, она экранирует и электрическую и магнитную составляющие электромагнитного поля. Алюминий же экранирует только электрическую составляющую. При этом корпус прибора должен иметь минимум отверстий, через которые может проникнуть внешнее поле.

## **1.2 Испытания на помехоустойчивость**

Все промышленные электронные устройства проходят испытания на помехоустойчивость в соответствии с МЭК (IEC) 61000-4 (ГОСТ Р 51317.4). Основные виды испытаний:

- устойчивость к электростатическим разрядам (МЭК 61000-4-2);
- устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю (МЭК 61000-4-3);
- устойчивость к наносекундным импульсным помехам (МЭК 61000-4-4);
- устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии (МЭК 61000-4-5);
- устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания (МЭК 61000-4-11);

- устойчивость к колебательным затухающим помехам (МЭК 61000-4-12).

Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам проводятся в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.2.

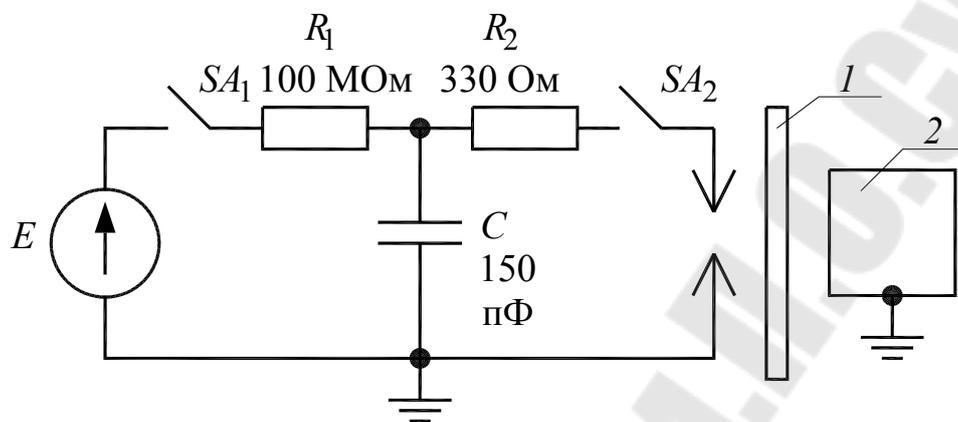


Рис. 1.2 Схема испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам: 1- изоляционная прокладка; 2 – испытуемое устройство

Источник высоковольтного постоянного напряжения  $E$  с помощью ключа  $SA_1$  через резистор  $R_1$  подключается к конденсатору  $C$ , заряжая его. Затем ключ  $SA_1$  размыкается и замыкается ключ  $SA_2$ , создавая разряд между пластинами. При этом фиксируют требуемые параметры испытуемого устройства и делают вывод о его устойчивости к электростатическим разрядам. Значение напряжения  $E$  может составлять 2 кВ для 1 класса жёсткости испытаний и 4 кВ для 4 класса жёсткости испытаний.

Схема испытательной установки для испытаний на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю приведена на рис. 1.3.

Испытания проводят в экранированном помещении модулированным и немодулированным радиочастотным сигналом в полосах частот от 800 до 960 МГц и от 1,4 до 6 ГГц при напряжённости поля 120 мкВ/м для 1 класса жёсткости испытаний и 150 мкВ/м для 4 класса жёсткости испытаний.

Схема испытаний на устойчивость к наносекундным импульсным помехам приведена на рис. 1.4.

Источник высоковольтного постоянного напряжения  $E$  подключен к зарядному резистору  $R_1$  и накопительному конденсатору  $C_1$ . В требуемые моменты времени с помощью блока управления БУ замыкается электронный ключ  $VT$ , разряжая конденсатор  $C_1$  на резистор

цепи формирования длительности импульса  $R_2$ . При этом на требуемый вход испытываемого устройства  $IУ$  через согласующий резистор  $R_3$  и разделительный конденсатор  $C_2$  подаётся короткий импульс длительностью около 10 нс.

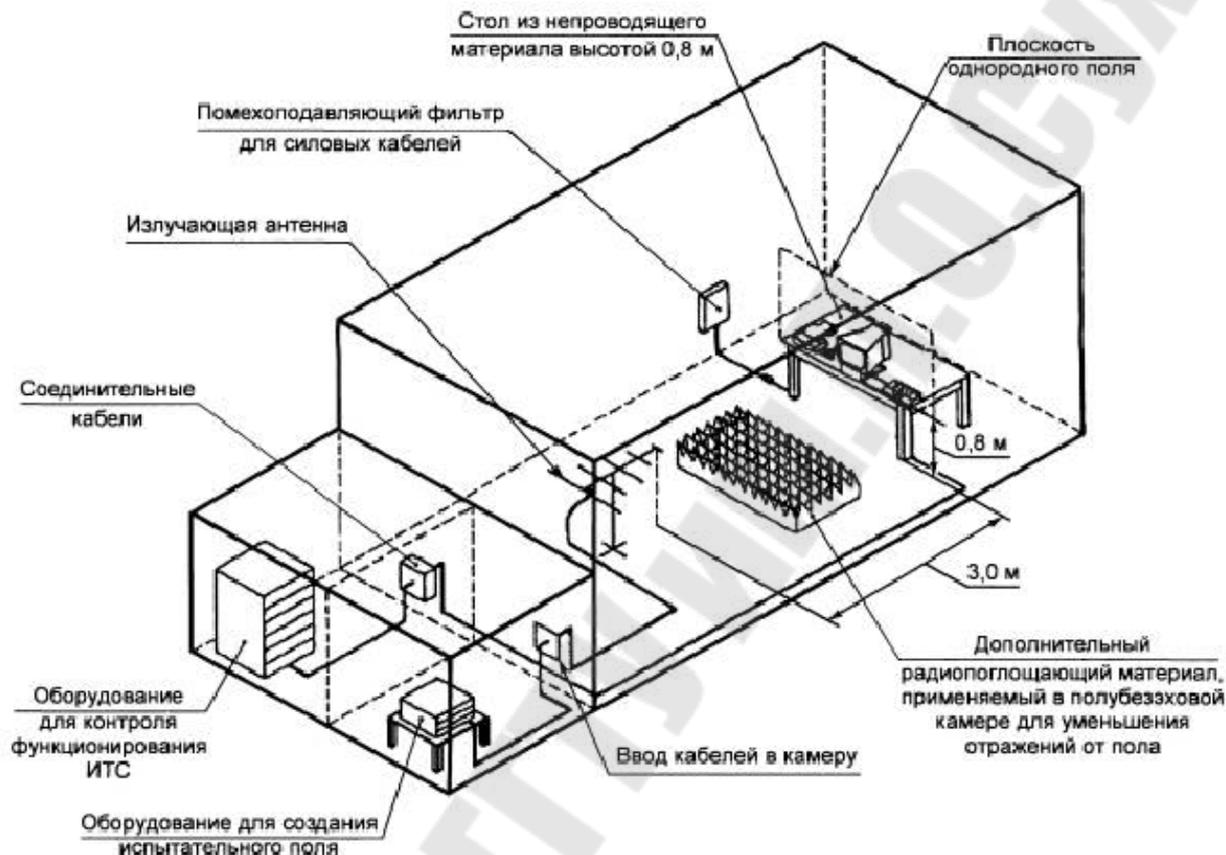


Рис. 1.3 Схема испытательной установки на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю

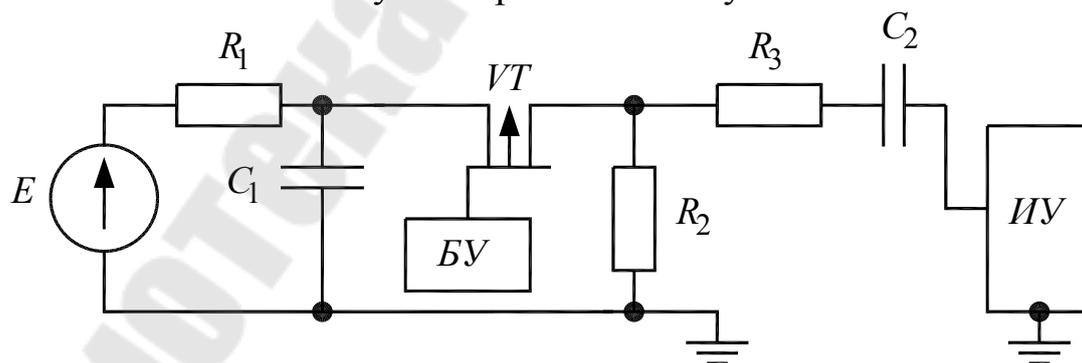


Рис. 1.4 Схема испытаний на устойчивость к наносекундным импульсным помехам

Блок управления замыкает и размыкает электронный ключ таким образом, что короткие импульсы поступают на испытываемое устройство пакетами. Длительность одного пакета импульсов составляет 15 мс, а период повторения пакетов – 300 мс. Амплитуда импульсов

составляет 0,5 кВ для 1 класса жёсткости испытаний и 4 кВ для 4 класса жёсткости испытаний.

Схема испытаний на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии аналогична схеме, приведенной на рис. 1.4, только вместо конденсатора  $C_2$  устанавливается дроссель (катушка индуктивности). Элементы цепи выбираются таким образом, чтобы при коммутации электронного ключа длительность фронта импульса составляла 1 мкс, а длительность импульса – 50 мкс в режиме холостого хода по отношению к выходу схемы, и, соответственно, 6,4 мкс и 16 мкс в режиме короткого замыкания. Значение напряжения  $E$  может составлять 0,5 кВ для 1 класса жёсткости испытаний и 4 кВ для 4 класса жёсткости испытаний.

Схема испытаний на устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания приведена на рис. 1.5.

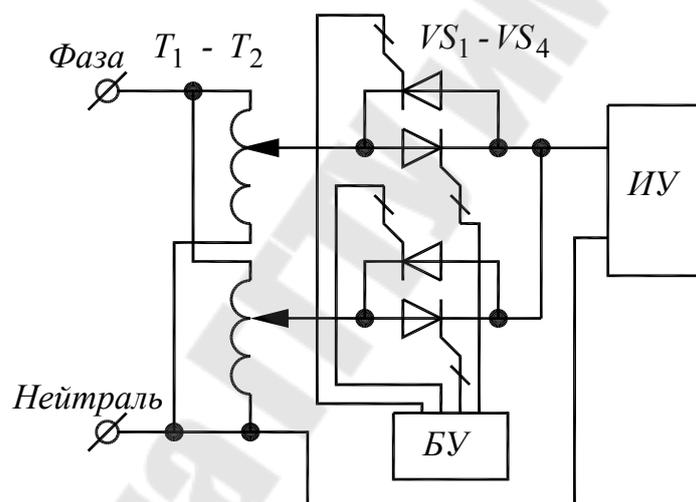


Рис. 1.5 Схема испытаний на устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания

Напряжение электрической сети, соответствующее напряжению питания испытуемого устройства  $ИУ$  через два автотрансформатора  $T_1$ ,  $T_2$  и двухоперационные тиристоры (типа GTO)  $VS_1...VS_4$ , управляемые с помощью микропроцессорного блока управления  $БУ$ , подаётся на цепь питания  $ИУ$ . Каждая пара тиристоров представляет собой двунаправленный электронный ключ. Отклонения напряжения имитируют путём попеременной коммутации этих ключей и изменением положения регуляторов автотрансформаторов. При этом ключи никогда не замыкаются одновременно, а одновременно могут быть разомкнуты не более 100 мс.

Схема испытаний на устойчивость к колебательным затухающим помехам аналогична схеме, приведенной на рис. 1.4, только вместо резистора  $R_2$  устанавливается дроссель (катушка индуктивности). Элементы цепи выбираются таким образом, чтобы при коммутации электронного ключа период затухающих колебаний составлял 10 мкс, а длительность процесса – не более 4 периодов.

В результате испытаний на помехоустойчивость формируют следующие основные критерии качества испытываемых устройств (ИУ):

- А – нормальное функционирование ИУ в соответствии с требованиями, установленными изготовителем или заказчиком;
- В – временное прекращение выполнения функций ИУ или ухудшение качества функционирования, которые исчезают после прекращения помехи и не требуют вмешательства оператора для восстановления работоспособности;
- С – временное прекращение выполнения функций ИУ или ухудшение качества функционирования, которые требуют вмешательства оператора;
- D – прекращение выполнения функций ИУ или ухудшение качества функционирования, которые не могут быть восстановлены из-за повреждений ИУ или его программного обеспечения.

Среди электронных устройств, применяющихся в энергетике, наибольшей помехоустойчивостью обладают микроэлектронные устройства, а наименьшей помехоустойчивостью – микропроцессорные устройства. Причины этого будут рассмотрены далее.

## 2 Принципы построения микроэлектронных устройств для нужд энергетики

### 2.1 Общие принципы

**Микроэлектронными** называют устройства, выполненные на основе таких электронных компонентов, как транзисторы, операционные усилители, цифровые интегральные микросхемы малой и средней степени интеграции.

Обобщённая функциональная схема микроэлектронного устройства автоматики приведена на рис. 2.1.

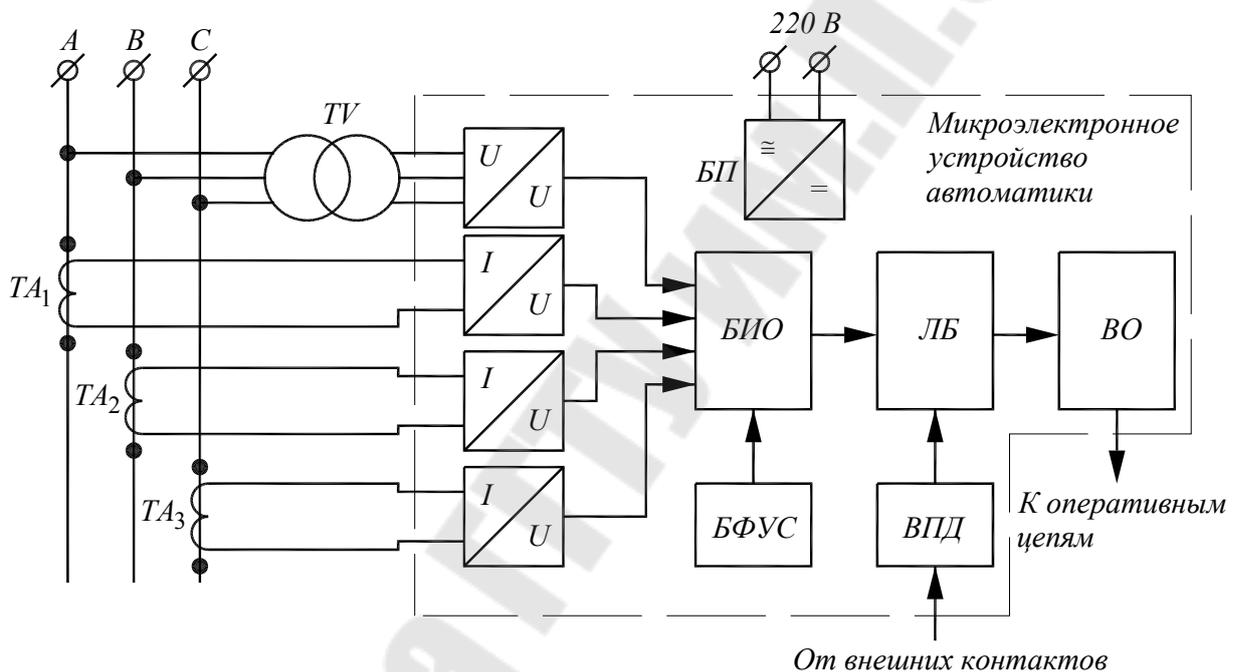


Рис. 2.1 Обобщённая функциональная схема микроэлектронного устройства автоматики

Трёхфазные напряжения и токи некоторого участка системы электроснабжения через трёхфазный измерительный трансформатор напряжения  $TV$  и измерительные трансформаторы тока  $TA_1 \dots TA_3$  поступают на входные преобразователи «напряжение - напряжение» и «ток - напряжение», которые снижают значения этих величин до уровня, необходимого для работы электронных схем. Полученные сигналы подаются на блок измерительных органов  $БИО$ .

**Измерительный орган** – это часть микроэлектронного устройства, предназначенная для сравнения измеряемой величины с её заранее заданным значением – **уставкой**, - и выдачи сигнала управления типа «включить - выключить».

Уставки формируются оператором с помощью внешних переключателей или регуляторов в блоке формирования уставок *БФУС*.

На выходах измерительных органов формируются цифровые сигналы управления, которые поступают на логический блок *ЛБ*, реализующий логические операции «И», «ИЛИ», «НЕ», а также выдержки по времени. На этот же блок поступают дискретные сигналы от внешних цепей управления через входной преобразователь дискретных сигналов *ВПД*.

В соответствии с заданным алгоритмом логический блок подаёт сигнал на включение или отключение выходного органа *ВО*, который выполняется, как правило, в виде небольшого промежуточного электромеханического реле. Контакты этого реле подключаются к оперативным цепям управления высоковольтным выключателем.

Питание микроэлектронных реле может осуществляться как от цепей измерения, так и от специальных оперативных цепей постоянного и переменного тока. В последнем случае устройство имеет блок питания *БП*.

В реальных устройствах, как правило, имеется лишь часть входных элементов рассмотренной обобщённой схемы. Так, например, в большинстве случаев в качестве входной величины используется одна фаза напряжения или тока.

## 2.2 Входные преобразователи аналоговых и дискретных сигналов

В качестве входных преобразователей аналоговых сигналов обычно используют промежуточные трансформаторы напряжения и тока с электростатическим экраном, как показано на рис. 2.2.

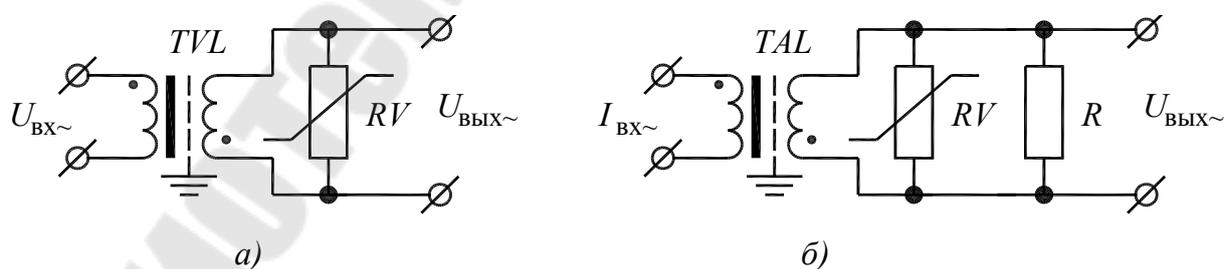


Рис. 2.2 Входные преобразователи аналоговых сигналов

**Входной преобразователь напряжения** (рис. 2.2, а) помимо понижающего трансформатора *TVL* содержит варистор *RV* для ограничения перенапряжений. Обмотки трансформатора включены встречно для того, чтобы он не вносил фазовый сдвиг  $180^\circ$ .

На линейной части характеристики намагничивания трансформатора входное и выходное напряжения связаны соотношением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{k_{\text{ТН}}}, \quad (2.1)$$

где  $k_{\text{ТН}}$  - коэффициент трансформации.

Номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора  $TVL$  равно номинальному напряжению вторичной обмотки соответствующего измерительного трансформатора напряжения, то есть в большинстве случаев составляет 100 В. Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора  $TVL$ , как правило, не превышает 10 В.

**Входной преобразователь тока** (рис. 2.2, б) содержит понижающий трансформатор тока  $TAL$ , варистор  $RV$  и нагрузочный резистор  $R$ . На линейной части характеристики намагничивания трансформатора входной ток и выходное напряжение связаны соотношением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{I_{\text{ВХ}} \cdot R}{k_{\text{ТТ}}}, \quad (2.2)$$

где  $k_{\text{ТТ}}$  - коэффициент трансформации.

Из (2.2) следует, что резистор  $R$  должен быть прецизионным, то есть высокоточным.

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора  $TAL$  равен номинальному току вторичной обмотки соответствующего измерительного трансформатора тока, то есть в большинстве случаев составляет 5 А. Номинальный ток вторичной обмотки трансформатора  $TAL$ , как правило, не превышает 20 мА. Сопротивление резистора  $R$  подбирают таким образом, чтобы действующее значение напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  не превысило 10 В.

Схема **входного преобразователя дискретных сигналов** приведена на рис. 2.3.

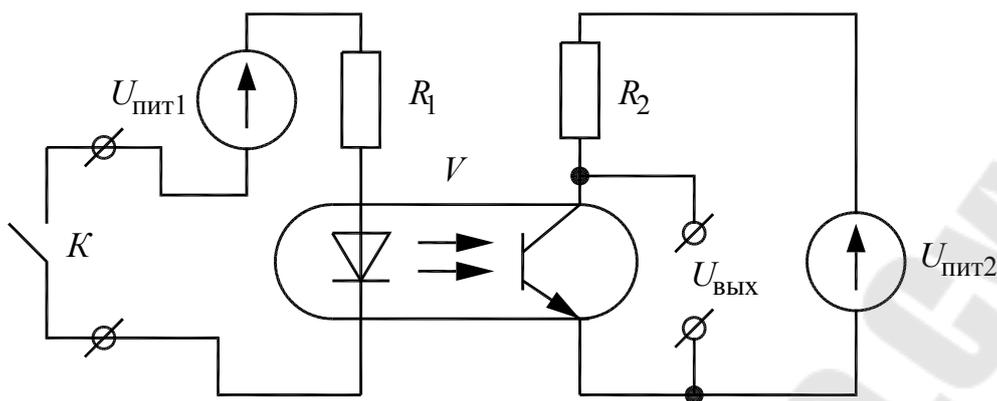


Рис. 2.3 Входной преобразователь дискретных сигналов

Этот преобразователь состоит из двух гальванически несвязанных источников постоянного напряжения  $U_{\text{пит1}}$  и  $U_{\text{пит2}}$ , оптопары (оптрона)  $V$ , и резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Вход такого преобразователя является пассивным, то есть на него не подаются ни напряжение ни ток, а подключена цепь механических контактов  $K$ , в качестве которых могут быть блокировочные контакты высоковольтного выключателя, контакты промежуточного реле, или выходные контакты блока РЗА. Оptron  $V$  необходим для гальванического разделения входных и выходных цепей с целью повышения помехоустойчивости устройства.

### 2.3 Унифицированный измерительный орган реле тока и напряжения

В настоящее время в эксплуатации находится значительное количество микроэлектронных статических реле тока и напряжения типа РСТ и РСН. Схемы этих реле унифицированы и практически целиком являются измерительными органами.

Схема унифицированного измерительного органа реле тока и напряжения приведена на рис. 2.4.

Входное напряжение  $U$ , пропорциональное току или напряжению в линии, выпрямляется с помощью двухполупериодного выпрямителя  $V_1$  и через ограничительный резистор  $R_1$  поступает на инвертирующий вход операционного усилителя  $DA_1$ , включенного по схеме компаратора. На неинвертирующий вход через делитель  $R_2 \dots R_5$  подаётся опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$  положительного знака, определяющее уставку реле. Переключатели  $SA_1 \dots SA_3$  позволяют изменять это напряжение путём закорачивания соответствующих резисторов. Диод  $VD_1$  служит для защиты входов  $DA_1$  от перенапряжений.

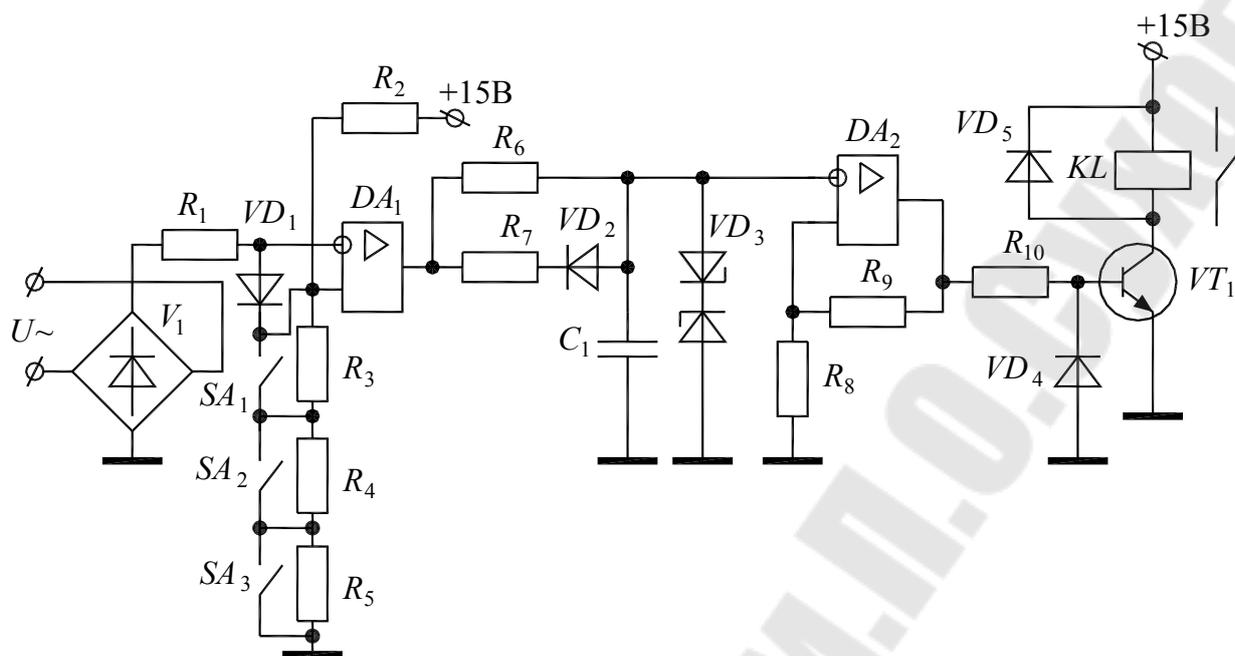


Рис. 2.4 Унифицированный измерительный орган реле тока и напряжения

При отсутствии аварийной ситуации в защищаемой линии, когда амплитуда входного напряжения  $U_m$  не превышает значение опорного напряжения, на выходе  $DA_1$  наблюдается неизменное напряжение насыщения положительного знака, то есть максимальное выходное напряжение, и конденсатор  $C_1$  заряжен до этого напряжения. На выходе триггера Шмитта, собранного на операционном усилителе  $DA_2$  и резисторах  $R_8$ ,  $R_9$ , появляется постоянное напряжение насыщения отрицательного знака, которое через ограничительный резистор  $R_{10}$  запирает электронный ключ, собранный на транзисторе  $VT_1$ , и ток в катушке реле  $KL$  не протекает. Это соответствует недействию защиты. Диод  $VD_5$  защищает транзистор  $VT_1$  от перенапряжений при обрыве тока в индуктивности катушки  $KL$ .

При наличии аварийной ситуации в защищаемой линии, например, короткого замыкания, амплитуда входного напряжения  $U$  превышает значение опорного напряжения, и на выходе  $DA_1$  появляются импульсы отрицательного знака. Эти импульсы подаются на интегрирующую цепь, собранную на элементах  $C_1$ ,  $R_6$ ,  $R_7$  и  $VD_2$ . При поступлении импульса отрицательного знака диод  $VD_2$  открывается и соединяет параллельно резисторы  $R_6$ ,  $R_7$ , уменьшая постоянную

времени зарядки конденсатора  $C_1$ . При поступлении импульса положительного знака диод  $VD_2$  закрывается, и конденсатор более медленно перезаряжается через резистор  $R_6$ . В результате на конденсаторе формируется напряжение пилообразной формы. Среднее значение этого напряжения принимает отрицательный знак и при дальнейшем снижении приводит к переключению триггера Шмитта, на выходе которого появляется постоянное напряжение насыщения положительного знака, отпирающее электронный ключ  $VT_1$ , и появляется ток в катушке реле  $KL$ , контакты реле замыкаются. Это соответствует срабатыванию защиты.

Контакты промежуточного реле  $KL$  подключают к цепям оперативного управления высоковольтным выключателем или устройствам сигнализации.

#### 2.4 Измерительный орган реле направления мощности

**Реле направления мощности** – это реле, реагирующее на фазовый сдвиг  $\varphi_p$  между током  $I_p$  и напряжением  $U_p$ , подаваемых на его входные цепи. Направление мощности срабатывания реле  $S_p$  зависит от этого фазового сдвига. Уравнение срабатывания реле имеет вид:

$$S_p = kU_p I_p \cos(\varphi_p + \varphi_{м.ч}), \quad (2.3)$$

где  $\varphi_{м.ч}$  - угол максимальной чувствительности.

Угловая характеристика срабатывания реле направления мощности приведена в полярной системе координат на рис. 2.5.

Угловым диапазоном срабатывания и возврата реле направления мощности составляет  $180^\circ$ . Если мощность положительная, то есть, направлена от шин в линию, то реле срабатывает, замыкая свои контакты. В этом случае вектор тока  $I_p$  расположен в зоне действия реле (незаштрихованная область на рис. 2.5). Если мощность имеет обратное направление (отрицательная), то реле не действует, и его контакты разомкнуты. Для исключения дребезга на границе срабатывания реле имеет некоторую зону переключения, обусловленную коэффициентом возврата реле, который должен быть не менее 0,85. Линия, разбивающая пополам зону переключения реле, называется **линией нулевой чувствительности** (л.н.ч.). Линия, разбивающая пополам зону действия реле, называется **линией максимальной чувствительности**

(л.м.ч.). Угол между этой линией и  $0^\circ$  называется **углом максимальной чувствительности**  $\varphi_{\text{м.ч}}$ . На рис. 3.4  $\varphi_{\text{м.ч}} = -45^\circ$ .

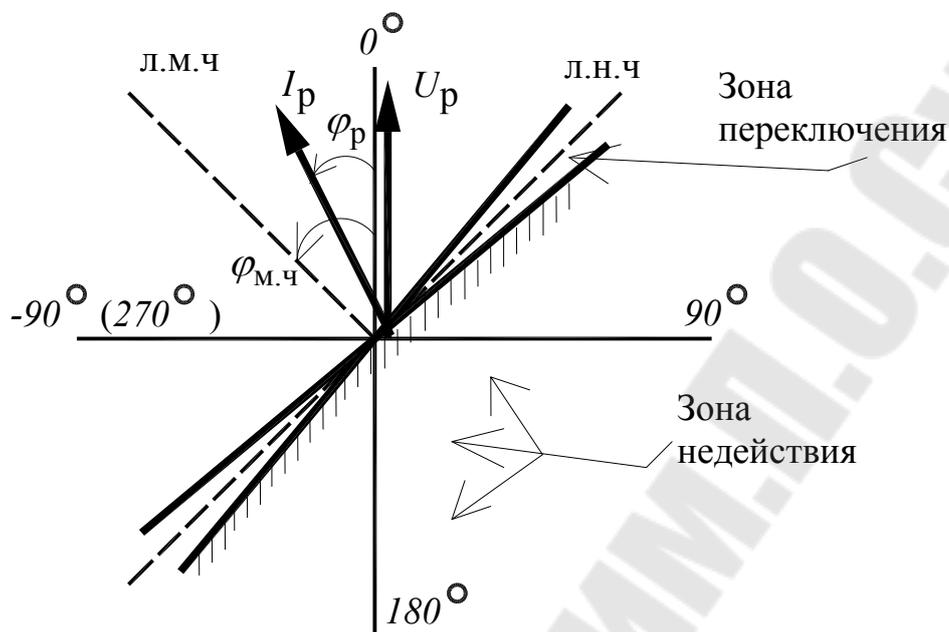


Рис. 2.5 Угловая характеристика реле направления мощности

Измерительные органы микроэлектронных реле направления мощности работают по принципу сравнения знаков полуволн двух напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , одно из которых пропорционально току в линии, а второе – напряжению.

Схема измерительного органа реле направления мощности на основе операционных усилителей приведена на рис. 2.6.

На операционных усилителях  $DA_1$ ,  $DA_2$  и резисторах  $R_1 \dots R_4$  реализованы формирователи прямоугольных импульсов из входных синусоидальных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Импульсы формируются по переходам синусоид через ноль.

Полученные импульсы поступают на входы блока сравнения знаков, выполненном на операционном усилителе  $DA_3$ , включенном по схеме компаратора, диодном мосте  $VD_1 \dots VD_4$ , и резисторах  $R_5 \dots R_8$ .

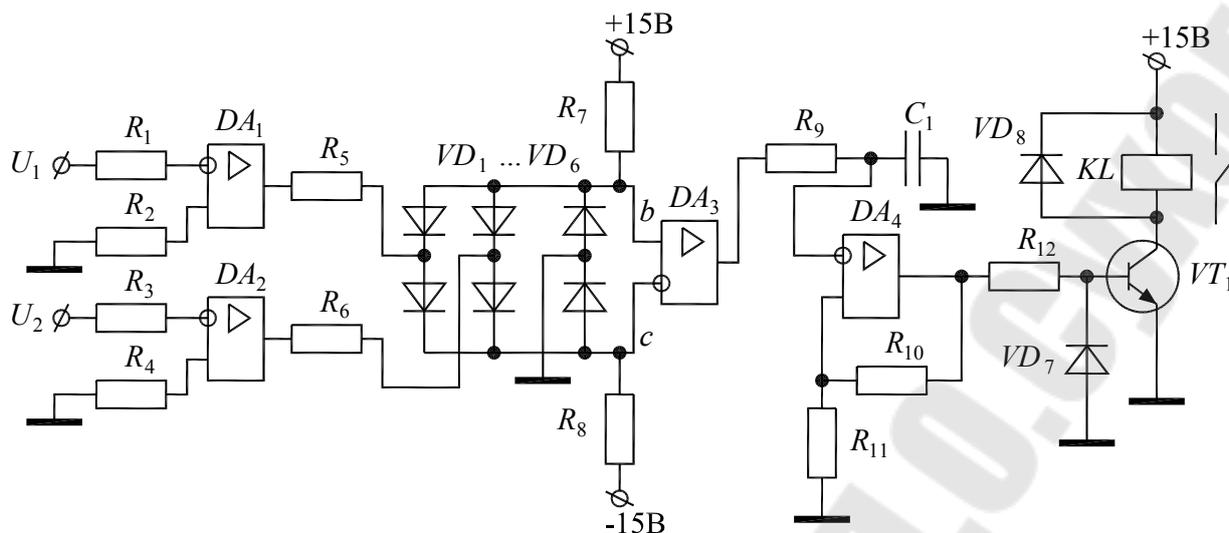


Рис. 2.6 Измерительный орган реле направления мощности

Прямоугольные импульсы с выходов  $DA_1$ ,  $DA_2$  подаются на оба входа диодного моста  $VD_1 \dots VD_4$ . Если знаки импульсов совпадают, то входное напряжение диодного моста равно нулю, и мост не работает. При этом все диоды  $VD_1 \dots VD_4$  будут открыты от источников питания  $+15\text{ В}$  и  $-15\text{ В}$  через резисторы  $R_7$ ,  $R_8$ . Потенциал в точке « $b$ » будет больше, чем потенциал в точке « $c$ », и на выходе компаратора  $DA_3$  появится напряжение насыщения положительного знака.

Если входные импульсы имеют разные знаки, то диоды  $VD_1 \dots VD_4$  работают как диодный мост. При этом потенциал в точке « $b$ » будет меньше, чем потенциал в точке « $c$ », и на выходе компаратора  $DA_3$  будет напряжение насыщения отрицательного знака. Диоды  $VD_5$ ,  $VD_6$  создают путь для протекания выходных токов диодного моста.

Интегрирующая цепь  $R_9$ ,  $C_1$  выделяет среднее значение сигнала, приходящего с выхода компаратора. В результате на конденсаторе  $C_1$  формируется пульсирующее напряжение, поступающее на вход триггера Шмитта, собранного на операционном усилителе  $DA_4$  и резисторах  $R_{10}$ ,  $R_{11}$ . Если время совпадения знаков сравниваемых напряжений будет больше времени их несовпадения, то среднее напряжение на конденсаторе  $C_1$  после нескольких пульсаций установится с отрицательным знаком.

Триггер Шмитта переключается, если напряжение на конденсаторе  $C_1$  меняет знак, что соответствует фазовому сдвигу между на-

пряжениями  $U_1$  и  $U_2$ , равному  $90^\circ$ . То есть в данной схеме линия нулевой чувствительности проходит через оси  $90^\circ$  и  $-90^\circ$  ( $270^\circ$ ) на угловой характеристике. Для получения требуемого значения угла максимальной чувствительности на входе схемы включают дополнительную фазосдвигающую цепь.

Сигнал с выхода триггера Шмитта поступает на электронный ключ, собранный на транзисторе  $VT_1$  и элементах  $R_{12}$ ,  $VD_7$ , и управляющий промежуточным реле  $KL$ . Замыкание контактов реле  $KL$  соответствует зоне действия реле направления мощности, а размыкание – зоне недействия (см. рис. 2.5).

## 3 Принципы построения микропроцессорных устройств для нужд энергетики

### 3.1 Общие принципы

Микропроцессорными (цифровыми) называют электронные устройства, выполненные на основе микроконтроллеров.

Обобщённая функциональная схема микропроцессорного устройства автоматики приведена на рис. 3.1.

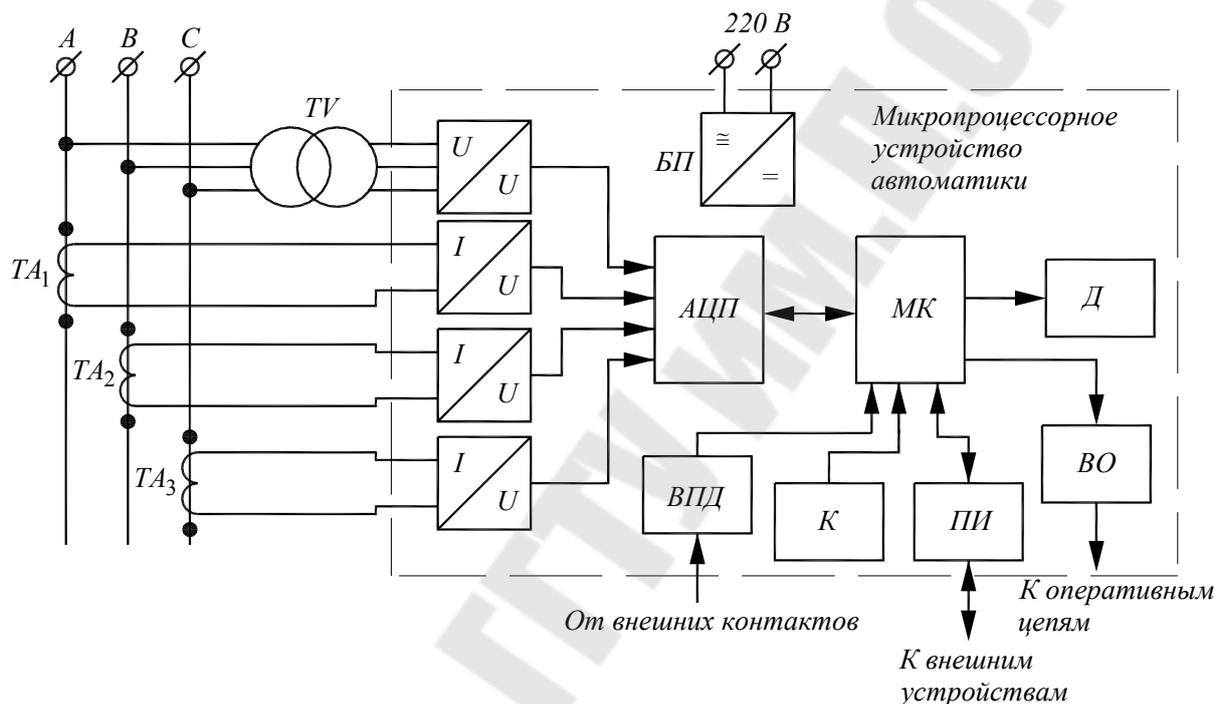


Рис. 3.1 Обобщённая функциональная схема микропроцессорного устройства автоматики

Измерительные цепи микропроцессорных устройств аналогичны соответствующим цепям микроэлектронных устройств (см. рис. 2.1). После вторичных измерительных преобразователей мгновенные значения измеряемых токов и напряжений поступают на аналоговые входы многоканального аналого-цифрового преобразователя АЦП, который формирует двоичные коды (последовательность логических нулей и единиц), пропорциональные этим мгновенным значениям. Полученные двоичные коды передаются в микроконтроллер МК, программное обеспечение которого выполняет требуемые действия с кодами: записывает необходимые данные в память, производит математические расчёты, выводит результаты на дисплей Д, передаёт данные на внешнее удалённое устройство. Задавать требуемые пара-

метры в микропроцессорных устройствах можно с помощью клавиатуры  $K$ .

Как и в случае с микроэлектронными устройствами, микропроцессорные устройства осуществляют воздействие на оперативные цепи РЗА посредством выходных релейных органов  $ВО$ , и получают управляющие дискретные сигналы с помощью входных преобразователей ВПД. Однако коммуникативная составляющая микропроцессорных устройств значительно шире. Они оснащены интерфейсами связи, сигналы которых формируются соответствующими преобразователями  $ПИ$ , и позволяют осуществлять обмен данными вплоть до создания локальных сетей.

Микропроцессорные устройства характеризуются широкими функциональными возможностями. Они способны совмещать различные функции. Так, например, блок релейной защиты помимо своих непосредственных операций может выполнять функции счётчика электроэнергии и цифрового осциллографа.

Недостатками микропроцессорных устройств является их повышенная чувствительность к помехам и высокая стоимость по сравнению с микроэлектронными устройствами.

### **3.2 Микроконтроллеры и их функциональные возможности**

**Микроконтроллер** – это цифровая программируемая интегральная микросхема, в состав которой входят все необходимые элементы микропроцессорной системы, а также ряд дополнительных элементов.

Все микропроцессорные устройства, применяющиеся для автоматизации электрических сетей, за исключением компьютеров, построены на основе микроконтроллеров. Эти устройства, как правило, не требуют сложных математических расчётов и формирования сложных изображений на дисплеях, и, вместе с тем, должны быть компактными и надёжными. Таким требованиям удовлетворяют микроконтроллеры.

В компьютерах, где требуется производить сложные вычисления и формировать сложные цветные изображения, применяются непосредственно микропроцессоры.

Основные фирмы-производители микроконтроллеров: Intel, Microchip, Atmel.

На рис. 3.2 приведена блок-схема внутренней структуры микроконтроллера фирмы Atmel AT90S8535. Это восьмиразрядный микроконтроллер с тактовой частотой до 8 МГц, построенный по RISC ар-

хитектуре, то есть имеющий сокращённый набор команд, выполняющихся с максимальным быстродействием за 1...5 тактов.

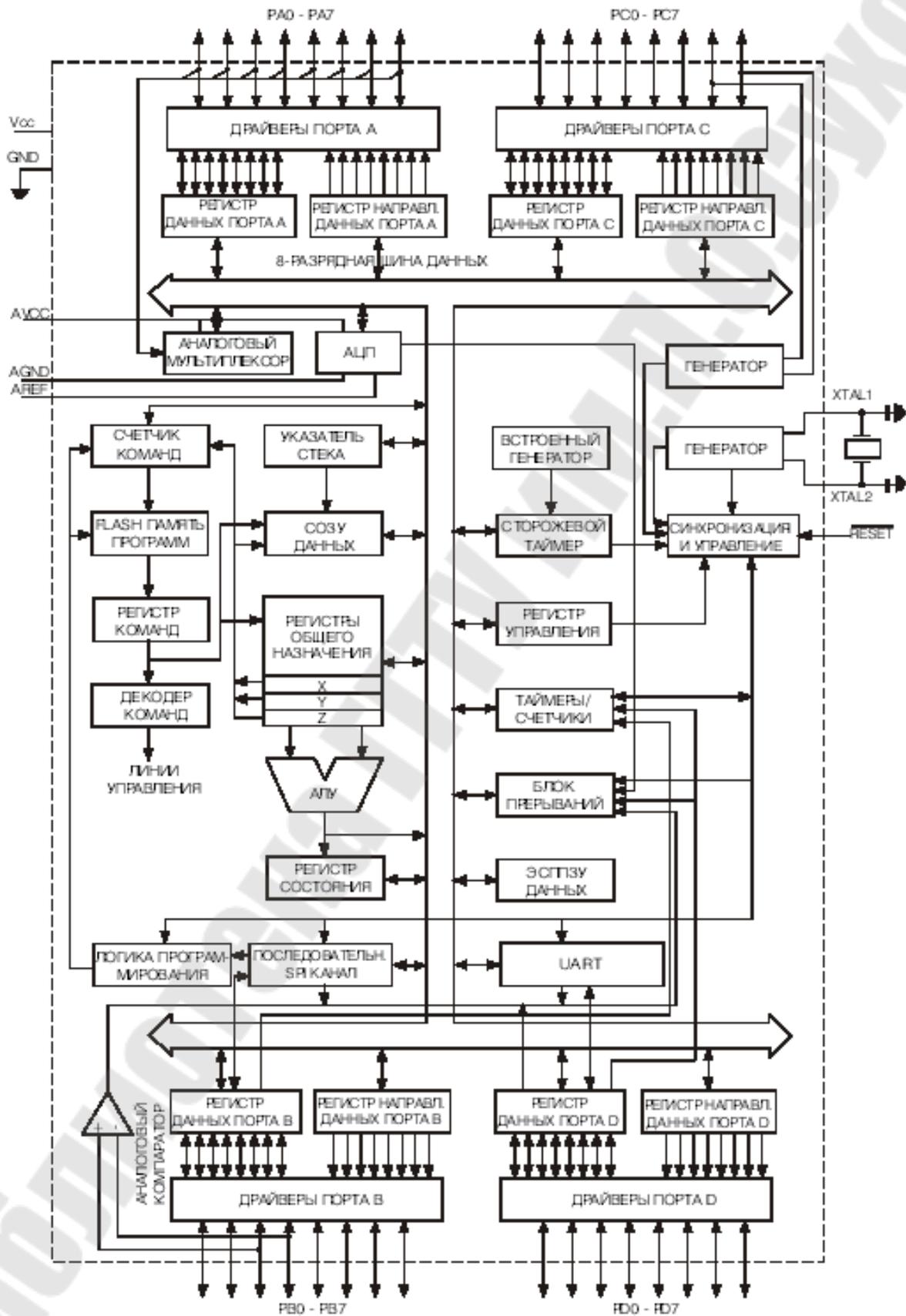


Рис. 3.2 Блок-схема микроконтроллера AT90S8535

Микроконтроллер AT90S8535 содержит все необходимые элементы микропроцессорной системы: арифметическо-логическое устройство АЛУ, регистры общего назначения, встроенное FLASH ПЗУ программ объемом 8К байт, ПЗУ данных объемом 256 байт, ОЗУ объемом 256 байт, четыре порта ввода-вывода. Кроме этого, в состав микроконтроллера входят вспомогательные элементы: таймеры-счётчики, синхронный и асинхронный последовательные интерфейсы связи, многоканальный АЦП, аналоговый компаратор. Эти элементы способны функционировать независимо друг от друга, что даёт преимущества при работе с различными внешними устройствами.

Условное графическое обозначение микроконтроллера AT90S8535, используемое на принципиальных схемах, приведено на рис. 3.3.

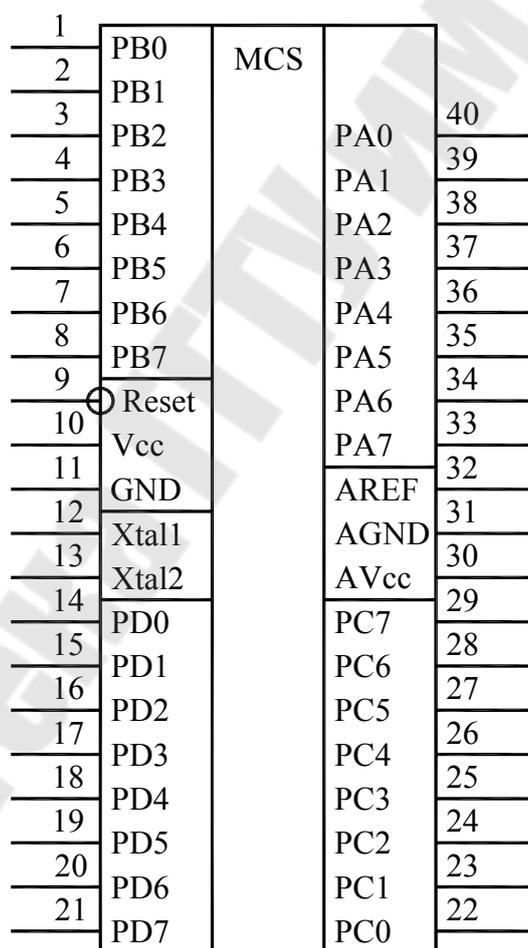


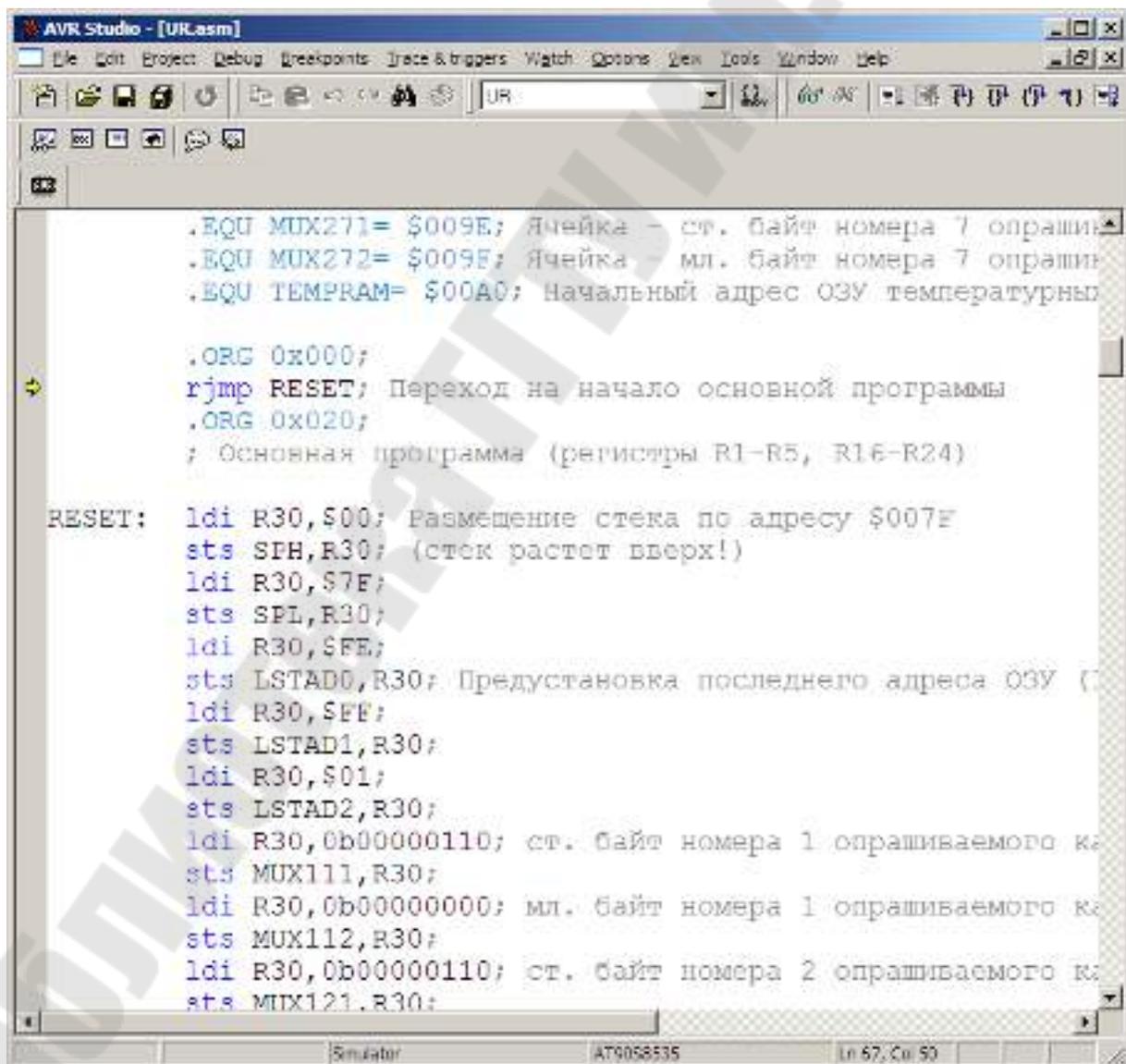
Рис. 3.3 Условное графическое обозначение микроконтроллера AT90S8535

На рис. 3.3 PA, PB, PC и PD – это четыре восьмиразрядных порта ввода-вывода. Линии этих портов могут выполнять несколько раз-

личных функций. Например, линии порта PA могут быть использованы как входы многоканального АЦП.

Reset – это вход сброса; Xtal – входы для подключения кварцевого резонатора (стабилизатора тактовой частоты); Vcc, GND – линии для подключения питания (+5 В); AREF – вход для подключения опорного напряжения АЦП.

Программирование микроконтроллеров осуществляется на языках **Ассемблер** или **«С»** с помощью специальных программ-симуляторов через стандартные порты персонального компьютера и устройства-программаторы. Так для микроконтроллера AT90S8535 используется пакет AVR Studio, внешний вид главного окна которого с фрагментом программы на языке Ассемблер для цифрового регистратора приведен на рис. 3.4.



```
.EQU MUX271= $009E; Ячейка - ст. байт номера 7 опрашиваемого ка
.EQU MUX272= $009F; Ячейка - мл. байт номера 7 опрашиваемого ка
.EQU TEMPRAM= $00A0; Начальный адрес ОЗУ температурного датчика

.ORG 0x000;
rjmp RESET; Переход на начало основной программы
.ORG 0x020;
; Основная программа (регистры R1-R5, R16-R24)

RESET: ldi R30,$00; Размещение стека по адресу $007F
      sts SPH,R30; (стек растет вверх!)
      ldi R30,$7F;
      sts SPL,R30;
      ldi R30,$FE;
      sts LSTAD0,R30; Предустановка последнего адреса ОЗУ (
      ldi R30,$FF;
      sts LSTAD1,R30;
      ldi R30,$01;
      sts LSTAD2,R30;
      ldi R30,0b00000110; ст. байт номера 1 опрашиваемого ка
      sts MUX111,R30;
      ldi R30,0b00000000; мл. байт номера 1 опрашиваемого ка
      sts MUX112,R30;
      ldi R30,0b00000110; ст. байт номера 2 опрашиваемого ка
      sts MUX121,R30;
```

Рис. 3.4 Внешний вид программы AVR Studio

Микроконтроллер AT90S8535 может быть использован в устройствах РЗА, счётчиках электроэнергии, системах автоматического управления, и других приборах для нужд энергетики.

## 4 Интерфейсы связи

### 4.1 Общая характеристика интерфейсов связи

**Интерфейс связи** – это совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих обмен данными между микропроцессорными устройствами.

По характеру линий связи интерфейсы бывают **проводные** и **беспроводные**. Проводные используют различные виды сигнальных кабелей или линии электропередачи, а беспроводные – инфракрасное излучение или радиоволны.

По способу передачи бывают **параллельные** и **последовательные** интерфейсы. В параллельных интерфейсах каждый бит двоичного кода передаётся по отдельной линии, а в последовательных – по одной или нескольким линиям. Последовательные интерфейсы, в свою очередь, бывают **синхронные** и **асинхронные**. В синхронных интерфейсах используются дополнительные линии, по которым передаются импульсы синхронизации, частота которых равна частоте передаваемых по отдельной линии бит данных. В асинхронных интерфейсах импульсы синхронизации передаются по той же линии, что и биты данных.

По направлению передачи бывают **симплексные**, **полудуплексные** и **дуплексные** интерфейсы. В симплексных интерфейсах обмен данными осуществляется только в одну сторону от передатчика к приёмнику. В полудуплексных интерфейсах обмен данными может происходить в обе стороны, но не одновременно и по общей линии связи. В дуплексных интерфейсах обмен данными идёт одновременно в обе стороны по отдельным линиям.

В **проводных интерфейсах** могут использоваться электрические коаксиальные кабели, волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) или линии электропередачи.

Конструкция одножильного электрического коаксиального кабеля показана на рис. 4.1.

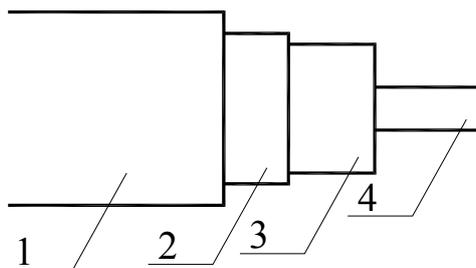


Рис. 4.1 Конструкция электрического сигнального кабеля

Такой сигнальный кабель по конструкции подобен силовому кабелю и содержит защитную оболочку из светостабилизированного полиэтилена 1, электромагнитный экран из медной оплётки 2, основную изоляцию из структурированного полиэтилена 3 и медную жилу 4.

Электромагнитный экран препятствует прониканию помех в кабель. Основным параметром таких кабелей является **волновое сопротивление**, характеризующее кабель как длинную линию. Значение этого сопротивления составляет, как правило, 50 или 75 Ом.

Коаксиальные кабели позволяют передавать данные со скоростью до 1М бит/с. Дальность передачи – до 200 м.

Если сигнальный кабель содержит две свитые изолированные жилы, то такой кабель называют **витая пара**. Пример конструкции витой пары показан на рис. 4.2.

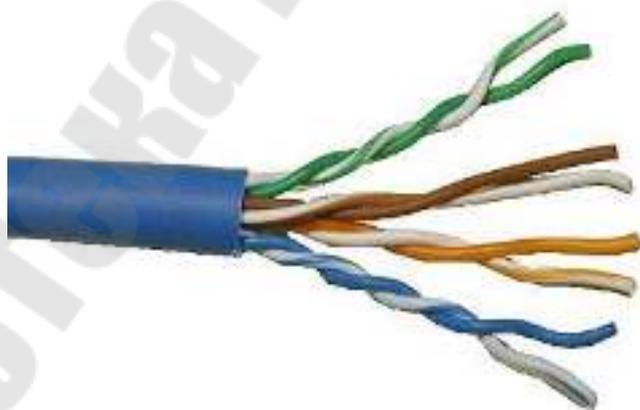


Рис. 4.2 Витая пара

Свитые провода позволяют дополнительно снизить влияние помех за счёт взаимной компенсации напряжённости электрического поля в противоположных полувитках. На рис. 4.2 показана конструкция кабеля с четырьмя витыми парами без экранов. Бывают конст-

рукции кабелей, когда витые пары помещают в общий экран, или каждую витую пару в отдельный экран. Витые пары позволяют передавать данные со скоростью до 1000 Мбит/с. Дальность передачи – до 2000 м.

Общим недостатком электропроводящих сигнальных кабелей является их чувствительность к внешним помехам.

Более совершенным средством для передачи данных посредством проводных интерфейсов являются **волоконно-оптические линии связи** (ВОЛС). Принцип передачи сигнала через оптическое волокно показан на рис. 4.3.

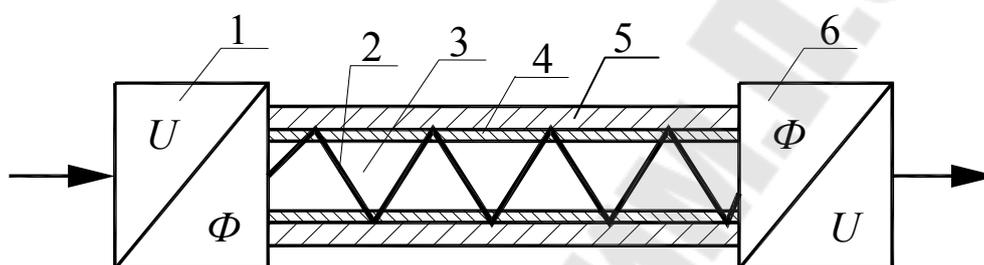


Рис. 4.3 Принцип передачи сигнала через оптическое волокно

Входное напряжение подаётся на полупроводниковый формирователь 1 лазерного луча 2 с длиной волны около 1500 нм (инфракрасный диапазон). Этот луч попадает в проводящий канал 3 оптического волокна и затем многократно отражается от дополнительного оптического слоя 4. Так проводящий канал 3 имеет более высокий показатель преломления, чем слой 4, то луч отражается практически полностью без заметных потерь. Затухание начинает сказываться только на расстояниях более 1 км.

Диаметр проводящего канала 3 составляет около 5 мкм. Оптическое волокно дополнительно покрывают защитным слоем 5.

В конце линии луч попадает на фотоприёмник 6, преобразующий оптическое излучение в напряжение. Такое оптическое волокно называется **одномодовым**. Скорость передачи данных может достигать 2,5 Гбит/с. Дальность передачи – до 40 км.

Существуют оптические волокна, по которым можно передавать одновременно несколько лучей (мод) с некоторым запаздыванием один относительно другого. Такое оптическое волокно называется **многомодовым**.

Конструкция волоконно-оптического кабеля показана на рис. 4.4.

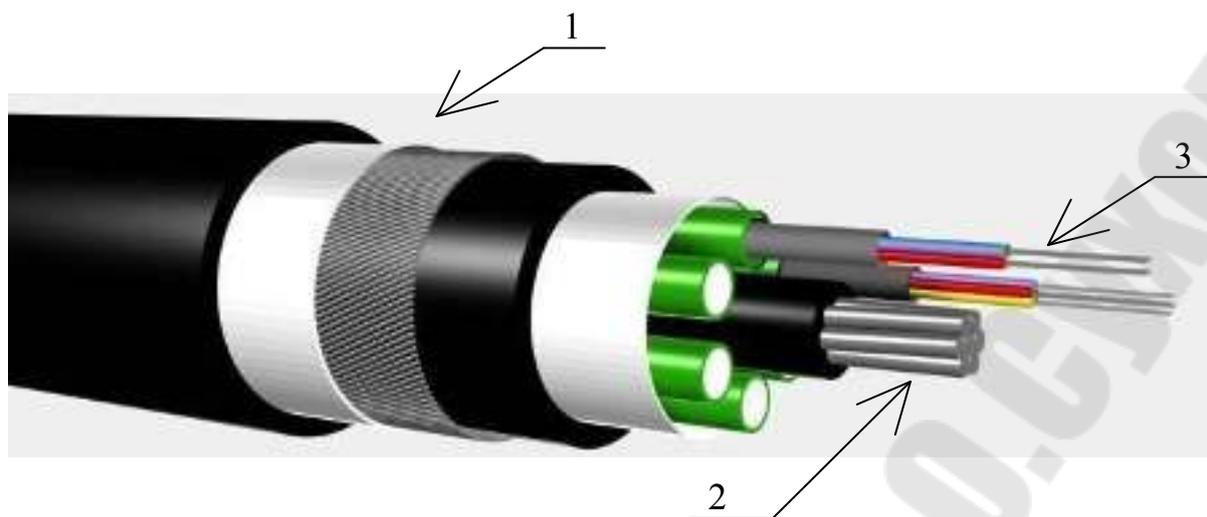


Рис. 4.4 Конструкция волоконно-оптического кабеля

Кабель состоит из различных защитных оболочек 1, центральной стальной жилы 2 и оптических волокон 3. Стальная жила предназначена для несения механической нагрузки, защитные оболочки изолируют волокна от окружающей среды. Количество оптических волокон в кабеле может достигать нескольких десятков.

На сегодняшний день ВОЛС – наиболее скоростные и помехоустойчивые из всех видов линий связи.

В **беспроводных интерфейсах, использующих инфракрасное излучение**, применяется светодиод в передатчике и фотодиод в приёмнике. Достоинства такого вида связи: простота реализации, недостаток – влияние препятствий на передачу. Скорость передачи данных может достигать 16М бит/с. Дальность передачи – до 20 м.

**Беспроводные интерфейсы, использующие радиосвязь**, могут функционировать на основе радиорелейной, сотовой или спутниковой связи.

Обязательными аппаратными средствами при радиосвязи являются передающие и приёмные антенны, а также **модемы** – устройства, осуществляющие модуляцию и демодуляцию сигналов. Передаваемый сигнал модулирует, то есть изменяет параметры высокочастотного сигнала, который называют несущим. Чаще всего используют частотную или фазовую модуляции. Принцип **частотной модуляции** при цифровой связи (путём передачи логических нулей и единиц) можно записать в виде формулы:

$$U(t) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (f_H \pm \Delta f) \cdot t), \quad (4.1)$$

где:  $f_n$  - частота несущего сигнала;  $\Delta f$  - изменение частоты при передаче логических нулей и единиц, при этом  $\Delta f \ll f_n$ .

В зависимости от значения  $f_n$  различают различные диапазоны радиосвязи. Эти диапазоны приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

Диапазоны радиосвязи

$f_n$	Диапазон
150...450 кГц	Длинные волны (ДВ)
500...1600 кГц	Средние волны (СВ)
3...30 МГц	Короткие волны (КВ)
30...300 МГц	Ультракороткие волны (УКВ)
300 МГц...3 ГГц	Высокие частоты (ВЧ)
3 ГГц... 30 ГГц	Сверхвысокие частоты (СВЧ)

Диапазон УКВ используется в **радиорелейной связи**. Сигналы этого и более высоких диапазонов надёжно распространяются в зоне прямой видимости. Поэтому из-за естественного уклона земной поверхности и изменяющегося рельефа местности для увеличения дальности передачи используют **ретрансляторы** – приёмо-передающие антенны, установленные на мачтах требуемой высоты (рис. 4.5). Радиорелейная связь используется для организации элементов телемеханики в электрических сетях. Скорость передачи данных может достигать 1М бит/с. Дальность передачи – до 1000 км.

Диапазон ВЧ используется в **сотовой связи**, являющейся усовершенствованной радиорелейной связью. При этом виде связи устанавливается разветвлённая сеть из ретрансляторов (рис. 4.6), образующих на ровном рельефе правильные шестиугольники, напоминающие пчелиные соты.

В сотовой связи используются два основных стандарта GSM (Global System for Mobile communications - глобальная система мобильной связи) и CDMA (Code Division Multiple Access - множественный доступ с кодовым разделением каналов). В стандарте GSM данные от разных абонентов передаются пакетами с разделением этих пакетов во времени. В стандарте CDMA пакеты данных от разных абонентов передаются одновременно, но кодированы они по-разному.

Стандарт GSM является более простым в реализации, а стандарт CDMA – более защищённым. Скорость передачи данных в GSM и в CDMA может достигать до 8М бит/с.



Рис. 4.5 Ретранслятор для радиорелейной связи

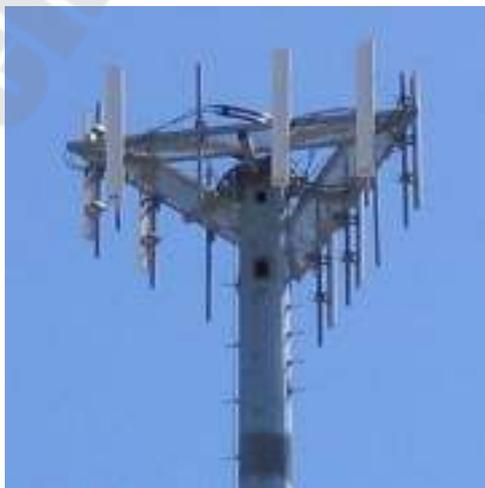


Рис. 4.6 Ретранслятор для сотовой связи

## 4.2 Интерфейс связи ИРПС

В системах контроля и учёта электроэнергии крайне важной является задача передачи измеренных величин на некоторое расстояние. Один из способов – использование интерфейса связи типа «**токовая петля**», или ИРПС – **интерфейс радиальный последовательный**. Устройства, реализующие ИРПС, представляют собой измерительные преобразователи или измерительные приборы с унифицированным токовым выходом, то есть выходом таких устройств является источник постоянного тока с номинальным значением 5мА или 20 мА, и этот выход называют телеметрическим. Схема соединения устройств посредством ИРПС приведена на рис. 4.7.

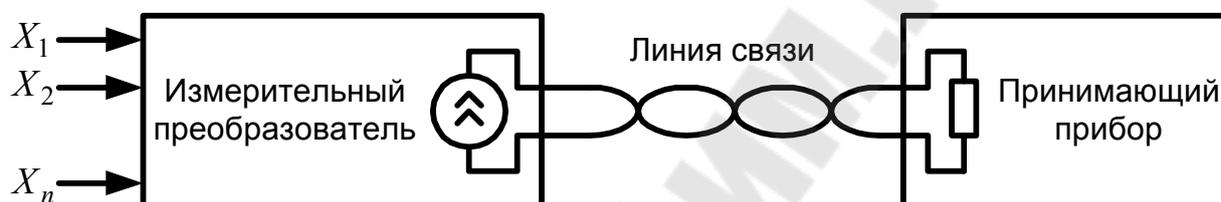


Рис. 4.7 Функциональная схема интерфейса связи ИРПС

Линия связи представляет собой витую пару, что сделано для обеспечения помехозащищённости. На стороне принимающего прибора подключается нагрузочное сопротивление требуемого номинального значения.

Интерфейс ИРПС может быть аналоговым и цифровым. Пример применения аналогового интерфейса приведен на рис. 4.7. Ток, передаваемый по линии, пропорционален измеряемой величине. Аналоговый ИРПС применяется в **измерительных преобразователях с телеметрическим выходом**, использующихся в системах телемеханики.

В случае цифрового ИРПС, по линии передаются импульсы, частота следования которых пропорциональна измеряемой величине. В основном такой метод используют в счётчиках электроэнергии для их объединения в систему АСКУЭ.

## 4.3 Интерфейс RS232

**RS232** – это дуплексный асинхронный последовательный интерфейс связи, предназначенный для обмена данными микропроцессорных устройств с компьютером через СОМ – порт. Максимальная

скорость обмена данными составляет 125000 бит/с, дальность передачи – до 200 м.

Наиболее распространённая схема соединений RS232 приведена на рис. 4.8.

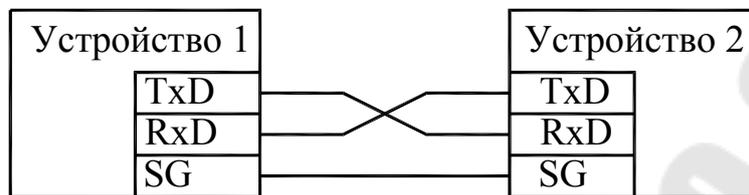


Рис. 4.8 Схема соединений RS232

На рис. 4.8 TxD – это выход данных; RxD – вход данных; SG – общий провод.

Сигналы RS232 имеют следующие уровни: +12 В – логический ноль; -12 В – логическая единица. Передаваемые логические уровни включают биты данных и биты синхронизации. На рис. 4.9 приведены диаграммы работы RS232.

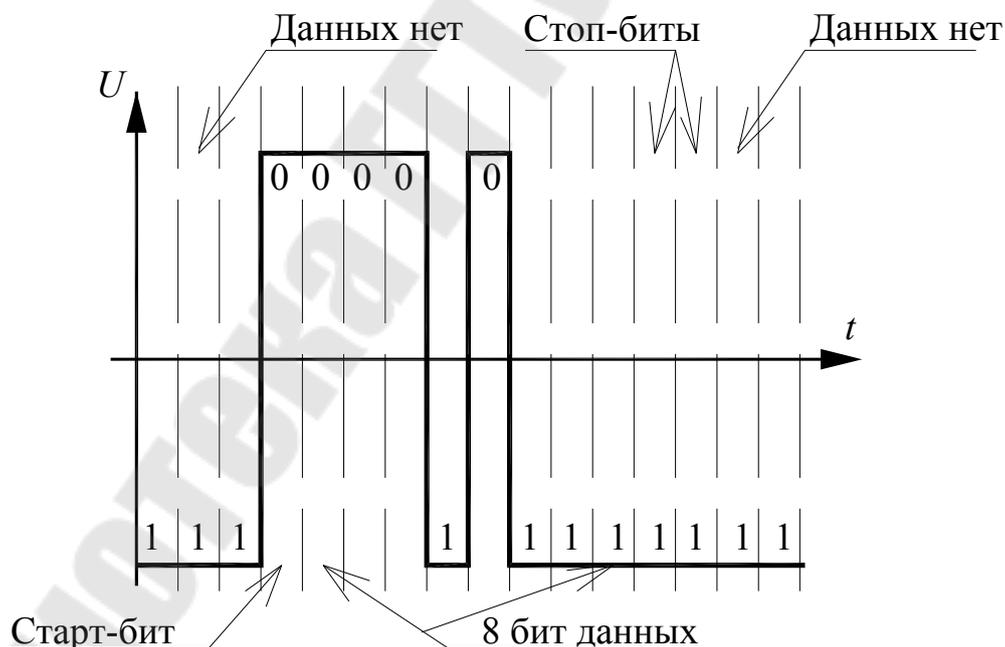


Рис. 4.9 Диаграммы работы интерфейса RS232

Обмен данными оба устройства должны вести с одинаковой частотой. Начало приёма или передачи данных соответствует момен-

ту появления старт-бита. Затем передаются 8 бит данных и стоп-биты. Таким образом осуществляется синхронизация обмена данными.

RS232 – это профессиональный помехоустойчивый интерфейс связи, применяемый в энергетике для стационарного или временного соединения различных устройств с компьютером.

#### 4.4 Интерфейс RS485

**RS485** – это асинхронный последовательный интерфейс связи, предназначенный для обмена данными между микропроцессорными устройствами и для объединения этих устройств в магистральную сеть посредством кабеля «витая пара». Максимальная скорость обмена данными составляет 10М бит/с, дальность передачи – до 1200 м.

Для симплексного или полудуплексного обмена данными по интерфейсу RS485 требуется только одна витая пара. Схема соединений RS485 приведена на рис. 4.10.

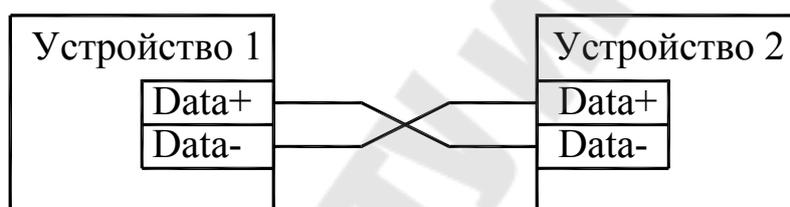


Рис. 4.10 Схема соединений RS485

Интерфейс RS485 имеет две линии Data+ и Data-. По ним передаются одни и те же данные, но в инверсной форме один по отношению к другому. На рис. 4.11 приведены диаграммы работы RS485.

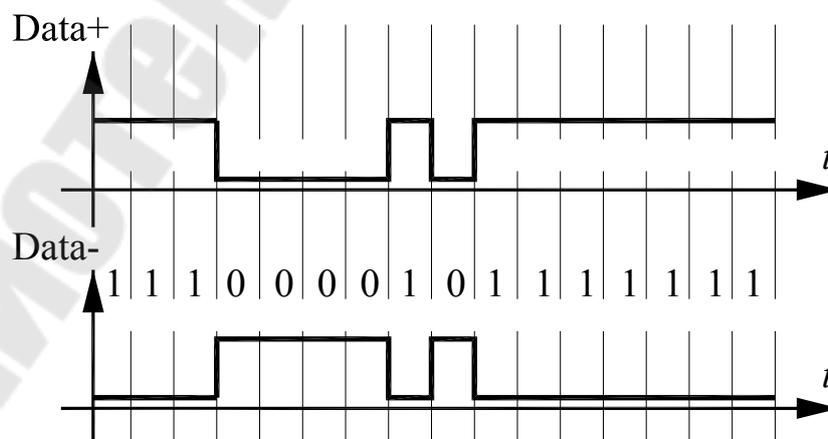


Рис. 4.11 Диаграммы работы RS485

Приёмное устройство определяет разность потенциалов между линиями Data+ и Data-. Если эта разность более 0,2 В, то принимается логическая единица, если же разность меньше -0,2 В, то принимается логический ноль. Диапазон между +0,2 В и -0,2 В считается зоной недостоверности и данные признаются ошибочными.

Интерфейс RS485 позволяет объединять устройства в **магистральную сеть**, как показано на рис. 4.12.

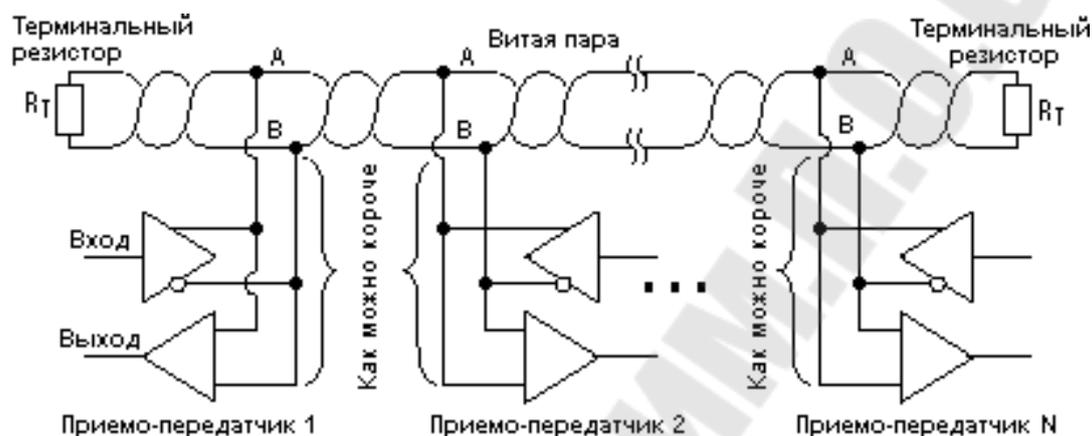


Рис. 4.12 Объединение приборов в магистральную сеть

Общая магистраль реализуется посредством витой пары, к концам которой для дополнительной защиты от помех подключают так называемые **терминальные резисторы** сопротивлением 120 Ом. Все устройства работают по принципу «**все ведомые – один ведущий**». В каждый момент времени на магистраль в режиме передачи работает только одно устройство, а остальные устройства принимают данные. Затем передающее устройство переходит в режим приёма, а одно из принимающих становится передатчиком. То есть реализуется полудуплексный обмен данными в сети.

## 4.5 Интерфейс Ethernet

**Ethernet** (читается «эзернет») – это асинхронный последовательный интерфейс связи, предназначенный для создания радиально-магистральных локальных сетей из микропроцессорных устройств.

Ethernet представляет собой усовершенствованный интерфейс RS-485 и использует передачу данных по витым парам или по оптоволокну. Основные разновидности и характеристики интерфейса Ethernet приведены в табл. 4.2.

Топология сетей Ethernet имеет древовидную структуру и состоит из устройств, образующих сеть, и концентраторов.

**Концентратор** – это микропроцессорное устройство, предназначенное для сбора и передачи данных в локальной сети.

Концентраторы бывают следующих видов: маршрутизаторы, коммутаторы и повторители.

**Маршрутизатор** (*router*) – это сложный концентратор, каждый порт которого может представлять отдельную сеть.

**Коммутатор** (*switch*) – это концентратор, выполняющий функции многопозиционного переключателя.

**Повторитель** (*hub*) – предназначен для построения магистральной части сети, транслируя сигналы, принятые по одному порту, на все остальные порты.

На рис. 4.13 приведена схема сети типа «звезда».

Схема соединений для интерфейса 100BASE-T (две витые пары) по «прямому» кабелю при соединении устройства с концентратором приведена на рис. 4.14, где обозначено: Tx – выходы передатчика; Rx – входы приёмника.

При соединении устройств или концентраторов между собой используется «перекрёстный» кабель (*crossover*). Такая схема приведена на рис. 4.15.

Таблица 4.2

Разновидности и характеристики интерфейса Ethernet

Тип Ethernet	Скорость передачи	Линия связи	Длина одного сегмента
10BASE-T	10М бит/с	2 витые пары	до 100 м
10BASE-F	10М бит/с	одномодовое оптоволокно	до 2 км
100BASE-T (Fast Ethernet)	100М бит/с	2	100 м
100BASE-FX (Fast Ethernet)	100М бит/с	одномодовое оптоволокно	до 10 км
1000BASE-T (Gigabit Ethernet)	1Г бит/с	2	100 м
1000BASE-LX (Gigabit Ethernet)	1Г бит/с	одномодовое оптоволокно	до 5 км

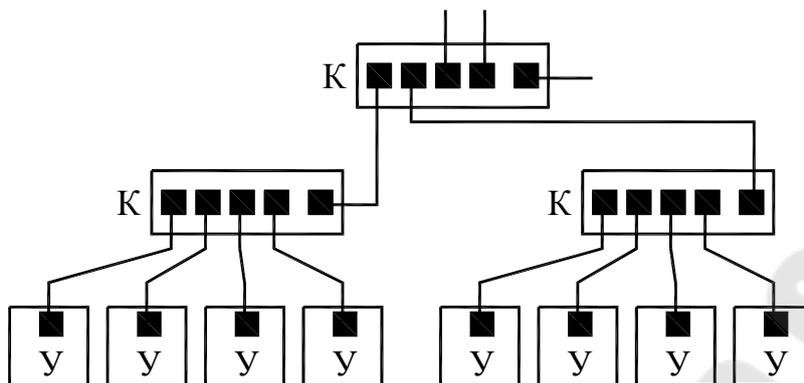


Рис. 4.13 Топология сети типа «звезда»: У – микропроцессорные устройства; К - концентраторы

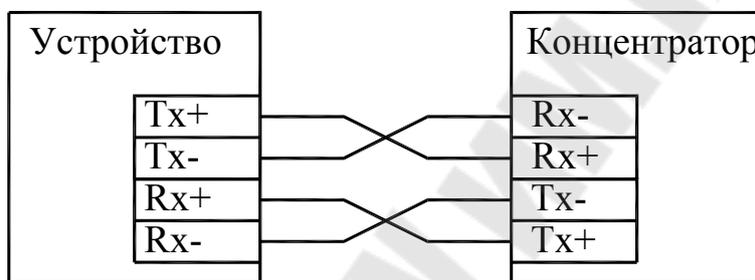


Рис. 4.14 Схема соединений по «прямому» кабелю для интерфейса 100BASE-T

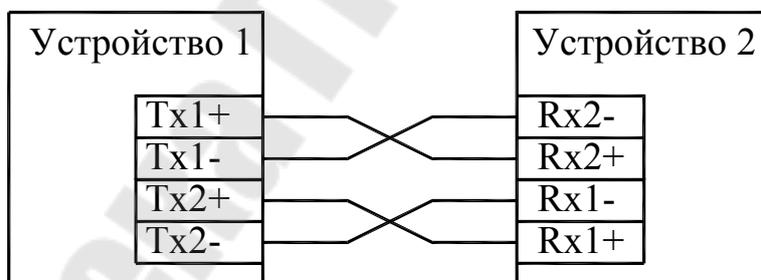


Рис. 4.15 Схема соединений по «перекрёстному» кабелю для интерфейса 100BASE-T

В процессе обмена данными каждое устройство имеет свой уникальный двоичный код - **MAC** (*Media Access Control address*) адрес. Обмен данными происходит пакетами (frame) двоичных кодов. Упрощённая форма кадра Ethernet приведена на рис. 4.16.

MAC-адрес устройства-получателя (6 байт)	MAC-адрес устройства-отправителя (6 байт)	Тип передачи (2 байта)	Данные (46 ... 1500 байт)	Контрольная сумма (4 байта)
--	---	------------------------	---------------------------	-----------------------------

Рис. 4.16 Формат кадра Ethernet

Вначале передаются 14 байт MAC – заголовка, включающие адреса устройства-получателя и устройства-отправителя, а также 2 байта кода, определяющего тип передачи (направление передачи, способ кодирования, и т.д.). Затем передаются байты данных. В случае использования протокола **TCP/IP** (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), предназначенного для коммутации с сетью *Internet*, в составе байт данных передаются двоичные коды маски подсети и IP – адрес устройства в подсети. После передачи байт данных, передаются 4 байта контрольной суммы, вычисляемой по определённому алгоритму на основе байт переданных данных. Устройство, принявшее данные, также рассчитывает контрольную сумму и сравнивает её с принятым значением этой суммы. Если значения не совпали, то имеется потеря отдельных битов при передаче и выдаётся ошибка передачи. Так осуществляется защита от влияния помех.

Сети Ethernet находят всё большее распространение при автоматизации процессов, например, в пределах одной подстанции или предприятия, где в локальную сеть объединяются счётчики электроэнергии, измерительные устройства, блоки релейной защиты, компьютеры и т.д. Главное достоинство Ethernet – возможность передачи больших объёмов информации за счёт высокой скорости.

## 5 Измерительные приборы для нужд энергетики

### 5.1 Мультиметры

**Мультиметр** – это измерительный прибор, сочетающий в себе две и более функции. Как правило, это функции вольтметра, амперметра и омметра. Современные микропроцессорные мультиметры обеспечивают десятки различных видов измерений.

На рис. 5.1 показан внешний вид мультиметра VA38 McBrain.



Рис. 5.1 Мультиметр VA38 McBrain

Основные функции этого мультиметра:

- истинное действующее значение тока и напряжения (True RMS);
- режимы DC/AC/DC+AC (DC - Direct Current – постоянный ток; AC - Alternating-Current – переменный ток);
- автоматический выбор диапазона измерения;
- подсветка экрана;
- интерфейс связи RS-232;
- измерение постоянного напряжения в диапазоне от 50 мВ до 1000 В,  $\pm 0,5\%$ ;

- измерение действующего значения переменного напряжения в диапазоне от 50 мВ до 1000 В,  $\pm 0,03\%$ ;
- измерение постоянного тока в диапазоне от 500 мА до 10 А,  $\pm 0,75\%$ ;
- измерение активного сопротивления в диапазоне от 0,1 Ом до 50 МОм,  $\pm 0,1\%$ ;
- измерение ёмкости в диапазоне от 0,01 нФ до 5000 мкФ,  $\pm 1\%$ ;
- измерение частоты в диапазоне от 5 Гц до 200 кГц,  $\pm 0,1\%$ ;
- измерение температуры в диапазоне от 20 °С до 1000 °С,  $\pm 1\%$ .

Программное обеспечение микроконтроллера мультиметра осуществляет расчёт **истинного действующего значения напряжения** (RMS – Root Mean Squared – среднеквадратическое значение) по формуле:

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T U^2(t) \cdot dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} U_i^2 \cdot \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} U_i^2}, \quad (5.1)$$

где:  $T$  - период напряжения электрической сети;  $i$  - номер расчётного интервала;  $n$  - количество точек (отсчётов) напряжения в расчётном интервале времени  $T$ ;  $\Delta t = \frac{T}{n}$  - период дискретизации.

Ток  $I_{\text{RMS}}$  рассчитывается аналогично:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} I_i^2}. \quad (5.2)$$

Значения  $U_{\text{RMS}}$  и  $I_{\text{RMS}}$  называются истинными, так как учитывают все высшие гармонические составляющие.

Более совершенным прибором является **энергетический мультиметр** МЭ-01, внешний вид которого показан на рис. 5.2.



Рис. 5.2 Мультиметр энергетический МЭ-01

Мультиметр МЭ-01 предназначен для измерения и отображения следующих энергетических параметров трёхфазной электрической сети:

- текущие действующие значения (RMS) токов и напряжений по трём фазам;
- текущие значения активной, реактивной и полной мощности, а также значения этих параметров по первой гармонике сетевого напряжения;
- текущие значения коэффициента мощности  $K$  и  $\cos\varphi$  по каждой фазе;
- коэффициенты искажения синусоидальности тока и напряжения по каждой фазе;
- частоту напряжения электрической сети по первой гармонике.

Мультиметр сохраняет данные для построения суточных графиков нагрузки. С заданным интервалом сохранения МЭ-01 создает архив в одной временной сетке из следующих параметров:  $P$ ,  $P_1$ ,  $Q_{L1}$ ,  $Q_{C1}$ . Также осуществляется запись состояния двух цифровых

входов, значения токовых сигналов на двух аналоговых входах. Измеренные параметры сохраняются в энергонезависимой памяти.

Текущие данные и архив могут быть переданы через интерфейс RS485 (RS232) на удаленный терминал. Скорость передачи данных равна 1200 – 19200 бит/с, при передаче используется логический протокол MODBUS. МЭ-01 обеспечивает ввод уставок из компьютера верхнего уровня и сохранение их в памяти.

## 5.2 Измерители сопротивлений

В энергетике используют измерители малых, средних и больших электрических сопротивлений. В современных микропроцессорных приборах, как правило, совмещают несколько функций.

**Микромилликилоомметр** – это прибор, позволяющий измерять значения сопротивлений в диапазонах мкОм, мОм, Ом и кОм.

На рис. 5.3 показан внешний вид прибора типа МИКО.



Рис. 5.3 Прибор МИКО-2.2

Приборы типа МИКО сочетают в себе функции фактически четырёх приборов:

- **микроомметр** – для измерения переходных сопротивлений контактов, болтовых и сварных соединений, проводов и т.п.;
- **миллиомметр** – для измерения активных сопротивлений в цепях с большой индуктивностью (катушки электромагнитов, соленоидов, трансформаторов, двигателей и др.);
- **килоомметр** – для измерения сопротивлений добавочных и шунтирующих резисторов и др.;

- **термометр цифровой** – для измерения температуры обмоток, масла, воздуха.

При присоединении к объекту соответствующим кабелем из комплекта и нажатии кнопки, прибор автоматически выполняет все необходимые из вышеперечисленных операций и выводит результаты измерения на жидкокристаллический индикатор. Пределы измерения сопротивлений от 0,1 мкОм до 300 кОм.

При необходимости в повторных измерениях кнопка нажимается вновь через любой промежуток времени.

Прибор имеет разнообразные дополнительные сервисные функции. Пользователь может задавать требуемый ток измерения переходного сопротивления, либо, по умолчанию, измерять его при максимально возможном токе, вводить функцию прожига окисной пленки контактов, а для режима миллиомметра – функцию автоматического пересчета сопротивлений обмоток, соединенных в треугольник или звезду в сопротивления обмоток фаз, а также автоматического учета температуры обмоток. Измеренные значения могут быть занесены в энергонезависимую память (при записи автоматически регистрируются дата и время измерений), либо по интерфейсам RS-232/RS-485 переданы в компьютер. Через эти интерфейсы возможно дистанционное управление прибором от компьютера.

**Мегаомметр** – это прибор для измерения электрических сопротивлений в диапазоне от единиц до тысяч МОм.

Внешний вид цифрового мегаомметра М6-4 показан на рис. 5.4.



Рис. 5.4 Мегаомметр М6-4

Прибор М6-4 предназначен для измерения при напряжении 1,0 и 2,5 кВ сопротивления и **коэффициента абсорбции** изоляции электрооборудования, не находящегося под рабочим напряжением (выведенного из работы), при проведении монтажных, наладочных, эксплуатационных, ремонтных работ и наличии влияния со стороны действующего оборудования. Возможно проведение измерений в лабораториях и испытательных станциях предприятий, а также в полевых условиях. Пределы измерения сопротивлений от 10 кОм до 200 ГОм.

Основными узлами мегаомметра являются источник стабилизированного высокого постоянного напряжения, входной делитель, измерительная схема и блок питания.

На объект измерения подаётся вырабатываемое внутренним преобразователем мегаомметра стабилизированное высокое напряжение. Преобразователь выполнен по схеме с самовозбуждением. Стабилизация выходного напряжения осуществляется с помощью схемы широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Величина выходного напряжения устанавливается путем переключения режима работы стабилизирующего элемента.

Измеряемое сопротивление является верхним плечом делителя, нижнее плечо которого составляет внутренняя резисторная цепь, переключаемая при выборе диапазона измерения. Выходной сигнал этого делителя через фильтр 2-го порядка и усилитель поступает на первый вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Между источником высокого напряжения и экраном включен внутренний эталонный делитель, выходное напряжение которого через буферный усилитель поступает на второй вход АЦП. Делитель, подключенный через буфер к третьему входу АЦП, используется для измерения тока экрана.

Результаты измерений сохраняются в энергонезависимой памяти на 450 результатов измерений с возможностью их выдачи на персональный компьютер через последовательный интерфейс RS-232.

В память мегаомметра записываются: дата, время и номер измерения; значение испытательного напряжения; результаты измерений сопротивления с 15 до 60 секунд через 5 секунд; значение коэффициента абсорбции.

**Измеритель сопротивления заземления** – это прибор, предназначенный для измерения электрического сопротивления металлических конструкций, находящихся в земле.

На рис. 5.5 показан внешний вид микропроцессорного прибора ИС-10, а на рис. 5.6 – внешний вид его лицевой панели.



Рис. 5.5 Измеритель сопротивления заземления ИС-10



Рис. 5.6 Лицевая панель прибора ИС-10

Прибор ИС-10 предназначен для измерения сопротивления элементов заземления, металлосоединений, непрерывности защитных проводников в различных режимах: по двух-, трёх- или четырёхпроводному методу с автоматическим вычислением удельного сопротивления грунта. С применением клещей (при наличии в составе прибора), прибор измеряет переменный ток без разрыва измеряемой цепи, а также позволяет сделать качественную оценку состояния единичных

заземлителей в многоэлементном заземлении путём определения процентного распределения токов.

Кнопка «РЕЖИМ» используется для переключения прибора в режимы двух-, трёх- и четырёхпроводного метода измерения, измерения с автоматическим расчетом удельного сопротивления грунта и работы с клещами для измерения тока или определения процентного распределения токов. При этом на индикаторе отображается режим измерения и название гнезд, к которым необходимо подключать измерительные кабели. При входе в режим «МЕНЮ» она выполняет функцию движения по меню вверх.

Кнопка «МЕНЮ» предназначена для перехода прибора в режим «МЕНЮ» установки параметров. После входа в «МЕНЮ» кнопка выполняет функцию движения по меню вниз.

Диапазон измерения сопротивления контура заземления: от 1 мОм до 10 кОм.

Прибор формирует измерительный стабилизированный импульсный ток переменной полярности (меандр), частотой 128 Гц, амплитудное значение силы тока не более 260 мА, максимальное амплитудное значение выходного напряжения без нагрузки не более 42 В.

Падение напряжения в измеряемой цепи при стабилизированном токе пропорционально её сопротивлению. Это напряжение фильтруется и поступает на входной усилитель, в котором происходит его усиление и преобразование в сигнал постоянного напряжения. Далее этот сигнал поступает в АЦП и затем в микроконтроллер, где осуществляется расчёт требуемых величин и их отображение на дисплее.

Схема измерения сопротивления заземления по четырёхпроводному методу показана на рис. 5.7.

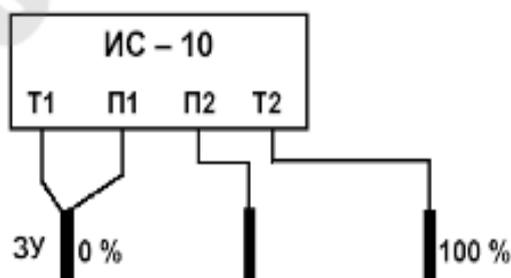


Рис. 5.7 Схема измерения сопротивления заземления по четырёхпроводному методу

Порядок определения сопротивления заземления по четырёхпроводному методу следующий.

1. Определить максимальную диагональ  $D$  заземляющего устройства (ЗУ).
2. Соединить ЗУ при помощи измерительных кабелей с гнездами Т1 и П1.
3. Потенциальный штырь П2 установить в грунт на расстоянии  $1,5 \cdot D$ , но не менее 20 м от измеряемого ЗУ.
4. Токовый штырь Т2 установить в грунт на расстоянии более  $3 \cdot D$ , но не менее 40 м от ЗУ. Подключить соединительный кабель к разъему Т2 прибора. Произвести серию измерений сопротивления заземления при последовательной установке потенциального штыря П2 в грунт на расстоянии 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 % от расстояния до токового штыря Т2 четырёхпроводным методом.
5. Построить график зависимости сопротивления от расстояния между ЗУ и потенциальным штырём П2. Если кривая монотонно возрастает и имеет в средней части достаточно горизонтальный участок (при расстояниях 40 и 60 % разница значений сопротивления меньше 10 %), то за истинное принимается значение сопротивления при расстоянии 50 %. В противном случае все расстояния до штырей необходимо увеличить в 1,5–2 раза или изменить направление установки штырей для уменьшения влияния надземных или подземных коммуникаций.

Схема для определения удельного сопротивления грунта с помощью прибора ИС-10 показана на рис. 5.8.

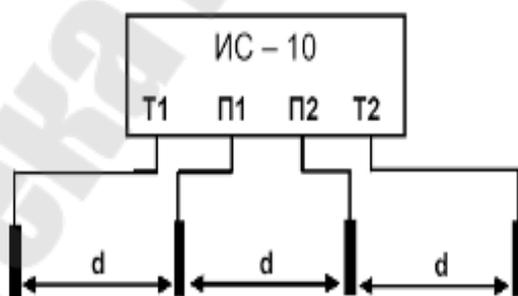


Рис. 5.8 Схема для определения удельного сопротивления грунта

Значение удельного сопротивления грунта рассчитывается по методике измерения Вернера. Эта методика предполагает равные расстояния между электродами  $d$ , которые следует принимать не менее чем в 5 раз больше глубины погружения штырей.

Измерительные штыри устанавливают в грунт по прямой линии, через равные расстояния  $d$  и соединяют с измерительными гнездами Т1, П1, П2 и Т2, выбрав режим четырёхпроводного метода из-

мерения. Затем необходимо нажать кнопку «Rx», считать показания значения сопротивления  $R_E$ .

Удельное сопротивление грунта рассчитывается по формуле:

$$\rho_{уд} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R_E. \quad (5.3)$$

**Измеритель сопротивления петли фаза-нуль** - это прибор для измерения сопротивления электрической сети непосредственно под напряжением.

Внешний вид микропроцессорного прибора ИФН-200 показан на рис. 5.9.



Рис. 5.9 Прибор ИФН-200

Прибор ИФН-200 выполняет следующие функции:

- измерение полного, активного и реактивного сопротивления цепи фаза-нуль, без отключения источника питания;
- измерение напряжения переменного тока;
- измерение сопротивления постоянному току (режим омметра);
- измерение сопротивления металlosвязи током до 250 мА для сопротивлений  $<20$  Ом;
- вычисление ожидаемого тока короткого замыкания, приведенного к напряжению сети 220 В;

- вычисление угла сдвига фаз между напряжением и током при коротком замыкании.

Прибор измеряет напряжение в цепи фаза-нуль, падение напряжения на известной нагрузке 10 Ом и сдвиг фаз между напряжением и током. На основании этих данных производится расчёт комплексного сопротивления петли фаза-нуль, по которому в свою очередь вычисляется прогнозируемый ток короткого замыкания и сдвиг фаз между током и напряжением в случае короткого замыкания.

В режиме измерения сопротивления прибор формирует постоянный ток, который протекает по измеряемому сопротивлению. По отношению падения напряжений на измеряемом сопротивлении и сопротивлении 10 Ом вычисляется значение искомого сопротивления. Сопротивления до 10 Ом измеряются током не менее 0,2 А.

### 5.3 Диагностические приборы

**Диагностические приборы** предназначены для определения технического состояния оборудования. К ним относят высоковольтные испытательные установки, приборы для определения мест повреждений оборудования, приборы вибродиагностики, и другие.

На рис. 5.10 показан внешний вид высоковольтного испытательного аппарата «СКАТ-70».



Рис. 5.10 Аппарат «СКАТ-70»

Аппарат «СКАТ-70» состоит из двух частей: высоковольтного блока и измерительного блока, соединённых между собой посредством сигнального кабеля.

Выполняемые функции:

- испытание изоляции силовых кабелей выпрямленным напряжением 70 кВ;
- испытание твёрдых диэлектриков синусоидальным напряжением 50 кВ
- прожиг изоляции силовых кабелей с целью обнаружения места их повреждения.

Пределы измерения тока составляют от 0 до 100 мА. Диапазон токов в режиме прожига: от 0 до 60 мА. Ток срабатывания защиты в режиме измерений: 37 мА.

Информация по измеренным величинам выводится на светодиодный дисплей.

**Высоковольтный прожиг изоляции** применяется для обнаружения места повреждения кабеля. Воздействие на поврежденный кабель напряжением 40 кВ при токах до 60 мА приводит к тому, что однофазное замыкание переходит в двух- или трёхфазное, или же разрушается проводящий мостик между жилой и оболочкой кабеля.

Такое повреждение легко обнаружить современным рефлектометром типа «РЕЙС».

**Рефлектометр** – это прибор для определения расстояния до места повреждения в силовом кабеле.

**Рефлектограмма** – это осциллограмма сигналов, полученная с помощью рефлектометра.

Внешний вид рефлектометра «РЕЙС-305» приведен на рис. 5.11.



Рис. 5.11 Рефлектометр «РЕЙС-305»

В приборе «РЕЙС-305» используется три метода измерения: метод импульсной рефлектометрии, метод колебательного разряда и импульсно-дуговой метод.

Метод импульсной рефлектометрии основан на эффекте отражённой волны после подачи в линию импульсного сигнала. По длительности интервала времени  $t_x$  между поданным (зондирующим) и принятым импульсами можно рассчитать расстояние до места повреждения  $L_x$ , а по форме принятого сигнала – характер повреждения: короткое замыкание или обрыв. Значение  $L_x$  определяется по формуле:

$$L_x = \frac{t_x \cdot V}{2}, \quad (5.4)$$

$$V = \frac{c}{\gamma} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (5.5)$$

где:  $V$  - скорость распространения волны в линии;  $c$  - скорость света;  $\gamma$  - коэффициент укорочения электромагнитной волны в линии;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала изоляции кабеля.

Коэффициент укорочения  $\gamma$  показывает во сколько раз скорость распространения импульса в линии меньше скорости его распространения в вакууме. При известной длине кабеля значение  $\gamma$  можно определить экспериментально с помощью метода импульсной рефлектометрии.

Отражения импульсов появляются в тех местах, где волновое сопротивление линии отклоняется от своего среднего значения: у муфт, у мест изменения сечения, у мест сжатия кабеля, в месте утечки, в месте обрыва, короткого замыкания, в месте ответвления, в конце кабеля и т.д.

В местах подключения прибора также возникают переотражения сигналов от выходного сопротивления генератора зондирующих импульсов, если оно не равно волновому сопротивлению контролируемой линии. Амплитуда таких переотражений может быть сравнима с амплитудой отражений. Поэтому перед началом измерений проводится операция согласования выходного сопротивления генератора с волновым сопротивлением линии.

Зондирующий и отражённые импульсы воспроизводятся на дисплее прибора, образуя рефлектограмму линии, как показано на рис. 5.12.

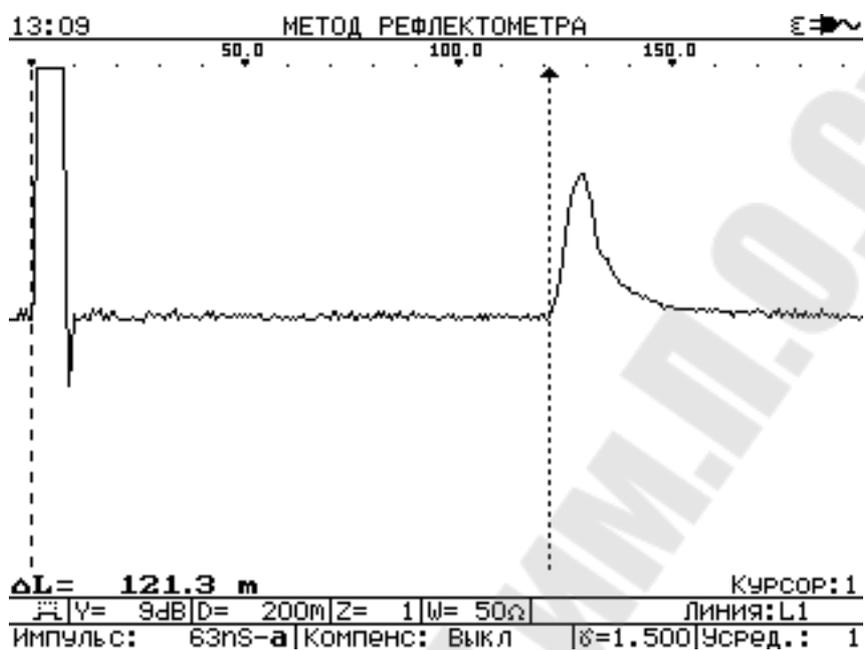


Рис. 5.12 Рефлектограмма прибора «РЕЙС-305» для метода импульсной рефлектометрии

Отсутствие отражённого сигнала свидетельствует о точном согласовании системы с линией по волновому сопротивлению и отсутствии повреждений. При обрыве линии отражённый импульс имеет ту же полярность, что и зондирующий. При коротком замыкании отражённый импульс меняет полярность.

Основная сложность метода импульсной рефлектометрии заключается в выделении отражённых импульсов на фоне помех.

При **методе колебательного разряда** производится воздействие на повреждённую силовую кабельную линию от специального генератора высоковольтных импульсов или от источника высокого напряжения. В момент пробоя кабельной линии в слабом месте изоляции возникает волновой процесс, который распространяется по линии и фиксируется прибором.

**Импульсно-дуговой метод** (метод кратковременной дуги) основан на генерировании в линию высоковольтного короткого импульса и фиксации отражённого импульса, вызванного кратковременным пробоем изоляции. Этот метод не вызывает прожиг изоляции и предназначен для определения повреждений в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией.

На рис. 5.13 показан внешний вид прибора «ВЕГА-500» для измерения параметров автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током (ВДТ).



Рис. 5.13 Прибор «ВЕГА-500»

Прибор «ВЕГА-500» измеряет ток и время отключения ВДТ.

Принцип работы прибора основан на генерации тока в цепи, контролируемой ВДТ, вызывающего отключение ВДТ. Прибор включают между одной из фаз и защитным проводником РЕ.

Внешний вид установки «СКАТ М90» для испытаний трансформаторного масла приведен на рис. 5.14.



Рис. 5.14 Установка «СКАТ М90»

Установка «СКАТ М90» предназначена для проведения испытаний на пробы трансформаторного масла и любых жидких диэлектриков напряжением до 90 кВ. Цикл измерений полностью автоматизирован, результаты измерений отображаются на дисплее установки.

На рис. 5.15 показан индикатор дефектов обмоток электрических машин «ИДО-05».



Рис. 5.15 Прибор «ИДО-05»

Прибор «ИДО-05» позволяет выявить следующие дефекты в трёхфазных электрических машинах напряжением до 1000 В (без демонтажа и разборки): междувитковые замыкания, обрывы проводников, ошибки в схеме соединения обмоток, неудовлетворительное состояние изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками.

Принцип работы прибора основан на измерении полных сопротивлений фаз обмоток и анализе их значений.

Внешний вид прибора «ПКР-1» для контроля устройства РПН трансформаторов показан на рис. 5.16.



Рис. 5.16 Прибор «ПКР-1»

С помощью прибора «ПКР-1» можно построить круговую диаграмму срабатывания вала, контакторов и избирателей переключающего устройства РПН, а также получить осциллограммы работы контакторов.

**Тепловизор** – это измерительный прибор, позволяющий анализировать тепловые поля бесконтактным способом и работающий по принципу цифрового фотоаппарата. В результате работы прибора формируется изображение теплового поля исследуемой поверхности, которое называется **термограммой**.

На рис. 5.17 показан внешний вид тепловизора «NEC TH7700».



Рис. 5.17 Тепловизор «NEC TH7700»

Работа тепловизора основана на том, что все нагретые объекты излучают инфракрасные волны. При этом интенсивность и частота излучения зависят от температуры поверхности объекта.

**Интегральной излучательной способностью** (энергетической светимостью объекта) называют величину  $W$ , характеризующую интенсивность излучения и определяемую в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$W = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^4, \quad (5.6)$$

где:  $\theta$  - температура поверхности объекта в Кельвинах.

Чем выше температура, тем меньше длина волны излучения в соответствии с законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\theta}, \quad (5.7)$$

где:  $\lambda_{\max}$  - длина волны излучения, соответствующая максимальному значению излучательной способности объекта.

Если объект полностью поглощает все падающие на него электромагнитные волны (в том числе и тепловое излучение), то его называют **абсолютно чёрным телом**.

Формулы (5.6) и (5.7) справедливы только для абсолютно чёрного тела. Для получения реальных значений величин  $W$  и  $\lambda_{\max}$  их необходимо умножить на величину  $\varepsilon$ , которая называется **коэффициентом излучения**.

На термограмме тепловое поле поверхности объекта отображается с помощью **цветовой палитры**. В классической цветовой палитре наиболее холодным участкам соответствуют чёрный и синий цвета, а наиболее нагретым – белый и красный цвета. В середине спектра – зелёный цвет. Существуют также чёрно-белые, и другие виды палитр.

На рис. 5.18 представлены фотография и соответствующая термограмма боковой поверхности силового трансформатора.



Рис. 5.18 Фотография и термограмма боковой поверхности силового трансформатора

В энергетике тепловизоры применяют для выявления участков локальных перегревов электрооборудования: трансформаторов, выключателей, изоляторов, проводов и т. д.

**Виброметр** – это прибор для измерения параметров вибрации.

На рис. 5.19 показан внешний вид виброметра «АССИСТЕНТ-V3RT».



Рис. 5.19 Виброметр «АССИСТЕНТ-V3RT»

Прибор предназначен для измерения уровней виброускорения, и частотного анализа в диапазонах общей и локальной вибрации. Измерение вибрации осуществляется одновременно по трём каналам.

**Виброскорость** показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки оборудования в процессе ее прецессии. Измеряется виброскорость в [мм/сек].

**Виброускорение** представляет собой производную от виброскорости и характеризует силовое динамическое взаимодействие элементов внутри агрегата, которое вызвало данную вибрацию.

Измеренный сигнал вибрации раскладывается в частотный спектр с помощью преобразования Фурье. Анализ изменения амплитудо-частотной и фазо-частотной характеристик спектра позволяет выявить развитие дефектов электрооборудования, влияющих на его вибрацию.

## 6 Микропроцессорные приборы для учёта электрической и тепловой энергии

Основные приборы для учёта электроэнергии – это счётчики электроэнергии и средства, обеспечивающие их соединение в информационную сеть.

### 6.1 Счётчики электроэнергии

**Микропроцессорный счётчик электроэнергии** – это многофункциональный прибор, обеспечивающий измерение, индикацию, хранение и передачу параметров нагрузок системы электроснабжения.

Расчёт потреблённой активной энергии  $W_p$  в трёхфазной сети осуществляется по мгновенным значениям по следующей формуле:

$$\begin{aligned} W_p &= \int_{t_1}^{t_2} U_{L1}(t) \cdot I_{L1}(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{L2}(t) \cdot I_{L2}(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{L3}(t) \cdot I_{L3}(t) \cdot dt \approx \\ &\approx \sum_{i=0}^{n-1} U_{L1,i} \cdot I_{L1,i} \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^{n-1} U_{L2,i} \cdot I_{L2,i} \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^{n-1} U_{L3,i} \cdot I_{L3,i} \cdot \Delta t = \quad , \quad (6.1) \\ &= \Delta t \cdot \left( \sum_{i=0}^{n-1} (U_{L1,i} \cdot I_{L1,i} + U_{L2,i} \cdot I_{L2,i} + U_{L3,i} \cdot I_{L3,i}) \right) \end{aligned}$$

где:  $t_2 - t_1$  - расчётный интервал времени;  $U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}$  - фазные напряжения соответствующих фаз;  $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}$  - линейные токи соответствующих фаз;  $i$  - номер шага расчёта;  $\Delta t$  - период дискретизации;  $n$  - количество шагов расчёта на расчётном интервале.

Формула (6.1) учитывает все высшие гармонические составляющие напряжения и тока. Для реактивной и полной энергии формул расчёта по мгновенным значениям не существует. Поэтому расчёт осуществляется по действующим значениям. Вначале определяется полная энергия:

$$W_s = (U_{RMS.L1} \cdot I_{RMS.L1} + U_{RMS.L2} \cdot I_{RMS.L2} + U_{RMS.L3} \cdot I_{RMS.L3}) \cdot (t_2 - t_1), \quad (6.2)$$

где:  $U_{RMS.L1}, U_{RMS.L2}, U_{RMS.L3}$  - действующие значения фазных напряжений соответствующих фаз (см. формулу (5.1));  $I_{RMS.L1}, I_{RMS.L2},$

$I_{\text{RMS.L3}}$  - действующие значения линейных токов соответствующих фаз (см. формулу (5.2)).

Затем рассчитывается реактивная энергия:

$$W_Q = \sqrt{W_S^2 - W_P^2} \quad (6.3)$$

Внешний вид счётчика «Smart IMS» приведен на рис. 6.1.



Рис. 6.1 Счётчик «Smart IMS»

Счётчик «Smart IMS» реализует следующие основные функции.

- Автоматический многотарифный учёт потребляемой активной, а также реактивной электроэнергии.
- Предоставляет возможность удалённого доступа к данным, посредством встроенного PLC-модема или дополнительного канала связи.
- Позволяет дистанционно управлять потреблением или питанием отдельной нагрузки с помощью встроенных отключающих реле.
- Контролирует дифференциальный ток и измеряют потребление энергии, соответствующей дифференциальному току.
- Поддерживает любой режим работы: как с предоплатой, так и в кредит. Режим работы с предоплатой не требует установки в счёт-

чик специальных карт – вся необходимая информация об оплате электроэнергии поступает в счётчик по каналам связи.

- Накапливает, хранит и передаёт в центр информацию: по аварийным состояниям сети; по собственным аварийным состояниям; по действиям потребителя, ведущим к нарушению договора с поставщиком электроэнергии.

Функциональная схема счётчика «Smart IMS» приведена на рис. 6.2.

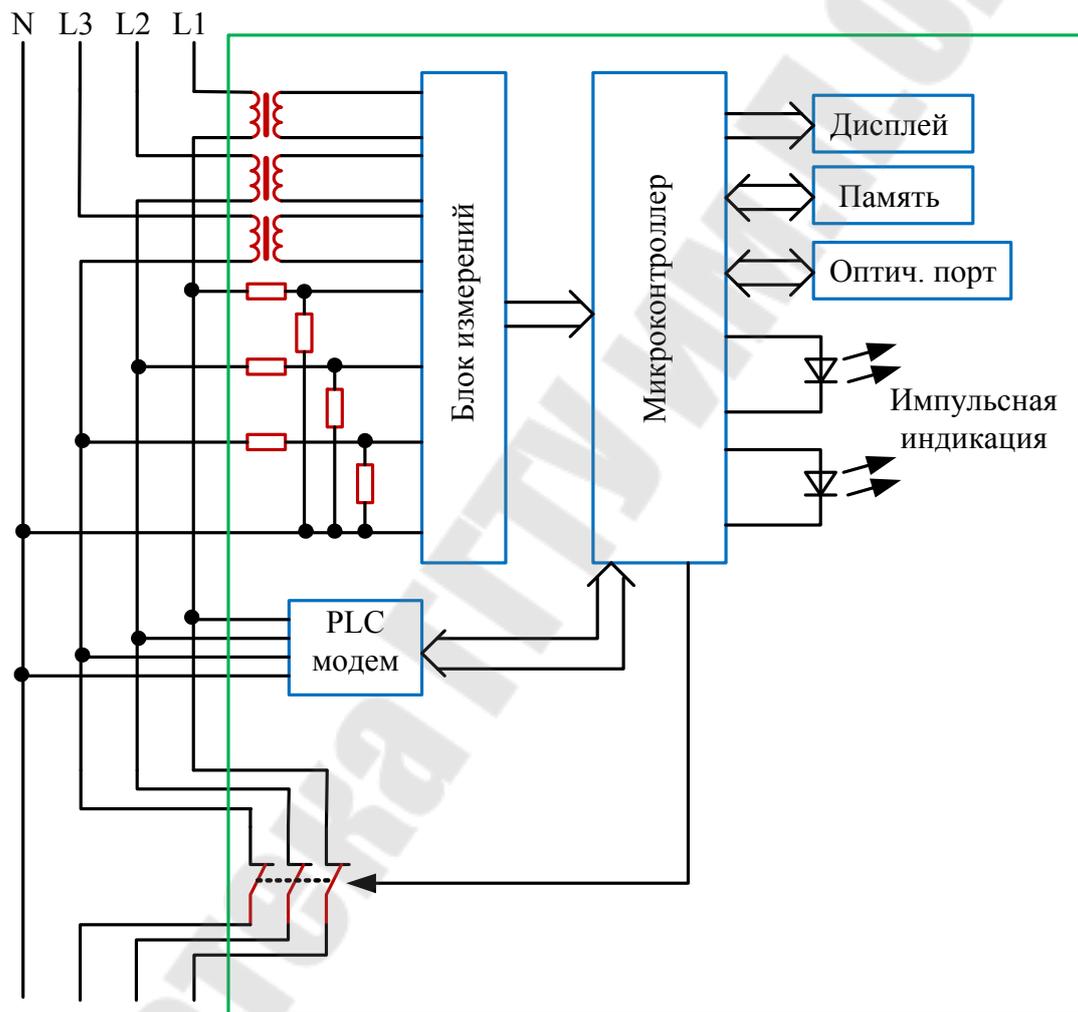


Рис. 6.2 Функциональная схема счётчика «Smart IMS»

Во входных цепях счётчика присутствуют вторичные измерительные преобразователи тока, выполненные на основе малогабаритных измерительных трансформаторов и вторичные измерительные преобразователи напряжения, выполненные на основе резистивных делителей напряжения. В блоке измерений находятся аналоговые усилители, фильтры и АЦП. На выходах этого блока формируются двоичные коды, поступающие в микроконтроллер.

**Микроконтроллер** осуществляет вывод информации на дисплей, запись необходимых значений в энергонезависимую память, обмен данными через оптический порт и PLC – модем, а также управление светодиодами импульсной индикации и встроенным реле.

**Оптический порт** используется для программирования настроек счётчика и считывания с него необходимой информации через оптический кабель, подключаемый к специальному разъёму на его лицевой панели.

**PLC – модем** – это устройство, обеспечивающее обмен информацией между счётчиком и системами сбора данных через силовые линии электропередачи путём наложения на напряжение электрической сети высокочастотного сигнала малой амплитуды. В модеме происходит кодирование передаваемого и декодирование принимаемого сигнала, а также электрическое разделение напряжения электрической сети и высокочастотного сигнала.

**Импульсная индикация** состоит из двух светодиодов, мигающих с частотой, пропорциональной потребляемой активной и реактивной мощности.

**Встроенное реле** позволяет отключать потребителей по сигналам из диспетчерского центра.

**Дисплей** представляет собой 8-разрядный жидкокристаллический индикатор, содержащий дополнительные информационные знаки, характеризующие тип выводимой информации (рис. 6.3).



Рис. 6.3 Дисплей счётчика «Smart IMS»

Информационное поле дисплея разделено на три строки. Верхняя строка – индикаторы параметров:  $U$ ,  $E$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $A$ . Строка содержит также дополнительные знаки -  $1$ ,  $2$ ,  $3$ ,  $4$ , и указатели действующего тарифа -  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ,  $A4$  (виден лишь один из указателей). Средняя строка – данные (8 разрядов). Строка также содержит знаки единиц измерения –  $kvarh$ ,  $kWh$ ,  $Min$ ,  $Un$ . Нижняя строка – индикаторы флагов:  $U$ ,  $E$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $!$  и других.

При индикации используются сочетания знаков в строках – верхней или нижней.

В табл. 6.1 даны экраны, выводимые на дисплей.

Таблица 6.1

Экраны, выводимые на дисплей

Экран	Значение
$U1$	Длительность отсутствия напряжения в сети
$U2$	Длительность некачественного напряжения
$E$	Длительность наличия дифференциального тока
$S1$	Текущее сальдо
$S2$	Разница текущего сальдо и лимита отключения
$SA$	Потребление активной энергии за период
$SPA$	Пиковая активная мощность за период анализа
$PR$	Мощность реактивная индуктивная
$PR$	Мощность реактивная емкостная
$R1$	Энергия реактивная индуктивная
$R2$	Энергия реактивная ёмкостная
$RA$	Коэффициент мощности
$A$	Энергия активная суммарная
$A1$	Энергия активная по тарифу 1
$A2$	Энергия активная по тарифу 2
$A3$	Энергия активная по тарифу 3
$A4$	Энергия активная по тарифу 4

Индикаторы флагов сигнализируют о наличии или отсутствии различных событий, зафиксированных счётчиком (рис. 6.4).

нижняя строка знаков и сочетаний	
U	Некачественное напряжение
U 	Отключение по некачественному напряжению
E	Дифференциальный ток
E 	Отключение по дифференциальному току
S	Предупреждения по сальдо
S A4	Включение A4 сальдо
S 	Отключение по сальдо
P	Предупреждения по мощности
P A4	Включение A4 по мощности
P 	Отключение по мощности
!	Предупреждение из Центра
! A4	Включение A4 из Центра
! 	Отключение из Центра
	Состояние реле (Наличие знака означает отключение)
	Предупреждение по току (перегрузка)
 	Отключение по току
x	Предупреждение по cosφ
x A4	Включение A4 по cosφ
 x	Отключение по cosφ
	Нет синхронизации времени. Ошибка синхронизации времени
	Неправильное подключение счётчика

Рис. 6.4 Состояния индикаторов флагов счётчика «Smart IMS»

Счётчик имеет три режима: обычный, экстремальный и аварийный.

**Обычный режим** характеризуется следующими признаками:

- реле счётчика включено;
- светодиоды на лицевой панели мигают с частотой, пропорциональной мощности потребления;
- данные дисплея доступны после его включения с помощью кнопки управления.

**Экстремальный режим** характеризуется следующими признаками:

- реле счётчика включено;
- светодиоды на лицевой панели мигают с частотой, пропорциональной мощности потребления;
- данные дисплея не доступны.

При перегреве счетчика (внутренней температуре выше  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или переохлаждении (внутренней температуре ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) питание дисплея отключается, то есть дисплей не включается при нажатии на кнопку управления. В этом случае о работе счетчика сигнализируют только светодиоды.

При **аварийном режиме** работы отключается реле счётчика, то есть отсутствует напряжение в цепи потребителя. Счетчик имеет возможность отключить потребителя от сети по следующим причинам: по некачественному напряжению, по дифференциальному току, по току потребления, по коэффициенту мощности, по салдо, по мощности, по сигналу из диспетчерского центра.

Таким образом, аварийный режим характеризуется следующими признаками:

- реле счетчика отключено, цепи потребления обесточены;
- светодиоды на лицевой панели не мигают;
- дисплей работает непрерывно, а на экране указывается причина отключения реле.

Существуют схемы прямого и трансформаторного включения счётчика.

**Схема прямого включения** используется, если токи нагрузки не превышают 40 А. Монтажная схема подключения счётчика для такого случая показана на рис. 6.5.

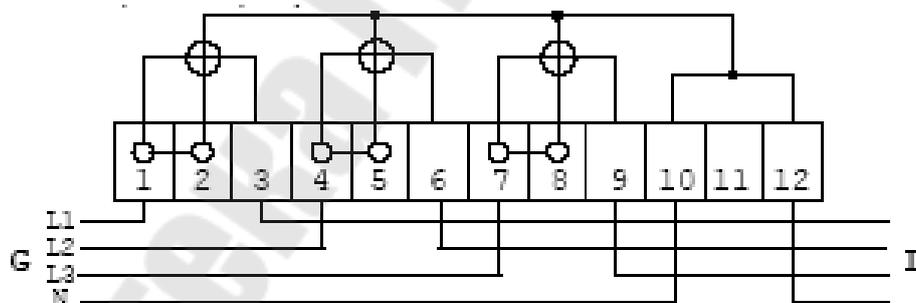


Рис. 6.5 Монтажная схема для прямого включения счётчика

В схеме трансформаторного включения токовые входы счётчика подключаются через трансформаторы тока (рис. 6.6).

В случае трансформаторной схемы на клеммной колодке счётчика необходимо снять перемычки между контактами 1,2 4,5 и 7,8.

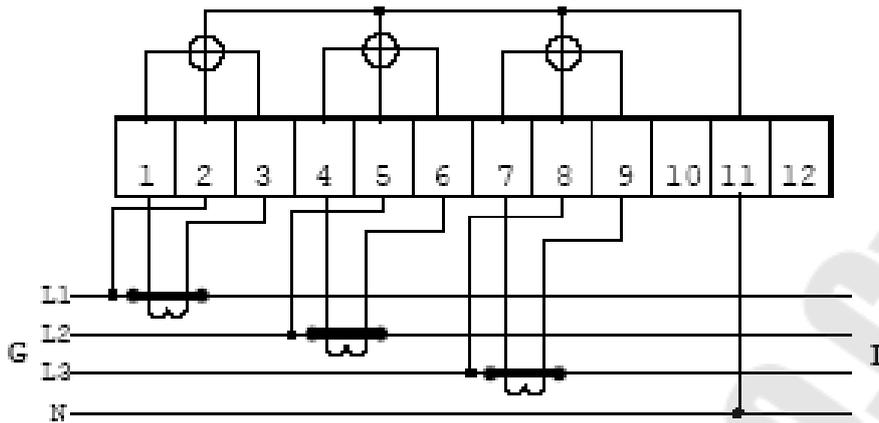


Рис. 6.6 Монтажная схема для трансформаторного включения счётчика

## 6.2 Счётчики тепловой энергии

**Микропроцессорный счётчик тепловой энергии** – это многофункциональный прибор, обеспечивающий измерение, индикацию, хранение и передачу параметров потреблённой тепловой энергии.

Для подключения счётчика к системе теплоснабжения требуются дополнительные элементы: расходомер, датчики температуры и датчики давления.

**Расходомер (преобразователь расхода)** – это устройство, определяющее скорость теплоносителя и его массовый расход. Бывают турбинные, электромагнитные, ультразвуковые и вихревые расходомеры.

Тепловая энергия рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}
 Q &= c_{\text{уд}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \int_{t_1}^{t_2} M(t) \cdot dt = c_{\text{уд}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \int_{t_1}^{t_2} \rho \cdot F \cdot v(t) \cdot dt = \\
 &= c_{\text{уд}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \rho \cdot F \cdot \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot dt \approx c_{\text{уд}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \rho \cdot F \cdot \sum_{i=0}^{n-1} v_i \cdot \Delta t = \quad (6.4) \\
 &= c_{\text{уд}} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot \rho \cdot F \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=0}^{n-1} v_i,
 \end{aligned}$$

где:  $t_2 - t_1$  - расчётный интервал времени;  $c_{\text{уд}}$  - удельная теплоёмкость теплоносителя;  $\theta_2$  - температура на входе теплоносителя;  $\theta_1$  - температура на выходе теплоносителя;  $M$  - массовый расход теплоносителя;  $\rho$  - плотность теплоносителя;  $F$  - площадь сечения трубопровода;

$v$  - скорость теплоносителя;  $i$  - номер шага расчёта;  $\Delta t$  - период дискретизации;  $n$  - количество шагов расчёта на расчётном интервале.

Внешний вид счётчика тепловой энергии СКМ-2 и его электромагнитного расходомера показан на рис. 6.7.



Рис 6.7 Счётчик тепловой энергии (тепловычислитель) СКМ-2 и его расходомер

Счётчик СКМ-2 обеспечивает измерения по двум тепловым системам и рассчитан на работу совместно с первичными преобразователями расхода, объёма, температуры и давления. Он состоит из тепловычислителя, к которому могут подключаться до 5 преобразователей расхода с выходным числоимпульсным или частотным сигналом, до 5 термопреобразователей сопротивления (датчиков температуры) с характеристикой Pt500, до 2 преобразователей (датчиков) давления с выходным сигналом тока 0-5mA, 0-20mA, 4-20mA.

Функциональная схема подключения счётчика тепловой энергии к системе закрытого теплоснабжения показана на рис. 6.8.

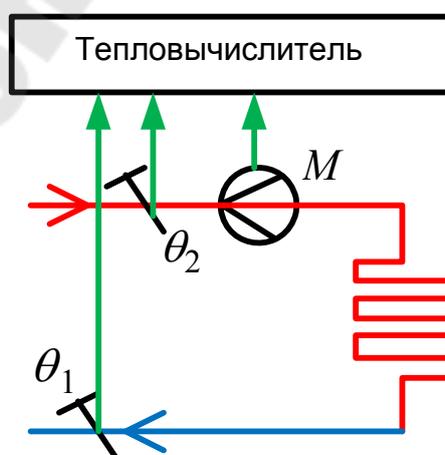


Рис. 6.8 Схема подключения счётчика тепловой энергии

Расходомер, устанавливаемый на трубопроводе, выдаёт импульсный сигнал с частотой импульсов, пропорциональной массовому расходу  $M$  теплоносителя.

Датчики температуры монтируются на входе и выходе системы теплоснабжения для измерения температур  $\theta_2$  и  $\theta_1$ .

В трубопровод устанавливают также датчики давления, выдающие сигнал тока, пропорциональный значению давления. Измеренное давление используется программным обеспечением счётчика для корректировки значений плотности  $\rho$  теплоносителя.

### 6.3 Автоматизированные системы контроля и учёта энергии

Посредством интерфейсов связи счётчики объединяются в информационную сеть и формируют АСКУЭ – автоматизированную систему контроля и учёта энергии. Для создания такой сети одних счётчиков электрической и тепловой энергии не достаточно.

Сети АСКУЭ условно можно представить в виде пирамиды (рис. 6.9), на нижних уровнях которой располагаются счётчики электроэнергии и другие микропроцессорные измерительные приборы. На средних уровнях размещаются **концентраторы** – устройства, обеспечивающие сбор данных и их передачу на верхние уровни. Концентраторы работают и в обратную сторону, передавая управляющие команды и настройки в приборы нижнего уровня. На верхних уровнях АСКУЭ находятся компьютеры и серверы, осуществляющие окончательный сбор информации, её сохранение, а также необходимые математические расчёты.



Рис. 6.9 Структурная схема АСКУЭ

Приборы нижнего уровня АСКУЭ, как правило, соединяют в локальную сеть по магистральному принципу посредством интерфей-

сов связи RS485 или Ethernet. В качестве линий связи используют витую пару или волоконно-оптические кабели.

Концентраторы обеспечивают радиальную часть сети. Для их обмена данными с верхним уровнем АСКУЭ используются скоростные проводные интерфейсы типа Ethernet или беспроводная радиорелейная или сотовая связь.

Концентратор, имеющий значительное количество интерфейсов и линий связи, называют **маршрутизатором**.

Внешний вид маршрутизатора RTR-5 показан на рис. 6.10.



Рис. 6.10 Маршрутизатор RTR-5

Маршрутизатор RTR-5 выполняет следующие функции.

1. Обмен данными со счётчиками электроэнергии, либо другими измерительными приборами с использованием:

- PLC-магистрالی, физической средой которой являются трёхфазные линии электропередачи 0,4 кВ или 6-24 кВ;

- низковольтной магистрالی CM.BUS;

2. Обмен данными Центром Smart IMS с использованием:

- GSM-связи, в том числе SMS при необходимости;

- PLC -магистрالی;

- магистрالی Ethernet;

- интерфейса RS-232, в том числе с подключением внешнего телефонного модема.

3. Синхронизация времени в подсистеме сбора и передачи данных с временем центра Smart IMS.

4. Перенаправление потребительской информации со счетчиков на внешние дисплеи, либо на другой маршрутизатор.

5. Хранение данных до момента передачи их в Центр, либо до истечения их времени жизни.

## 7 Микропроцессорные приборы для релейной защиты и автоматики

Микропроцессорные приборы релейной защиты и автоматики (РЗА) – это многофункциональные устройства, предназначенные для защиты электрооборудования от аварийных и аномальных режимов, а также для повышения надёжности электроснабжения потребителей. Такие приборы способны взаимодействовать между собой посредством информационной сети.

Внешний вид микропроцессорного реле МР-741 показан на рис. 7.1.



Рис. 7.1 Микропроцессорное реле МР-741

МР-741 – это реле защиты и автоматики ввода, отходящей линии и секционного выключателя со свободно программируемой логикой.

Реле МР741 предназначено для защиты:

- кабельных и воздушных линий электропередачи напряжением 6-35 кВ с двухсторонним питанием;
- питающих и отходящих присоединений распределительных устройств 6-35 кВ;
- трансформаторов (в качестве резервной защиты трансформаторов).

MP741 является современным цифровым устройством защиты, управления и противоаварийной автоматики, и представляет собой комбинированное многофункциональное устройство, объединяющее различные функции защиты, измерения, контроля, местного и дистанционного управления.

Использование в устройстве MP741 современной аналого-цифровой и микропроцессорной элементной базы обеспечивает высокую точность измерений и постоянство характеристик, что позволяет существенно повысить чувствительность и быстродействие защит, а также уменьшить ступени селективности.

Основные выполняемые функции:

- направленная/ненаправленная защиты от повышения линейного тока, токов нулевой и обратной последовательностей с пуском по напряжению – 4 ступени;
- защита от повышения суммарного тока нулевой последовательности высших гармоник с пуском по напряжению – 1 ступень;
- защита от обрыва провода – 1 ступень;
- защиты от понижения и повышения напряжения с уставкой на возврат – 2 ступени;
- защиты от снижения и повышения частоты с уставкой на возврат;
- определение места повреждения;
- четырёхкратное АПВ выключателя защищаемого присоединения;
- контроль состояния выключателя.

Дополнительные функции:

- индикация действующих (текущих) значений токов и напряжений защищаемого присоединения, частоты;
- блокирование от многократных включений выключателя;
- обмен информацией с верхним уровнем (АСУ ТП);
- непрерывная самодиагностика аппаратной и программной части.

Программное обеспечение реле включает в себя следующие задачи:

- задача обработки входных дискретных сигналов;
- задача цифровой фильтрации и осциллографирования;
- задача логики защит и автоматики;
- задача часов реального времени;

- задача реализации функций человеко-машинного интерфейса и самодиагностики;
- задача ввода-вывода по последовательному интерфейсу.

Реле МР741 состоит из нескольких модулей, как показано на рис. 7.2.



Рис. 7.2 Структурная схема реле МР-741

В модуле аналоговых сигналов располагаются вторичные измерительные преобразователи, на входы которых поступают напряжения и токи от соответствующих измерительных трансформаторов.

На входы модуля дискретных сигналов подаются напряжения, которые могут принимать только два значения – либо 0 В, либо 220 В. Подача этих напряжений осуществляется с помощью различных механических контактов: блок-контактов высоковольтных выключателей, контактов промежуточных реле, контактов других блоков РЗА.

В модуле процессора находятся АЦП, микроконтроллер, устройства памяти и другие блоки.

В модуле питания и реле располагаются блок питания и малогабаритные электромеханические промежуточные реле, используемые для релейных выходов устройства.

Реле МР-741 имеет следующие интерфейсы связи: RS232, RS485, USB.

Для осуществления функций контроля положения и изменения состояния выключателя используются внешние сигналы с его блок-контактов.

Для реализации управления выключателем предусмотрены следующие возможности подачи команд:

- от встроенных кнопок «ВКЛ/ОТКЛ»;
- от внешнего ключа управления;
- от внешней схемы (например, АВР, телемеханика);
- по интерфейсу связи.

На рис. 7.3 приведена логическая программная схема управления высоковольтным выключателем, используемая в МР-741.

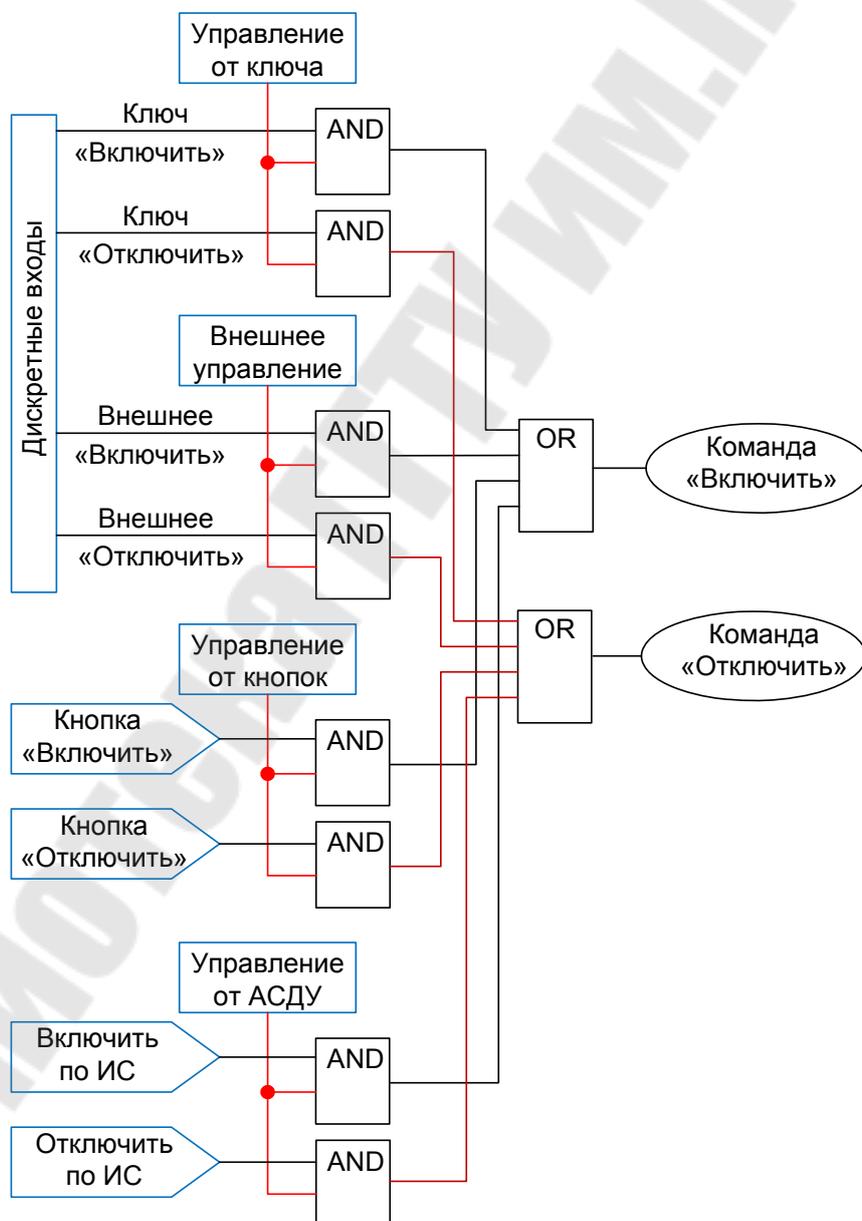


Рис. 7.3 Логическая схема управления выключателем

В соответствии с этой схемой включение выключателя может произойти, например, если разрешено управление от ключа и на соответствующий дискретный вход подано напряжение, соответствующее команде «Ключ «включить»». Второй пример: разрешено управление от автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) и пришла команда от интерфейса связи (ИС) «Включить».

Сигналы с блок-контактов выключателя («сост. включено» и «сост. отключено») распознаются согласно алгоритму, показанному на рис. 7.4.

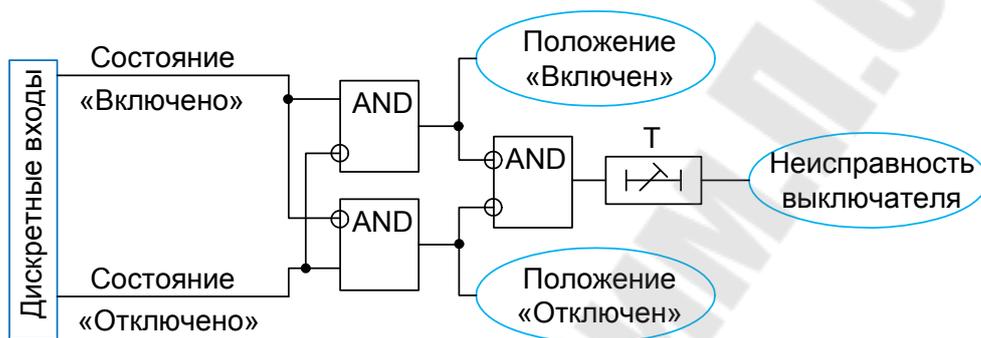


Рис. 7.4 Логическая схема определения положения выключателя

Если блок-контакт «включено» разомкнут, а блок-контакт «отключено» замкнут, то вырабатывается сигнал «положение: отключён». В случае, когда блок-контакт «включено» замкнут, а «отключено» разомкнут, вырабатывается сигнал «положение: включён». Если оба сигнала имеют одинаковое значение больше времени  $T$ , то вырабатывается сигнал «неисправность выключателя».

На рис. 7.5 приведена логическая программная схема направленной защиты от повышения тока с пуском по напряжению.

Срабатывание измерительного органа тока произойдёт, если будут выполнены следующие условия:

- измеренный ток превышает ток уставки;
- измеренное напряжение ниже напряжения уставки;
- мощность направлена от шин в линию;
- отсутствует блокировка от внешних цепей.

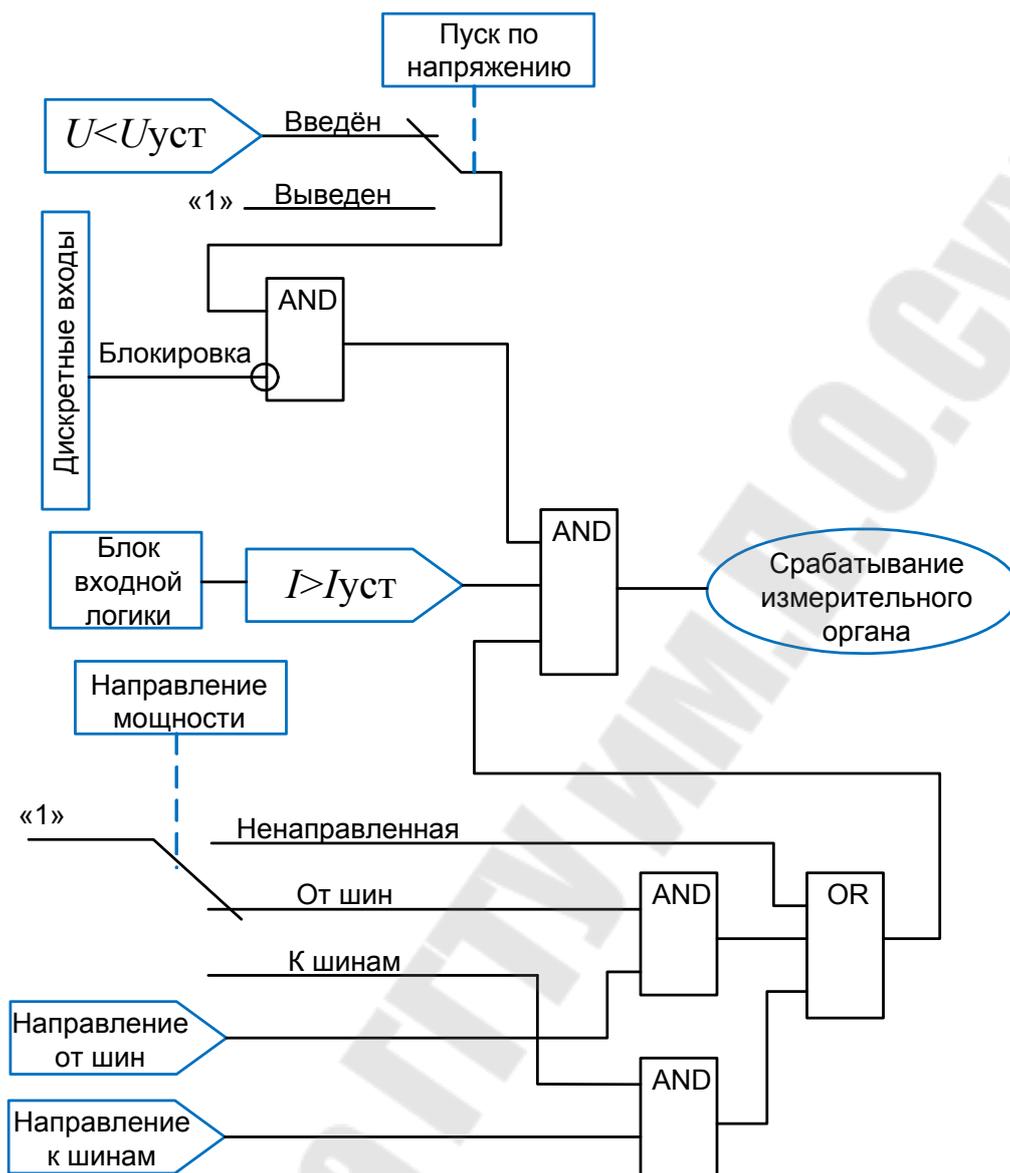


Рис. 7.5 Логическая схема направленной токовой защиты

В реле МР-741 предусмотрена свободно программируемая логика, то есть пользователь может создавать свои логические программные схемы между физическими и логическими входами и релейными выходами.

Конфигурирование определяемой пользователем логики осуществляется с помощью специального редактора (встроенного в программу УниКон), который обеспечивает построение схемы релейной защиты на графическом языке функциональных блоков.

МР741 имеет следующие функциональные блоки: входы, выходы, записи в журнал, логические элементы «И», «ИЛИ», «Исключающее ИЛИ», «НЕ», триггеры, таймеры, мультиплексоры.

Элемент «Вход» (рис. 7.6) позволяет загружать 1 бит данных из внешней базы данных устройства во внутреннюю базу данных свободно программируемой логики.



Рис. 7.6 Программный элемент «Вход»

Элемент «Вход» имеет один выход и позволяет подключать следующие сигналы:

- входные дискретные сигналы;
- входные логические сигналы;
- сигнал срабатывания измерительного органа любой защиты;
- сигнал срабатывания любой защиты;
- сигналы неисправности;
- сигналы аварии, сигнализации;
- сигналы о состоянии выключателя, сигналы команд управления выключателем.

Элемент «Выход» (рис. 7.7) позволяет сохранять 1 бит данных из внутренней базы данных свободно программируемой логики во внешнюю базу данных устройства.



Рис. 7.7 Программный элемент «Выход»

При помощи элемента «Выход» МР741 позволяет выводить до 24-х выходных сигналов свободно программируемой логики на реле, индикаторы и выходные логические сигналы.

Логический элемент «И» (рис. 7.8) может иметь от 2 до 8 входов.

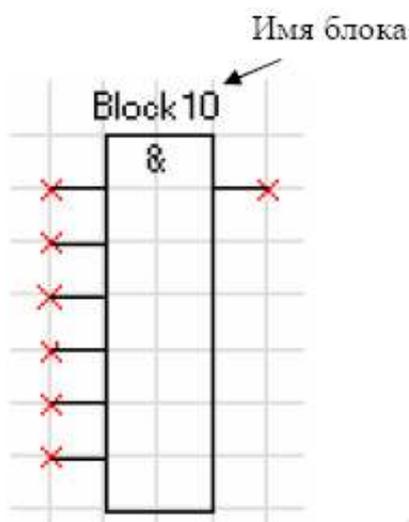


Рис. 7.8 Программный логический элемент «И»

Элемент «Таймер» (рис. 7.9) предназначен для выполнения функции задержки времени. Сигнал на выходе таймера на срабатывание появляется через время  $T_{ср}$  после появления сигнала на входе.

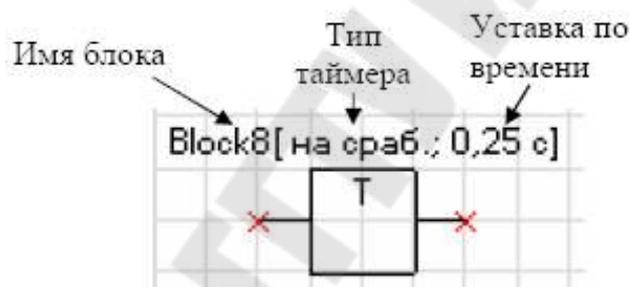


Рис. 7.9 Программный элемент «Таймер»

На рис. 7.10 приведена функциональная схема подключения реле МР-741.

Измерение линейных токов отходящей линии осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока ТА1-ТА3, соединённых по схеме полной звезды. Отдельно происходит измерение тока нулевой последовательности с помощью специального трансформатора тока ТА4.

Измерение напряжений выполняется с помощью трёх однофазных измерительных трансформаторов тока, каждый из которых имеет две вторичные обмотки. Первые вторичные обмотки используются для измерения фазных напряжений, а вторые собраны по схеме разомкнутого треугольника для измерения напряжения нулевой последовательности.

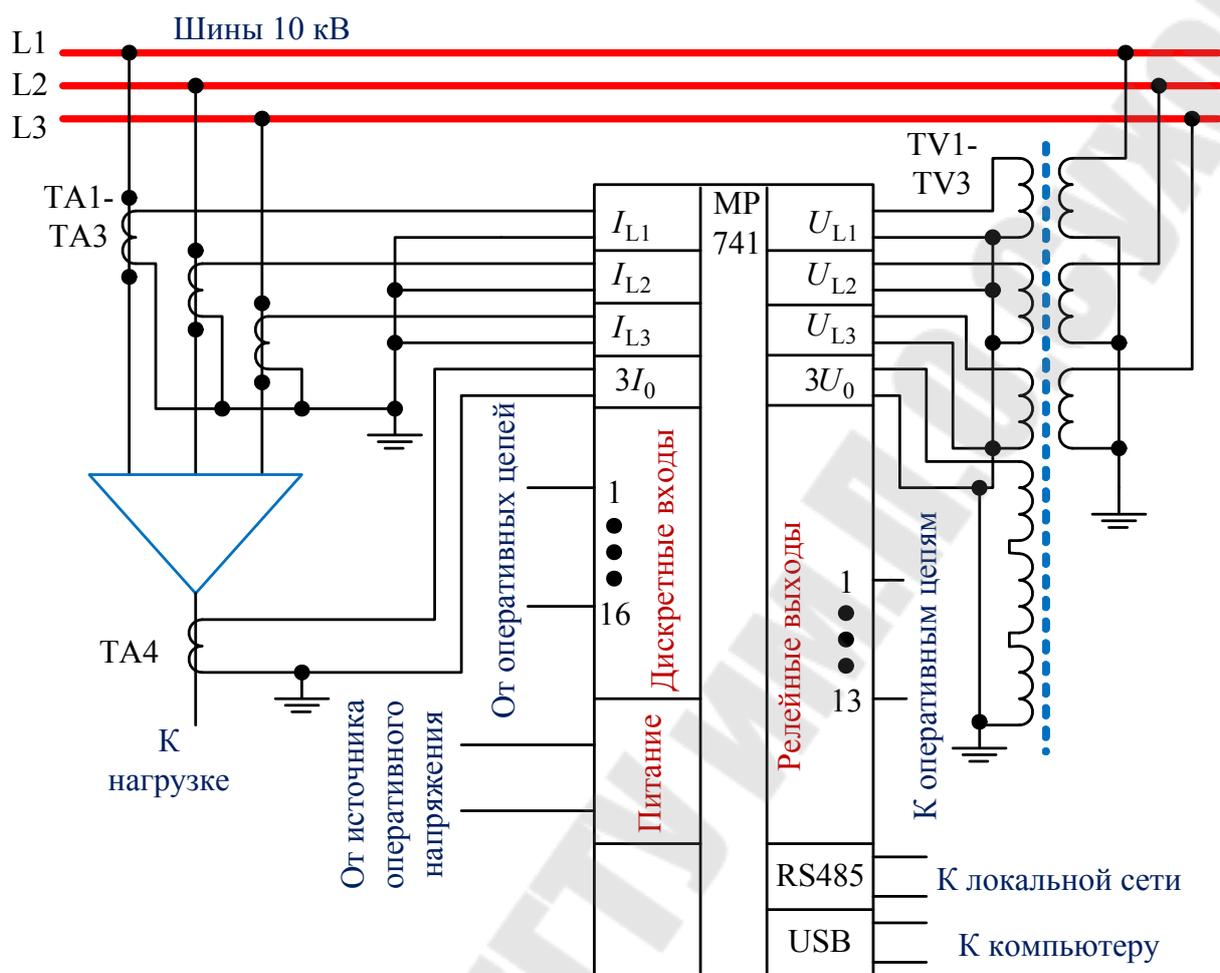


Рис. 7.10 Функциональная схема подключения реле МР-741

Дискретные входы и релейные выходы подключаются к цепям оперативного тока для управления высоковольтными выключателями, сигнализацией и связи с другими устройствами РЗА.

Микропроцессорные реле могут быть соединены в локальную сеть с помощью магистрального интерфейса RS485.

## 8 Микропроцессорные приборы для систем автоматического управления

**Система автоматического управления (САУ)** - это набор устройств, взаимодействующих между собой для постоянного поддержания параметров технологического процесса в заданных пределах.

В энергетике применяют много различных САУ. В первую очередь, это САУ, поддерживающие режимы работы электрогенераторов. Здесь имеются САУ, регулирующие подачу топлива, пара, возбуждение и охлаждение электрогенератора.

В системах электроснабжения промышленных предприятий используются следующие основные виды САУ:

- автоматика электропривода;
- автоматика управления освещением;
- автоматика управления компенсацией реактивной мощности;
- автоматика устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) силового трансформатора.

### 8.1 Электропривод

**Электропривод** – это САУ, обеспечивающая преобразование электрической энергии в механическую работу.

Основным управляющим элементом современного электропривода является **контроллер** – микропроцессорное устройство, имеющее измерительные входы и управляющие выходы.

На рис. 8.1 приведена структурная схема электропривода с замкнутой системой управления.

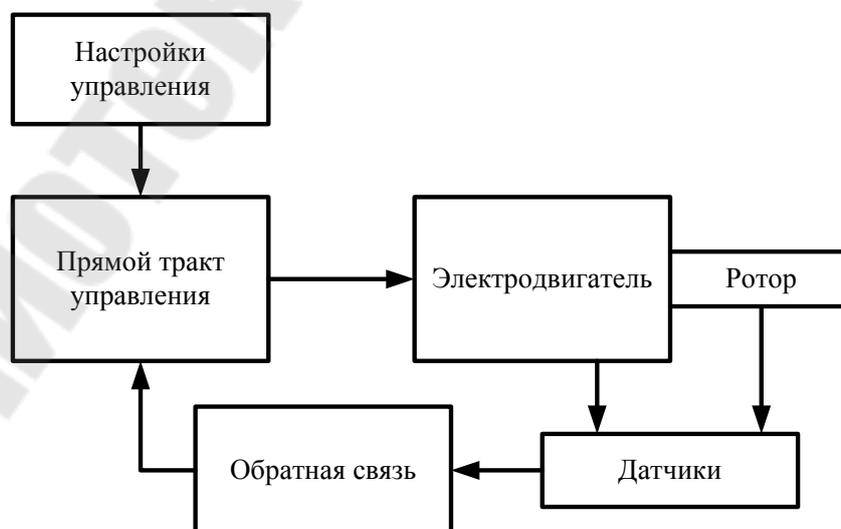


Рис. 8.1 Структурная схема электропривода

На рис. 8.2 представлена структурная схема электронной части электропривода.

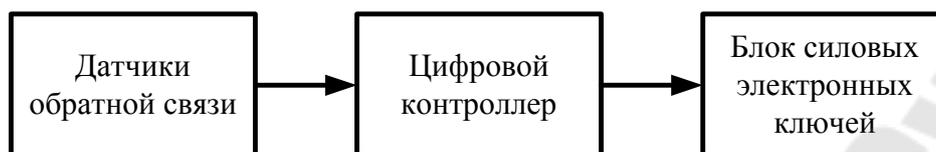


Рис. 8.2 Структурная схема электронной части электропривода

Программное обеспечение контроллера электропривода выдаёт необходимые настройки управления на прямой тракт управления, выполняемый, как правило, на основе элементов силовой электроники: транзисторов и тиристоров. На этих элементах реализуют **управляемые выпрямители** в случае двигателей постоянного тока и **силовые инверторы** в случае двигателей переменного тока.

Через прямой тракт управления на электродвигатель подаётся необходимое питание, и он запускается.

С помощью датчиков осуществляется измерение напряжений, токов, скорости вращения ротора, температуры, и других параметров. Через элементы обратной связи значения этих параметров передаются в управляющий контроллер, программное обеспечение которого корректирует работу прямого тракта управления в соответствии с требуемыми режимами работы.

Управляющий контроллер, совмещённый в одном корпусе с силовым блоком и предназначенный для управления двигателем переменного тока, называют **преобразователем частоты**. Это название обусловлено тем, что устройство формирует сигнал по принципу **широотно-импульсной модуляции (ШИМ)**, позволяющий изменять как амплитуду, так и частоту напряжения питания двигателя.

На рис. 8.3 показан внешний вид преобразователя частоты типа ПЧВ.

Иногда преобразователи частоты прикрепляют непосредственно к электродвигателям, как показано на рис. 8.4.



Рис. 8.3 Преобразователь частоты



Рис. 8.4 Преобразователи частоты на электродвигателях

Функциональные возможности современных преобразователей частоты:

- частотный или векторный алгоритмы управления;
- автоматическая адаптация к параметрам двигателя;
- автоматическая оптимизация энергопотребления;
- интерфейсы связи с компьютером и другими удалёнными устройствами;
- различные способы регулирования (пропорционально-интегральный, пропорционально-интегрально-дифференциальный, и др.);
- логическая обработка сигналов от цифровых входов по заданному алгоритму - в зависимости от результатов решения заданной логической функции встроенный программируемый логический контроллер осуществляет выполнение и контроль режимов работы двигателя: «Пуск», «Стоп», «Реверс», «Шаг», «Разгон», «Торможение», «Сброс» и др.;

- управление автоматическим повторным включением двигателя;
- управление группой двигателей;
- контроль сопротивления изоляции;
- прогрев и сушка двигателя;
- мониторинг энергопотребления;
- журнал отказов и событий.

## 8.2 Автоматика управления освещением

САУ для электрического освещения – это набор устройств, обеспечивающих требуемую силу света в заданных границах.

Структурная схема САУ для освещения приведена на рис. 8.5.

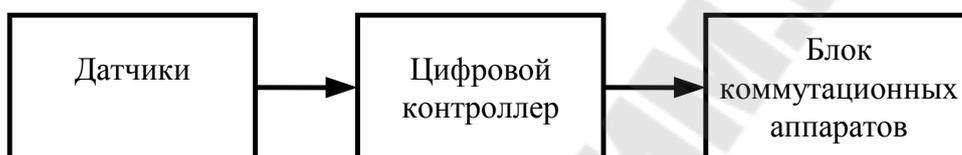


Рис. 8.5 Структурная схема автоматизации освещения

Такая САУ работает следующим образом. Датчики света и движения размещаются на требуемых участках освещаемой площади и подключаются к цифровому контроллеру, программное обеспечение которого выполняет требуемые функции регулирования, воздействуя на коммутационные аппараты, с помощью которых осуществляется включение или выключение источников света. Коммутационные аппараты могут быть встроены в цифровой контроллер или вынесены за его пределы.

Для таких источников света как лампы накаливания и светодиодные светильники возможна плавная регулировка светового потока.

На рис. 8.6 показан внешний вид контроллера для системы освещения.

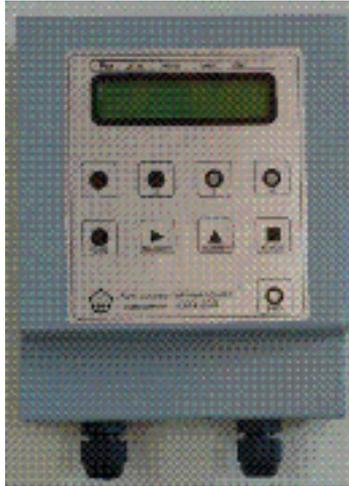


Рис. 8.6 Контроллер освещения

Функциональные возможности современных САУ для электрического освещения:

- управление освещением с нескольких мест;
- плавная регулировка яркости света;
- управление освещением в соответствии с заданным расписанием;
- управление освещением в зависимости от присутствия людей;
- управление освещением в зависимости от уровня освещённости;
- управление освещением в зависимости от даты и времени;
- логические сценарии для управления светом;
- звуковое и голосовое управление освещением.

### 8.3 Автоматика управления компенсацией реактивной мощности

САУ компенсации реактивной мощности предназначены для снижения потерь, обусловленных реактивными составляющими токов в линиях электропередачи.

Применяют плавную и ступенчатую регулировку реактивной мощности. В первом случае используют **синхронные компенсаторы**, а во втором – **батареи конденсаторов**. Второй способ, как более дешёвый, получил наибольшее распространение.

На рис. 8.7 изображена структурная схема САУ реактивной мощности.

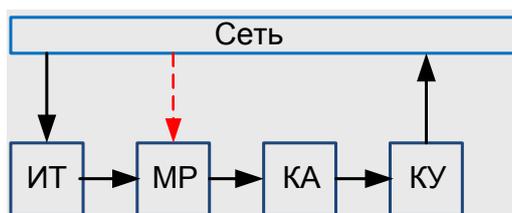


Рис. 8.7 Структурная схема автоматики реактивной мощности: ИТ – измерительные трансформаторы; МР – микропроцессорный регулятор; КА – коммутационные аппараты; КУ – компенсирующие устройства

Напряжения и токи электрической сети через измерительные трансформаторы подаются на аналоговые входы микропроцессорного регулятора, программное обеспечение которого определяет знак и значение реактивной мощности и выдаёт управляющие сигналы на коммутационные аппараты, включающие или отключающие батареи конденсаторов.

Внешний вид микропроцессорного регулятора типа MRM-12 приведен на рис. 8.8.



Рис. 8.8 Регулятор реактивной мощности MRM-12

Схема подключения этого регулятора показана на рис. 8.9.

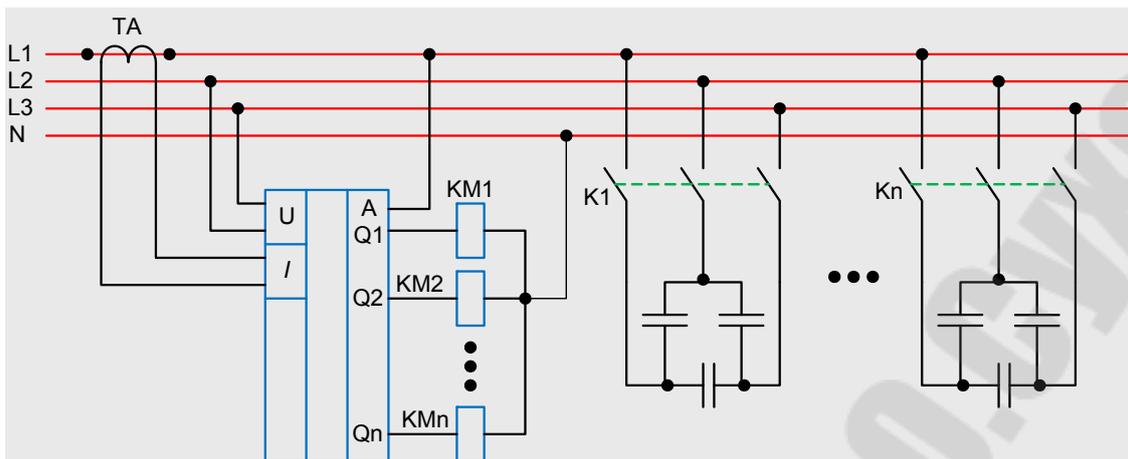


Рис. 8.9 Схема подключения регулятора MRM-12

В качестве коммутационных аппаратов в данном случае используются **магнитные пускатели**.

Регулятор контролирует время разрядки батарей конденсаторов и в первую очередь подключает разряженные секции.

Имеются следующие основные режимы работы регулятора.

Режим 1 - алгоритм быстрого приближения к требуемой степени компенсации. Растущие значения ёмкости пропорционально: 1:2:4:8.

Режим 2 - алгоритм медленного, но точного приближения к требуемой степени компенсации. Растущие значения ёмкости пропорционально: 1:2:2:2.

Режим 3 - алгоритм с контролем прироста индуктивной мощности. Растущие значения ёмкости пропорционально: 1:2:4:4:4:8.

Характеристика срабатывания регулятора MRM-12 показана на рис. 8.10.

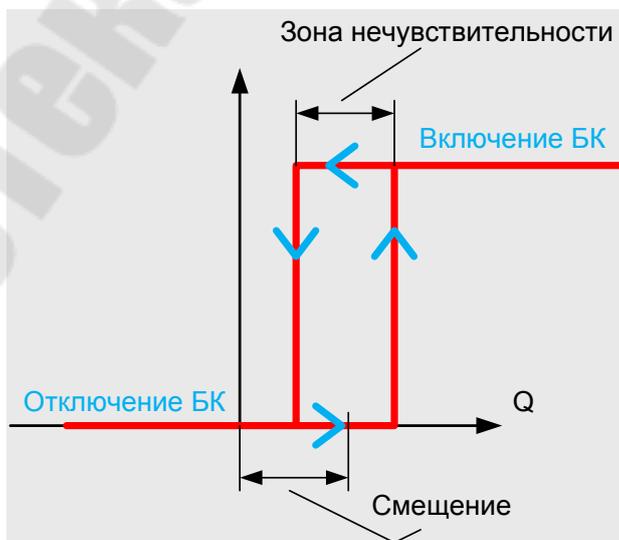


Рис. 8.10 Характеристика срабатывания регулятора MRM-12

Как и для любой САУ, характеристика срабатывания данного регулятора представляет собой прямоугольный гистерезис для предотвращения многократных коммутаций на границе срабатывания.

В качестве уставок используются: значение  $\cos \varphi$ , ширина зоны нечувствительности, смещение и время реакции.

**Ширина зоны нечувствительности** зависит от мощности наименьшей секции батарей конденсаторов, значения коэффициента трансформации трансформатора тока и напряжения питания и выбирается из соответствующих таблиц.

**Смещение** позволяет поддерживать постоянный режим перекомпенсации или недокомпенсации в зависимости от характера нагрузки.

**Время реакции** позволяет снизить влияние переходных процессов в конденсаторах на компенсацию реактивной мощности.

#### 8.4 Автоматика РПН силовых трансформаторов

Автоматическое управление устройством РПН силового трансформатора может осуществляться с помощью микропроцессорных устройств. На рис. 8.11 приведена упрощённая схема автоматики РПН, выполненной на основе блока «ТОР 200-Р» фирмы «Бреслер».

Воздействие на привод РПН силового трансформатора  $T$  осуществляется посредством команд «Повысить» и «Понизить», которые определяются положением соответствующих релейных выходов микропроцессорного блока.

Устройство обеспечивает местное или дистанционное управление РПН, а также диагностику привода регулятора. Реализовано автоматическое изменение уставок регулирования по суточному графику и календарю рабочих и выходных дней. ТОР 200-Р имеет встроенный указатель положения привода РПН и выносной цифровой индикатор для установки на двери шкафа, панели или щите. С помощью указателя положения РПН реализованы функции программного ограничения крайних положений РПН и программируемый пропуск неиспользуемых ступеней привода.

Блокирование работы регулятора осуществляется при:

- перегрузке трансформатора;
- при превышении допустимого напряжения;
- при появлении напряжения обратной последовательности;
- снижении напряжения ниже уставки;
- обнаружении замыкания на землю;
- неисправности регулятора и устройства.

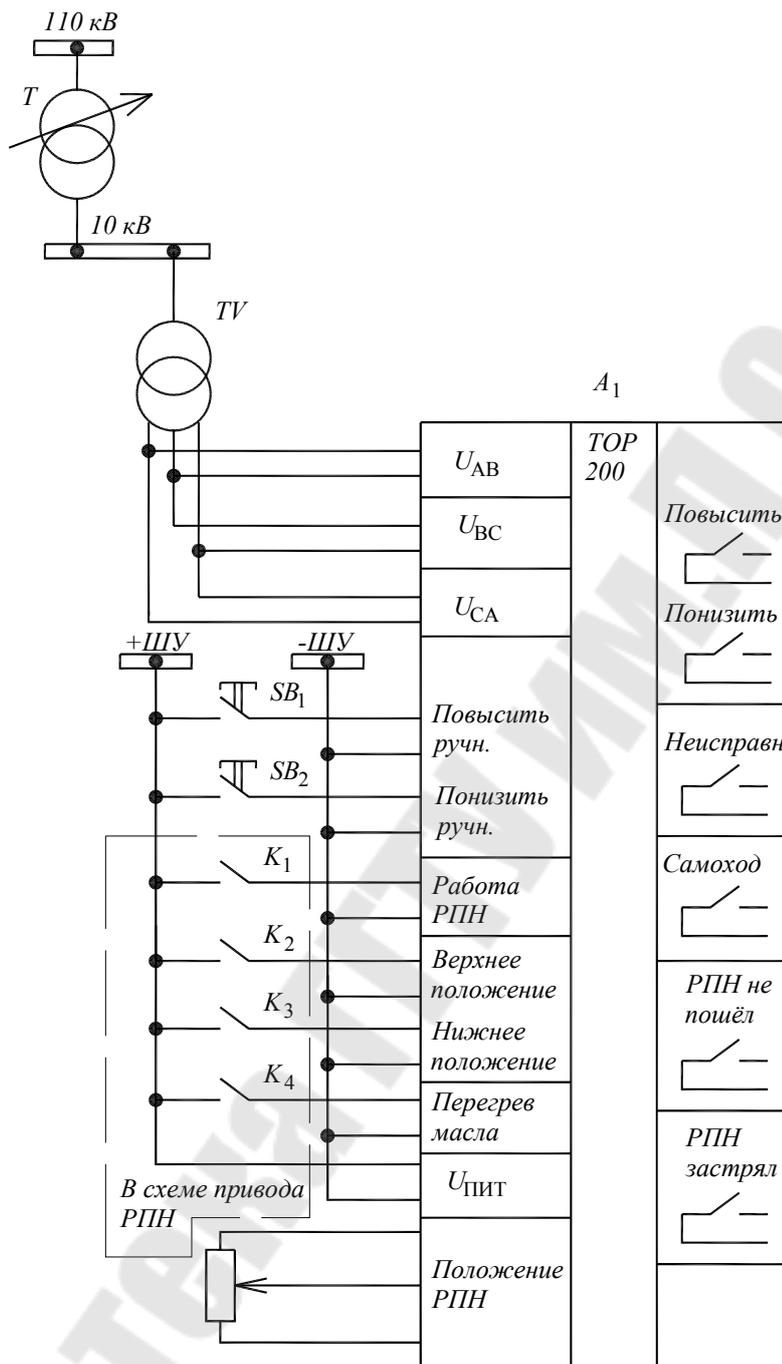


Рис. 8.11 Автоматика РПН силового трансформатора

Устройство «ТОР 200-Р» позволяет управлять РПН:

- двухобмоточного трансформатора с контролем напряжения обратной последовательности  $U_2$ ;
- трёхобмоточного трансформатора с контролем  $U_2$  и напряжения стороны СН;

- трансформатора с «расщепленной» обмоткой с автоматическим выбором плеча;
- автотрансформатора с контролем  $U_2$  и напряжения стороны НН.

Возможны следующие виды управления:

- местное (кнопками с лицевой панели терминала  $SA_1$ ,  $SA_2$  или выносными ключами) управление регулятором;
- дистанционное (через интерфейсы связи) управление регулятором;
- расчёт механического ресурса привода;
- контроль времени пуска и переключения привода с выдачей аварийного сообщения;
- контроль крайних положений привода;
- останов РПН при достижении позиций, определяемых пользователем;
- контроль превышения допустимого значения температуры масла;
- контроль самопроизвольной работы регулятора с правильным отключением привода РПН;
- индикация хода привода регулятора.

## 9 Микропроцессорные системы диагностики электрооборудования

**Диагностика** – это область знаний, включающая теорию, методы и средства для определения технического состояния оборудования. Процесс диагностики называют **диагностированием** оборудования.

Масляные трансформаторы мощностью 1000 кВА и выше в обязательном порядке оснащаются термометром с электроконтактным выходом для реализации тепловой защиты, действующей в большинстве случаев на сигнал. Термометр, как правило, устанавливают в верхней части бака трансформатора, где температура масла максимальна. В качестве уставки принимают максимально допустимую температуру масла для систематических нагрузок трансформатора, в соответствии с ГОСТ 14209-85 равную 95°С.

Современные системы РЗА трансформаторов типа SEPAM, SPACOM и т.д. позволяют осуществлять контроль значений температуры масла в верхних и нижних слоях бака масла трансформатора, а также температуры обмотки трансформатора и температуры на входах и выходах охладителей. Эти значения могут контролироваться как непосредственно с помощью термодатчиков, так и прогнозироваться косвенно на основе математических моделей.

Вначале проанализируем факторы, обуславливающие аномальные тепловые процессы в силовых трансформаторах. Одна или более частей трансформатора могут быть перегреты по трём основным причинам:

- из-за перегрузки трансформатора;
- из-за высокой загрузки трансформатора и высокой температуры воздуха;
- из-за неисправности системы охлаждения или внутренних повреждений трансформатора.

Первые два фактора относятся к полностью исправному трансформатору. В этих случаях трансформатор перегрет по естественным причинам. Третий фактор свидетельствует о том, что трансформатор перегрет не естественно, то есть аномально. Если температуры частей поврежденного или имеющего неисправности трансформатора не превышают критических значений, но выше аналогичных значений в полностью исправном трансформаторе, то имеет место его аномальный (не естественный) нагрев.

Можно выделить следующие основные причины аномального нагрева или аномального перегрева одной или более частей масляного трансформатора:

- нарушение условий охлаждения из-за перекрытия охлаждающих каналов циркулирующего масла разбухшей изоляцией или накопившимся шламом;
- межвитковые короткие замыкания или короткозамкнутые контуры в шихтованном магнитопроводе;
- повышенные диэлектрические потери твёрдой изоляции и трансформаторного масла;
- разуплотнение конструктивных элементов трансформатора и, как следствие, повышенное влияние магнитного потока рассеяния, нагревающего эти элементы.

Аномально могут быть нагреты отдельные участки трансформатора или же весь трансформатор в целом. Следовательно, необходимо различать локальный и общий аномальный нагрев трансформатора. Таким образом, можно сформулировать следующие термины для аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов.

**Естественный перегрев** - это превышение температуры одной или более частей полностью исправного силового трансформатора по сравнению с предельно допустимой температурой этих частей.

**Аномальный перегрев** - это превышение температуры одной или более частей неисправного силового трансформатора по сравнению с предельно допустимой температурой этих частей.

**Аномальный нагрев** – это более высокое значение температуры одной или более частей неисправного силового трансформатора по сравнению с температурой, которая имела бы место в полностью исправном трансформаторе при прочих равных условиях. Частным случаем аномального нагрева является аномальный перегрев трансформатора.

Классификация аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов проиллюстрирована на рис. 9.1.

Рассмотрим принципы выявления каждого из этих режимов.

Пусть  $\Theta_M$  и  $\Theta_{ННТ}$ , соответственно, непосредственно измеренные температура верхних слоёв масла трансформатора и температура обмотки, то есть температура наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора. Тогда алгоритм выявления перегрева трансформатора можно записать следующим образом:

$$R_0 = (\Theta_M \geq \theta_{M.макс}) \vee (\Theta_{ННТ} \geq \theta_{ННТ.макс}), \quad (9.1)$$

где  $R_0$  - булева функция;  $\vee$  - знак дизъюнкции (логическое ИЛИ);  $\theta_{\text{м.макс}}$ ,  $\theta_{\text{ннт.макс}}$  - максимально допустимые значения соответствующих температур.

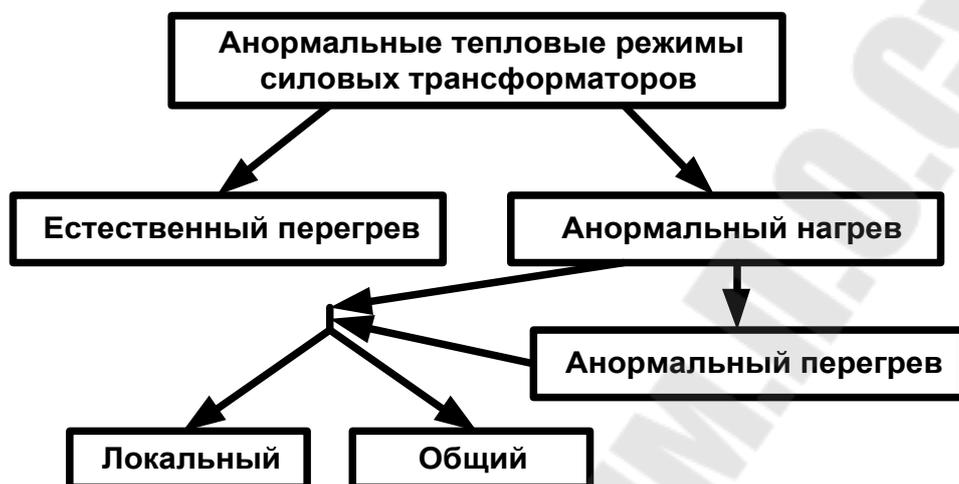


Рис. 9.1 Классификация аномальных тепловых режимов силовых трансформаторов

Булева функция  $R_0$  введена в качестве ситуационного индикатора. Если  $R_0 = 1$ , то трансформатор перегрет, в противном случае  $R_0 = 0$ .

В соответствии с алгоритмом (9.1) работают практически все существующие системы тепловой защиты трансформатора, в том числе и МПРЗ. Однако такой алгоритм не позволяет выявить тип перегрева трансформатора (естественный или аномальный) и тем более выявить аномальный нагрев трансформатора. Эту проблему можно решить, расширив программное обеспечение МПРЗ путем введения алгоритмов, функционирующих на основе математических моделей тепловых процессов масляных трансформаторов. Такие модели должны учитывать значения температуры окружающей среды, значения токов нагрузки трансформатора, количество задействованных охлаждающих устройств, паспортные данные трансформатора, и быть достаточно точными для полностью исправного трансформатора.

Пусть  $\theta_{\text{м}}$  и  $\theta_{\text{ннт}}$  - соответствующие температуры, рассчитанные по достаточно точной математической модели, имеющей максимальную абсолютную погрешность  $\Delta\theta_{\text{макс}}$ . Разность между непосредственно измеренной и рассчитанной по математической модели температурами будем называть **характеристической разностью**. Для каж-

дой из рассматриваемых температур характеристическая разность записывается в виде:

$$\Delta\theta_M = \Theta_M - \theta_M; \Delta\theta_{\text{ННТ}} = \Theta_{\text{ННТ}} - \theta_{\text{ННТ}}. \quad (9.2)$$

Характеристическая разность позволяет выявлять аномальный нагрев и перегрев трансформатора. Для этого ее необходимо сравнить со значением абсолютной погрешности математической модели  $\Delta\theta_{\text{макс}}$ . Алгоритмы выявления различных аномальных тепловых режимов масляных трансформаторов сведены в табл. 9.1. При этом по аналогии с алгоритмом (9.1) использованы булевы функции  $R_1 \dots R_4$ , а также знак дизъюнкции  $\vee$  (логическое ИЛИ), знак конъюнкции  $\wedge$  (логическое И) и знак инверсии  $\bar{X}$  (логическое отрицание).

Таблица 9.1

Алгоритмы выявления аномальных тепловых режимов силового масляного трансформатора

Тип теплового режима	Алгоритм
Общий аномальный перегрев	$R_1 = (\Delta\Theta_M \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \wedge (\Delta\Theta_{\text{ННТ}} \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \wedge R_0$
Локальный аномальный перегрев	$R_2 = (\Delta\Theta_M \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \vee (\Delta\Theta_{\text{ННТ}} \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \wedge R_0 \wedge \bar{R}_1$
Общий аномальный нагрев	$R_3 = (\Delta\Theta_M \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \wedge (\Delta\Theta_{\text{ННТ}} \geq \Delta\theta_{\text{макс}})$
Локальный аномальный нагрев	$R_4 = (\Delta\Theta_M \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \vee (\Delta\Theta_{\text{ННТ}} \geq \Delta\theta_{\text{макс}}) \wedge \bar{R}_3$

Очевидно, что понятие уставки для тепловой защиты трансформатора необходимо расширить. Можно различать фиксированные уставки, равные максимально допустимым температурам, то есть в рассматриваемом случае значениям  $\theta_{M.\text{макс}}$  и  $\theta_{\text{ННТ.макс}}$ , а также переменные уставки, получаемые расчетным путем на основе математических моделей, то есть равные значениям  $\theta_M$  и  $\theta_{\text{ННТ}}$ .

Аномальный нагрев однозначно указывает на наличие неисправности в трансформаторе и факт ее обнаружения тепловой защи-

той позволяет судить в той или иной мере о техническом состоянии трансформатора. Следовательно, такая защита обладает функциями диагностирования. В связи с этим тепловую защиту трансформатора, функционирующую в соответствии с вышеизложенными алгоритмами, следует называть диагностической тепловой защитой.

В теории диагностики при формулировке технического диагноза используют ранжирование типа «плохо», «удовлетворительно», «хорошо» и так далее. Аналогичные характеристики можно предусмотреть и для диагностической тепловой защиты. Назовем их **уровнями опасности аномального нагрева** трансформатора. Будем различать низкий, средний, высокий и очень высокий уровни опасности.

При **низком уровне опасности** вероятность возникновения аварии на трансформаторе из – за наличия режима аномального нагрева пренебрежимо мала. Поэтому в данном случае действие защиты должно быть на визуальный сигнал (зажигание сигнальной лампы или выдача соответствующего сообщения на экране компьютера), а дежурный персонал должен записать дату и время обнаружения режима аномального нагрева.

**Средний уровень опасности** показывает, что имеется некоторая вероятность возникновения аварии на трансформаторе. В данном случае действие защиты должно быть и на визуальный и на звуковой сигнал. Дежурный персонал обязан поставить в известность вышестоящее лицо. При среднем уровне опасности необходимо принять решение о внеочередном осмотре и испытании изоляции трансформатора.

При **высоком уровне опасности** возникновение аварийной ситуации на трансформаторе можно считать достаточно вероятным. Здесь, как и при среднем уровне, действие защиты должно быть и на визуальный и на звуковой сигнал. В данном случае оперативному персоналу необходимо принять решение о выводе трансформатора из эксплуатации в соответствии с ТКП. При отсутствии дежурного персонала диагностическая тепловая защита должна действовать на устройство автоматической разгрузки трансформатора, параллельно существующей защите от перегрузки, реагирующей на аварийное значение тока. Телеметрический сигнал высокого уровня опасности должен быть передан на диспетчерский пункт.

**Очень высокий уровень опасности** показывает, что вероятность возникновения аварии на трансформаторе высока. В данном случае защита должна действовать вначале на разгрузку, а затем на отключение трансформатора. При этом следует отметить, что сама по

себе разгрузка трансформатора не устраняет выявленную неисправность, например, в системе охлаждения, а лишь отодвигает срок вывода трансформатора в ремонт.

Рассмотрим методику выявления уровня опасности аномального нагрева трансформатора. Пусть  $\Delta\theta_{y.o.}$  - максимальное изменение характеристической разности, соответствующее переходу между соседними уровнями опасности режима аномального нагрева трансформатора. Очевидно, что достоверное значение величины  $\Delta\theta_{y.o.}$  может быть получено при наличии многолетнего опыта эксплуатации диагностической тепловой защиты силового трансформатора. На сегодняшний день в мировой энергетике такой опыт отсутствует. Однако теоретически можно предложить значение  $\Delta\theta_{y.o.}$ , соответствующее потере трансформатором одной ступени охлаждения, то есть  $5^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, при наличии развивающейся неисправности в трансформаторе, увеличение характеристической разности на каждые  $5^{\circ}\text{C}$  будет эквивалентно ухудшению условий охлаждения трансформатора, как в случае отключения одной ступени охлаждения.

Алгоритм выявления уровня опасности аномального нагрева трансформатора можно записать в виде:

$$L_i = (\Delta\Theta_M \geq \Delta\theta_{\text{макс}} + i \cdot \Delta\theta_{y.o.}) \vee \vee (\Delta\Theta_{\text{ННТ}} \geq \Delta\theta_{\text{макс}} + i \cdot \Delta\theta_{y.o.}) \wedge (R_1 \vee R_2 \vee R_3 \vee R_4) \quad (9.3)$$

где  $i = \{0;1;2;3\}$  - номер уровня опасности (0 – низкий; 1 – средний; 2 – высокий; 3 – очень высокий);  $L_i$  - набор булевых функций указывающих на наличие или отсутствие какого-либо из уровней опасности (наличие среднего уровня опасности и выше автоматически предполагает наличие более низких уровней, что учтено в алгоритме).

Характеристика действия диагностической тепловой защиты трансформатора показана на рис. 9.2., при этом характеристическая разность условно обозначена  $\Delta\theta$ .



Рис. 9.2. Характеристика действия диагностической тепловой защиты силового масляного трансформатора

Под **селективностью диагностической тепловой защиты**, действующей на сигнал, будем понимать свойство данной защиты однозначно указывать на тип и уровень опасности режима аномального нагрева трансформатора. Очевидно, что при такой формулировке абсолютная селективность защиты обеспечивается правильным выполнением алгоритмов (9.1), табл. 9.1, а также (9.3).

## Литература

1. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем: учебник для вузов / Н.И. Овчаренко; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
2. Овчаренко Н.И. Аппаратные и программные элементы автоматических устройств энергосистем / Н.И. Овчаренко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 512 с.
3. Лысенко Е.В. Функциональные элементы релейных устройств на интегральных микросхемах. -М.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
4. Линт Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах. -М.: Энергоатомиздат, 1990. – 144 с.
5. Новиков Ю.В. Основы микропроцессорной техники: Курс лекций. – М.: Интернет-ун-т Информ. Технологий, 2004. – 438 с.
6. Микропроцессорные системы: Учеб пособие для вузов/ Е.К. Александров, Р.И. Грушвицкий: Под общ. ред. Д.В. Пузанкова. – СПб.: Политехника, 2002. – 935 с.
7. Митюшкин, К.Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах / К.Г. Митюшкин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
8. Алексеев О.П., Козис В.Л., Кривенков В.В. и др. Автоматизация электроэнергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
9. Тутевич В.Н. Телемеханика. - М.: Высшая школа, 1985.
10. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. Пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
11. Ишкин В.Х. Волоконно-оптические системы связи. Ч.1, 2. Библиотечка электротехника. Вып.5. - М.: Энергетик, 2000.
12. Шмурьев В.Я. Цифровые реле защиты. Библиотечка электротехника. Вып. 1(4). - М.: Энергетик, 1999.
13. Пуляев В.И., Усачев Ю.В. Цифровые регистраторы аварийных событий энергосистем. Библиотечка электротехника. Вып. 6(9). - М.: Энергетик, 1999.

**Зализный Дмитрий Иванович**

**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ  
И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА  
В ЭНЕРГЕТИКЕ**

**Курс лекций  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 09.12.14.

Пер. № 114Е.  
<http://www.gstu.by>