

Министерство образования Республики Беларусь

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

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Электроснабжение»

Д. И. Зализный

ИЗМЕРЕНИЯ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ОРГАНИЗАЦИИ

ПОСОБИЕ

**для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание
энергооборудования организаций»
заочной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73
3-23

*Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 11 от 03.05.2021 г.)*

Рецензент: начальник производственной лаборатории диагностики энергооборудования и качества электроэнергии филиала Госэнергогазнадзор по Гомельской области *В. Н. Петренко*

- Зализный, Д. И.**
3-23 Измерения, измерительные приборы и комплексы в энергетическом хозяйстве организации : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» заоч. формы обучения / Д. И. Зализный. – Гомель ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 120 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://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Пособие предназначено для подготовки к экзамену по дисциплине «Измерения, измерительные приборы и комплексы в энергетическом хозяйстве организации». Рассмотрены принципы работы, разновидности и схемы подключения современных измерительных приборов для задач энергетики.

Для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» ИПКиП.

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73

Содержание

Введение.....	4
1 Принципы построения цифровых измерительных приборов	6
1.1 Общие принципы работы цифровых измерительных приборов	6
1.2 Аналого-цифровые преобразователи	7
1.3 Дискретизация и квантование аналоговых сигналов	8
1.3 Методы измерения действующих значений напряжений и токов цифровыми приборами	11
2 Интерфейсы связи	15
2.1 Классификация интерфейсов связи	15
2.2 Конструкции линий проводных интерфейсов связи	16
2.3 Принципы работы беспроводных интерфейсов связи	20
2.4 Интерфейс связи ИРПС	25
2.5 Интерфейс связи RS-232.....	27
2.6 Интерфейс связи RS-485.....	28
2.7 Интерфейс связи CAN	31
2.8 Интерфейс связи Ethernet	31
2.9 Мультимедийные интерфейсы связи	34
3 Мультиметры	36
3.1 Микроэлектронные мультиметры	36
3.2 Микропроцессорные мультиметры	40
4 Микропроцессорные измерители сопротивлений	46
4.1 Измерители малых сопротивлений	46
4.2 Измерители больших сопротивлений	49
4.3 Измерители сопротивления заземления	54
4.4 Измерители сопротивления петли «фаза-нуль»	57
5 Приборы для учёта электрической энергии	61
5.1 Общие принципы учёта электрической энергии	61
5.2 Счётчики электроэнергии	63
5.3 Построение микропроцессорных систем АСКУЭ.....	71
6 Измерители неэлектрических величин	76
6.1 Методы измерения температуры	76
6.2 Измерительные преобразователи давления	81
7 Приборы для учёта тепловой энергии	84
7.1 Алгоритмы расчёта тепловой энергии	84
7.2 Измерительные преобразователи расхода жидкости	85
7.3 Счётчики тепловой энергии	88
8 Диагностические приборы	91
8.1 Микропроцессорные вольтамперфазометры	91
8.2 Высоковольтные испытательные установки	95
8.3 Приборы для испытания коммутационных аппаратов	102
8.4 Приборы для испытания электрических машин	107
8.5 Приборы для испытания линий электропередачи	112
Список литературы	120

ВВЕДЕНИЕ

Электронное оборудование – необходимая составляющая современных систем энергоснабжения. Поэтому квалифицированный энергетик должен понимать как общие принципы функционирования электронных устройств, так и особенности применения этих устройств в системах электроснабжения и теплоснабжения.

Цель дисциплины «Измерения, измерительные приборы и комплексы в энергетическом хозяйстве организации» – научить слушателей в процессе эксплуатации систем электроснабжения и теплоснабжения грамотно применять электронные средства.

Задачами дисциплины являются:

- изучение общих принципов измерения электрических и неэлектрических величин в системах энергоснабжения;
- изучение принципов измерения электротехнических величин электронными приборами;
- изучение принципов измерения теплотехнических величин электронными приборами
- изучение принципов измерения механических величин электронными приборами;
- изучение средств дистанционной передачи информации в измерительной технике;
- изучение средств для диагностических испытаний энергооборудования.

Слушатель, освоивший данную дисциплину, должен обладать следующими компетенциями:

- знать конструкции, принцип действия, свойства, области применения и возможности основных электротехнических и электронных устройств;
- уметь определять основные параметры и характеристики электротехнических и электронных устройств;
- уметь оценивать эффективность применения электротехнических и электронных устройств;
- знать принципы и методы измерения механических, теплотехнических и электротехнических величин;
- знать методы измерения и конструкции современных измерительных приборов и преобразователей, используемых при измерении механических, теплотехнических и электротехнических величин в энергетике;

- уметь выбирать средства измерения механических, теплотехнических и электротехнических величин, исходя из условий их применения в энергетическом хозяйстве организаций;
- уметь определять виды измерительной техники для проведения диагностических испытаний энергооборудования.

В результате изучения дисциплины слушатель будет:

- знать принципы действия, конструкции, свойства измерительных преобразователей и приборов;
- знать потенциальные возможности электронных устройств и области их применения в электроэнергетических и теплоэнергетических установках;
- уметь проверять работоспособность электронных устройств;
- уметь правильно подключать электронные измерительные приборы;
- владеть методами экспериментального определения параметров и характеристик электронных устройств;
- владеть навыками эксплуатации современных измерительных приборов.

Данное пособие предназначено для подготовки к экзамену по дисциплине «Измерения, измерительные приборы и комплексы в энергетическом хозяйстве организации».

1 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1.1 Общие принципы работы цифровых измерительных приборов

Цифровой измерительный прибор – это средство измерения, отображающее результат измерений на дисплее в виде цифр, а также вспомогательных символов.

Современные цифровые измерительные приборы, как правило являются микропроцессорными и состоят из аналоговой и цифровой частей. При этом цифровая часть у них выполнена на основе **микроконтроллера** – универсальной программируемой цифровой микросхемы, содержащей микропроцессорную систему и ряд вспомогательных элементов.

Обобщённая структурная схема микропроцессорного измерительного прибора изображена на рис. 1.1.

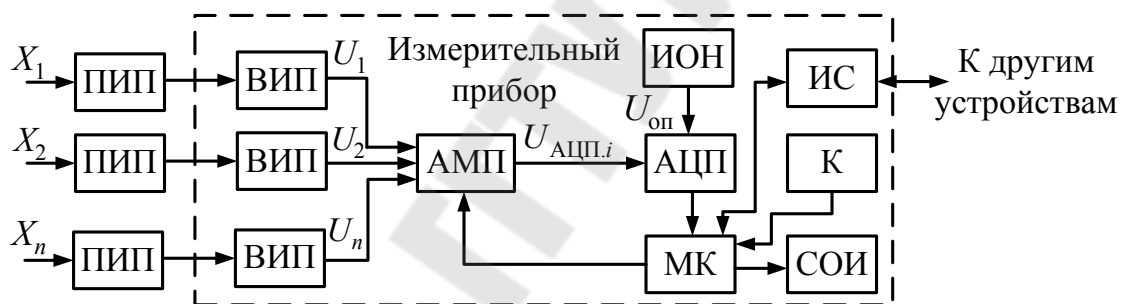


Рис. 1.1. Обобщённая структурная схема микропроцессорного измерительного прибора:

ПИП – первичный измерительный преобразователь; ВИП – вторичный измерительный преобразователь; АМП – аналоговый мультиплексор; ИОН – источник опорного напряжения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; К – кнопки управления; ИС – интерфейс связи; СОИ – средство отображения информации

Схема работает следующим образом. Измеряемые электрические или неэлектрические величины $X_1 - X_n$ поступают на входы первичных измерительных преобразователей ПИП, в качестве которых могут использоваться измерительные трансформаторы тока или напряжения, делители напряжения, шунты, а также датчики неэлектрических величин. На выходах этих преобразователей формируются напряжения или токи, по своим значениям не всегда удобные для непосредственной подачи на электронные схемы. Так номинальные на-

пряжения вторичных обмоток измерительных трансформаторов напряжения, как правило, равны 100 В, а номинальные токи вторичных обмоток измерительных трансформаторов тока составляют 5 А или 1 А. Электронные схемы в большинстве случаев работают с напряжениями до 12 В и с токами до 100 мА.

Вторичные измерительные преобразователи ВИП преобразуют сигналы с выходом ПИП таким образом, чтобы на выходах формировались напряжения U_i со значениями не более 10 В. Далее эти напряжения подаются на входы аналогового мультиплексора АМП, управляемого микроконтроллером МК и выполняющего функцию многоканального коммутатора, который подключает требуемые напряжения U_i на аналоговый вход АЦП.

В процессе работы на цифровых выходах АЦП формируется двоичный код, пропорциональный мгновенному значению текущей измеряемой величины X_i . Этот двоичный код передаётся в МК, программное обеспечение которого выполняет требуемые математические расчёты и выводит результат на дисплей.

Пользователь управляет работой прибора с помощью кнопок К, имеющихся на его лицевой панели, или с помощью внешнего компьютера, подключенного к прибору через интерфейс связи ИС.

Некоторые цифровые измерительные приборы могут содержать источник ЭДС или источник тока для питания первичных измерительных преобразователей или при измерении сопротивлений.

1.2 Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – это функциональный элемент электроники, преобразующий входное аналоговое напряжение в пропорциональный выходной двоичный код. Разрядность АЦП, как правило, равна количеству его цифровых выходов.

Условное обозначение и передаточная характеристика четырёхразрядного АЦП приведены на рис. 1.2.

Входное напряжение $U_{\text{вх}}$, изменяющееся от 0 до опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, преобразуется в выходной двоичный код $N_{\text{вых}}$, который, соответственно, изменяется от всех логических нулей до всех логических единиц.

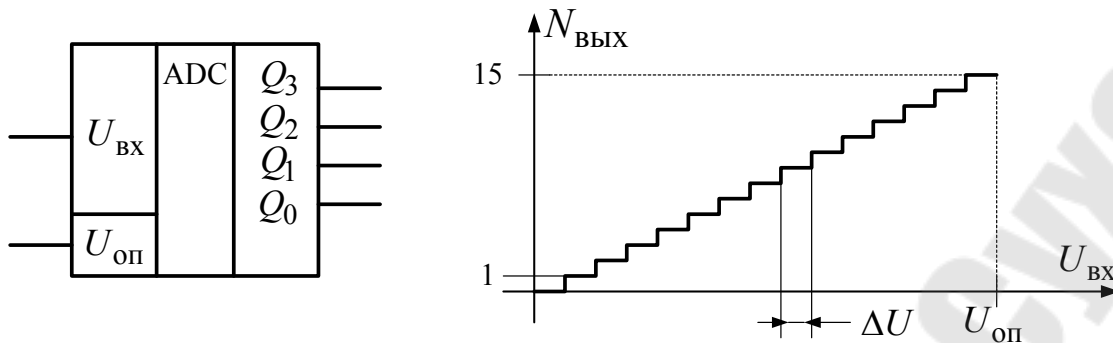


Рис. 1.2. Условное обозначение и передаточная характеристика четырехразрядного АЦП

Выходной двоичный код $N_{\text{ВЫХ}}$ в АЦП представлен цифровыми выходами Q_i . Чем выше разрядность АЦП, тем точнее представляется входное аналоговое напряжение выходным двоичным кодом. На практике применяют десятиразрядные АЦП и выше.

Двоичный код $N_{\text{ВЫХ}}$ в десятичной системе счисления рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{ВЫХ}} = \text{int} \left[\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ОП}}} \cdot (2^n - 1) \right], \quad (1.1)$$

где int – функция, выделяющая целую часть без округления; n – разрядность АЦП; $U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение; $U_{\text{ОП}}$ – опорное напряжение.

1.3 Дискретизация и квантование аналоговых сигналов

Все физические величины, как электрические, так и неэлектрические, которые измеряются электронными приборами для задач энергетики, являются аналоговыми, то есть описываются гладкими непрерывными во времени математическими функциями.

Современные измерительные приборы в большинстве случаев функционируют на основе микропроцессорной системы, которая непосредственно способна работать только с двоичными кодами, содержащимися в памяти или в портах ввода-вывода. Связь между аналоговой и цифровой частями в таких приборах осуществляется с помощью АЦП – аналого-цифровых преобразователей.

Измеряемые аналоговые величины изменяются во времени, и,

следовательно, изменяются во времени двоичные коды, формируемые АЦП. Эти процессы имеют много особенностей и характеризуются такими понятиями как дискретизация и квантование, для которых иногда используют термин «оцифровка».

Дискретизация – это процесс преобразования аналогового сигнала в последовательность мгновенных значений этого сигнала, соответствующих моментам времени t_j .

Промежуток времени $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ называется **периодом дискретизации** аналогового сигнала. Чем меньше значение периода дискретизации, тем точнее исходный аналоговый сигнал представлен в цифровой форме. Однако это значение не может быть меньше времени, требуемого АЦП для выполнения преобразования мгновенного значения напряжения в двоичный код.

Величина, обратная периоду дискретизации, называется **частотой дискретизации**:

$$f_d = \frac{1}{\Delta t}. \quad (1.2)$$

Максимальная частота дискретизации - одна из важнейших характеристик АЦП, позволяющая оценить его динамические свойства (скорость преобразования), т.е. возможность его работы с быстро меняющимися сигналами, что особенно важно для системных цифровых вольтметров. Значение f_d может выражаться числом результатов преобразования в секунду – отсчётов в секунду (*Samples Per Second – SPS*), или в герцах. Например, если сказано, что $f_d = 1$ МГц (или $f_d = 1$ MSPS), то это означает, что при изменяющемся входном напряжении АЦП в течение одной секунды может выдать один миллион различных результатов, соответствующих текущим (мгновенным) значениям входного сигнала.

Процесс дискретизации инициируется микропроцессорной системой в момент запуска АЦП на текущее преобразование.

Квантование – это процесс преобразования аналогового сигнала в ступенчатый сигнал с заданным значением ступени – квантом.

Явление квантования обусловлено конечной разрядностью АЦП. Чем меньше размер кванта, тем точнее исходный аналоговый сигнал представлен в цифровой форме. Соответственно, чем выше разрядность АЦП, тем меньше размер кванта.

Процесс дискретизации во времени первичен по отношению к процессу квантования.

На рис. 1.3 показано, как осуществляется дискретизация и квантование некоторой измеряемой аналоговой величины X .

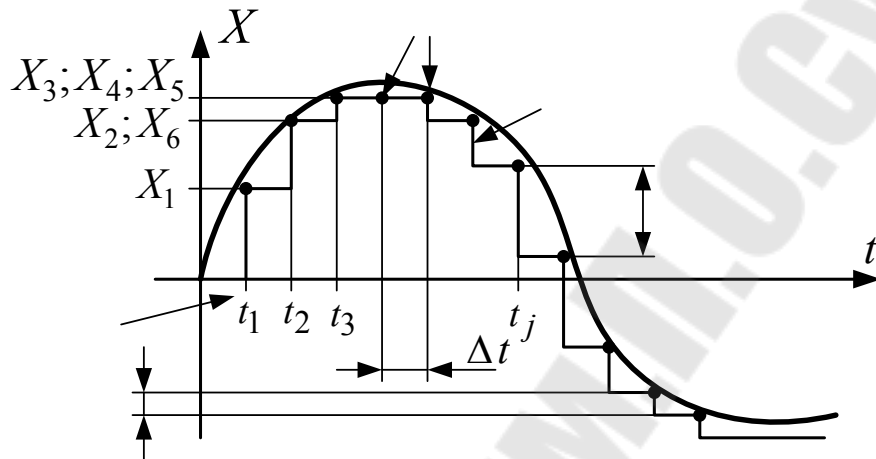


Рис. 1.3. Процессы дискретизации и квантования

В результате дискретизации и квантования формируются **отсчёты** – значения, близкие к соответствующим мгновенным значениям измеряемой величины. После преобразования в АЦП каждому отсчёту соответствует двоичный код, записываемый в память микропроцессорной системы.

Таким образом, для микропроцессорной системы изменяющийся во времени аналоговый сигнал представляется в виде последовательности двоичных кодов.

Максимально допустимое значение периода дискретизации Δt определяется **теоремой Котельникова** в соответствии с формулой:

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{1}{2 \cdot f_{\max}}, \quad (1.3)$$

где f_{\max} – максимальная частота, которую нужно учитывать в частотном спектре сигнала.

1.3 Методы измерения действующих значений напряжений и токов цифровыми приборами

Действующее (эффективное, среднеквадратическое) значение напряжения (тока) – это такое эквивалентное постоянное напряжение (ток), при котором в нагрузке выделяется та же мощность, что и при рассматриваемом переменном напряжении (токе) с рассматриваемой амплитудой.

Действующие значения напряжений и токов используются для расчёта мощностей и энергий в системах электроснабжения, то есть являются одними из важнейших параметров в энергетике.

Действующее значение измеряемой величины $x(t)$ на интервале времени от t_1 до t_2 определяется по формуле:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) \cdot dt}. \quad (1.4)$$

Для периодических сигналов интервал времени $[t_1, t_2]$ должен быть равен их периоду.

При обозначении действующего значения в современной литературе используют аббревиатуру «RMS», обозначающую «*Root Mean Squire*» – среднеквадратическое значение.

Как и в случае с измерением среднего значения, для измерения действующего значения на сегодняшний день применяют два основных метода: аппаратный и программный.

Аппаратный метод измерения действующих значений используется в микроэлектронных приборах и основан на измерении средневыпрямленного значения входного напряжения в соответствии со схемой, изображённой на рис. 1.4.

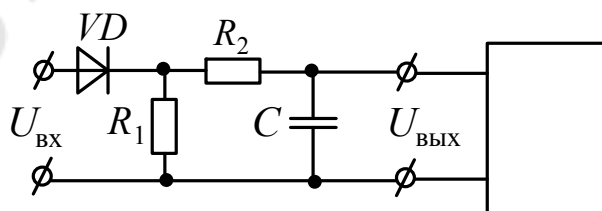


Рис. 1.4. Схема измерения средневыпрямленного значения напряжения

Схема состоит из однополупериодного выпрямителя на диоде VD , нагрузочного резистора R_1 и реально-интегрирующего звена R_2, C . Вначале входное напряжение выпрямляется, а затем из него выделяется среднее значение с помощью реально-интегрирующего звена.

Среднее значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя, равное выходному напряжению в схеме на рис. 1.4, рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ.}m} - U_{VD}}{\pi}, \quad (1.5)$$

где $U_{\text{ВХ.}m}$ – амплитудное значение входного напряжения; U_{VD} – падение напряжения на диоде VD .

Двоичный код $N_{\text{ВЫХ}}$, формируемый АЦП, пропорционален входному напряжению:

$$N_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{АЦП}} \cdot U_{\text{ВЫХ}} = k_{\text{АЦП}} \cdot \frac{U_{\text{ВХ.}m} - U_{VD}}{\pi}, \quad (1.6)$$

где $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразования АЦП.

Этот же код должен быть пропорционален действующему значению входного напряжения U_{RMS} :

$$N_{\text{ВЫХ}} = k \cdot U_{RMS}, \quad (1.7)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Из формулы (1.4) следует, что для синусоидального сигнала ($U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ.}m} \cdot \sin(\omega t)$) действующее значение напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного значения:

$$U_{RMS} = \frac{U_{\text{ВХ.}m}}{\sqrt{2}}. \quad (1.8)$$

Подставив (1.8) в (1.7), получим:

$$N_{\text{ВЫХ}} = k \cdot \frac{U_{\text{ВХ.м}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.9)$$

Сравнивая выражения (1.9) и (1.6), можно записать необходимые условия для измерения действующего значения напряжения с помощью схемы на рис. 1.4:

$$\begin{cases} k_{\text{АЦП}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}}; \\ U_{\text{ВХ.м}} \gg U_{\text{VD}}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Первое из условий (1.10) реализуется подбором требуемого значения опорного напряжения для АЦП. Второе условие выполняется при $U_{\text{ВХ.м}} > 100 \text{ В}$.

Таким образом, путём масштабирующего эффекта АЦП средневыпрямленное значение напряжения преобразуется в действующее значение.

Основное достоинство аппаратного метода измерения действующих значений – простота реализации. Этот метод применяется в большинстве современных микроэлектронных (не содержащих микропроцессорной системы) мультиметров.

Главный недостаток аппаратного метода – необходимость синусоидальной формы измеряемого сигнала. Чем больше этот сигнал отличается от синусоиды, то есть чем больше в нём высших гармонических составляющих, тем выше погрешность измерений. Также в данном методе влияние на точность оказывает падение напряжения на диоде. Если амплитудное значение входного напряжения будет менее 1 В, то из-за влияния диода погрешность измерения может превысить 100%.

Программный метод измерения действующих значений, применяемый в микропроцессорных приборах, основан на переходе от интеграла к приближённой сумме в соотношении (1.4) следующим образом:

$$\begin{aligned}
X_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) \cdot dt} \approx \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \Delta t} = \\
&= \sqrt{\frac{\Delta t}{t_2 - t_1} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}, \tag{1.11}
\end{aligned}$$

где i – номер отсчёта измеряемой величины x ; Δt – период дискретизации; n – количество отсчётов измеряемой величины, попадающее в интервал времени $[t_1, t_2]$.

Из формулы (1.11) следует, что программное обеспечение прибора должно рассчитывать среднеквадратическое значение имеющих отсчётов напряжения. При этом для периодических сигналов интервал времени $[t_1, t_2]$ должен быть равен их периоду, в противном случае расчёт будет некорректным.

2 ИНТЕРФЕЙСЫ СВЯЗИ

2.1 Классификация интерфейсов связи

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

Практически все современные микропроцессорные устройства для нужд энергетики оснащаются интерфейсными входами-выходами для подключения к компьютеру или к информационной сети.

По характеру линий связи интерфейсы связи бывают проводные и беспроводные.

Проводные интерфейсы используют различные виды сигнальных кабелей, волоконно-оптические кабели или непосредственно линии электропередачи. В энергетике применяют все эти виды линий связи.

Беспроводные интерфейсы выполняют на основе радиосвязи или инфракрасного излучения. В энергетике используют только радиосвязь.

По способу передачи бывают параллельные и последовательные интерфейсы связи.

В **параллельных интерфейсах** каждый бит двоичного кода передаётся по отдельной линии. Это повышает скорость передачи данных, но снижает дальность передачи. Параллельные интерфейсы сейчас используются только внутри приборов. Как интерфейсы связи для нужд энергетики применяются только последовательные интерфейсы.

В **последовательных интерфейсах** данные передаются по одной или нескольким линиям с разделением во времени. 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. Такие интерфейсы применяют только внутри приборов (интерфейс *SPI* в микроконтроллерах). Как интерфейсы связи для нужд энергетики на сегодняшний день используют только асинхронные интерфейсы.

В **асинхронных интерфейсах** импульсы синхронизации передаются по той же линии, что и биты данных с разделением во време-

ни. Эти интерфейсы позволяют передавать данные на значительные расстояния, поэтому применяются для обмена данными между удалёнными устройствами. К таким интерфейсам относятся *RS232*, *RS485*, *Ethernet* и другие промышленные интерфейсы для нужд энергетики.

По направлению передачи бывают симплексные, полудуплексные и дуплексные интерфейсы связи.

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.

2.2 Конструкции линий проводных интерфейсов связи

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

В качестве электрических коаксиальных сигнальных кабелей применяют кабели связи, высокочастотные кабели на основе витых пар.

Кабели связи предназначены для линий межстанционной и абонентской связи с системами передачи с временным делением каналов и импульсно-кодовой модуляцией со скоростью передачи до 2048К бит/с при напряжении дистанционного питания до 500 В постоянного тока. Внешний вид многожильного кабеля типа КСППБ показан на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Кабель связи типа КСППБ

Обозначение КСППБ расшифровывается: кабель местной связи высокочастотный с медными жилами, с полиэтиленовой изоляцией, бронированный стальной гофрированной лентой и в полиэтиленовой оболочке.

Высокочастотные кабели предназначены для обеспечения работы цифровых интерфейсов связи в частотном диапазоне до 100 МГц при рабочем переменном напряжении не более 145 В.

Внешний вид многожильного кабеля типа КСВППэ показан на рис. 2.2.

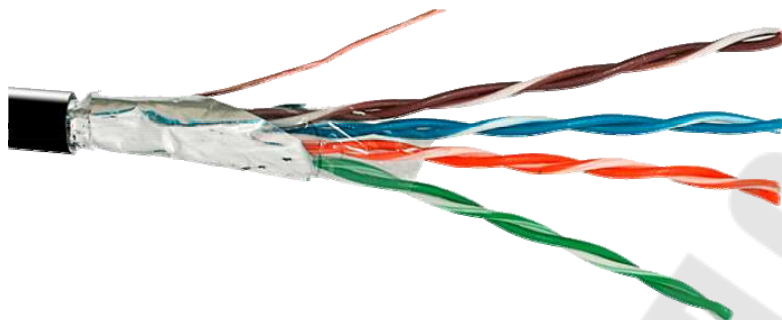


Рис. 2.2. Сигнальный кабель типа КСВППэ

Обозначение КСВППэ расшифровывается: кабель структурированный высокочастотный с полиэтиленовой изоляцией жил, с экраном из алюмополимерной ленты, в оболочке из полиэтилена.

Основным параметром высокочастотных кабелей является **волновое сопротивление**, характеризующее кабель как длинную линию. Значение этого сопротивления составляет, как правило, 50, 75 или 100 Ом.

В большинстве высокочастотных интерфейсных кабелей используют конструкции из двух свитых между собой изолированных проводников. Такая конструкция называется **витая пара**. Так кабель типа КСВППэ может иметь четыре витые пары с разным шагом свивки (рис. 2.2).

Витая пара позволяет существенно сократить уровень электромагнитной помехи, проникшей в кабель, если приёмник, к которому подключен этот кабель, имеет дифференциальный вход, то есть реагирует на разность потенциалов. Такая система работает следующим образом. В каждой полувитке витой пары индуцируется ЭДС помехи $E_{\text{п}}$ от внешнего поля помехи (рис. 2.3). Эти ЭДС складываются с ЭДС передаваемых по линии сигналов U_1 и U_2 . На стороне приёмника дифференциальный усилитель реагирует на разность потенциалов:

$$\Delta U = U_1 + E_{\text{п}} - (U_2 + E_{\text{п}}) = U_1 - U_2. \quad (2.1)$$

Таким образом, ЭДС помехи вычитается на входе приёмника.

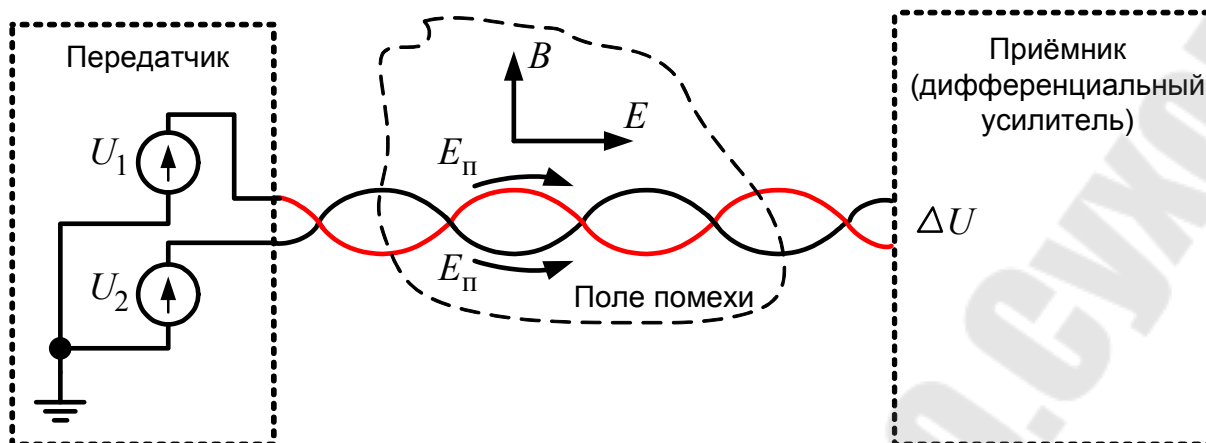


Рис. 2.3. Наведение ЭДС помехи в витой паре

Витые пары позволяют передавать данные со скоростью до 1000 МБит/с. Дальность передачи на низких скоростях – до 2000 м.

Несмотря на существенную компенсацию электромагнитных помех в витых парах и наличие электромагнитных экранов, проводниковые интерфейсные кабели, тем не менее, чувствительны к помехам. Это их основной недостаток.

Более совершенным средством для передачи данных посредством проводных интерфейсов по сравнению с проводниковыми кабелями являются **волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)**.

Оптическое волокно – это гибкая тонкая нить на основе кварцевого неорганического или органического стекла с особыми параметрами прозрачности и оптического преломления, покрытая специальным отражающим слоем.

Принцип передачи сигнала через оптическое волокно продемонстрирован на рис. 2.4.

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 несколько 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.

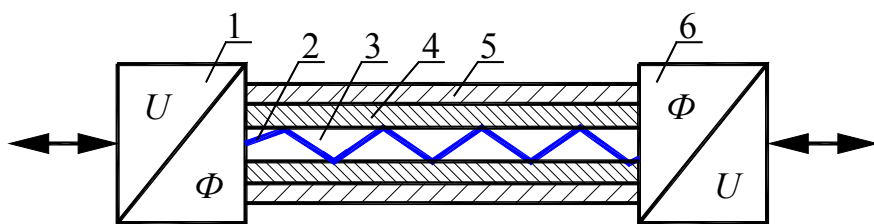


Рис. 2.4. Система передачи сигнала через оптическое волокно:
 1 – преобразователь «напряжение – лазерный луч»; 2 – лазерный луч; 3 – проводящий слой; 4 – отражающий слой; 5 – защитное покрытие; 6 – преобразователь «лазерный луч – напряжение»

В конце линии луч попадает на фотоприёмник 6, преобразующий оптическое излучение в напряжение. Такое оптическое волокно называется **одномодовым**. Скорость передачи данных может достигать 2,5Г Бит/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**.

Для монтажа информационных сетей на основе оптических волокон используются волоконно-оптические кабели, оптические муфты, ответвители, усилители и другие устройства.

Один из вариантов конструкции волоконно-оптического кабеля показан на рис. 2.5.

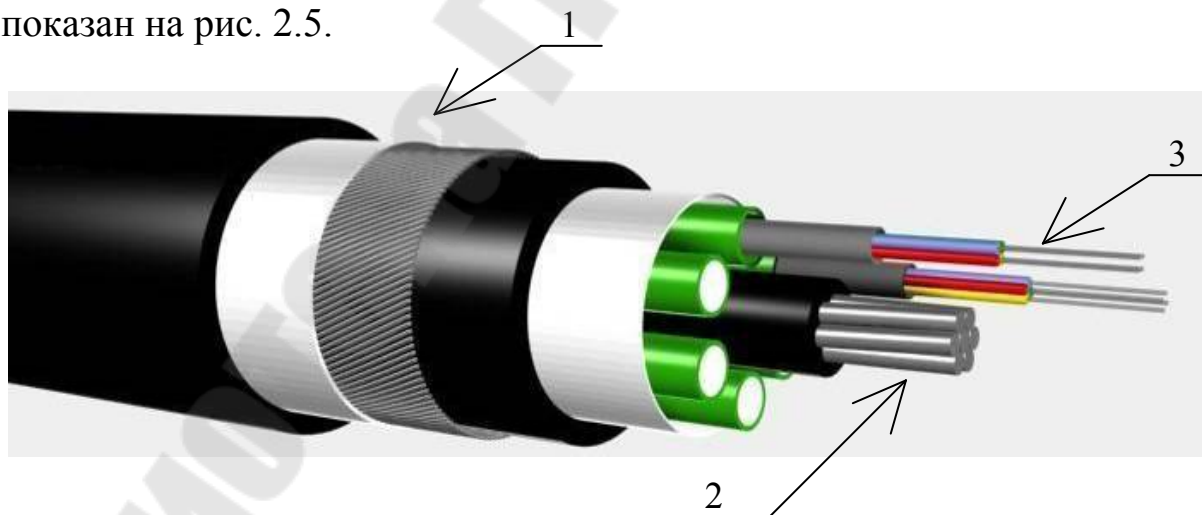


Рис. 2.5. Конструкция волоконно-оптического кабеля:

1 – защитные оболочки; 2 – центральный силовой элемент; 3 – оптические волокна

Кабель состоит из различных защитных оболочек 1, центральной стальной жилы 2 и оптических волокон 3. Стальная жила предназначена для несения механической нагрузки, защитные оболочки изо-

лируют волокна от окружающей среды. Количество оптических волокон в кабеле может достигать нескольких десятков.

Главное достоинство ВОЛС – крайне слабое взаимодействие лазерных лучей в оптических волокнах с внешними электромагнитными помехами. Поэтому на сегодняшний день ВОЛС – это наиболее скоростные и помехоустойчивые из всех видов линий связи. Их основной недостаток – высокая стоимость. Тем не менее, ВОЛС являются основными линиями связи для организации технологии «Цифровая подстанция», а также для обеспечения работы информационной сети в современных диспетчерских пунктах.

2.3 Принципы работы беспроводных интерфейсов связи

Из беспроводных интерфейсов связи в энергетике применяется радиосвязь трёх типов: радиорелейная связь, сотовая радиосвязь и спутниковая радиосвязь.

Обязательными аппаратными средствами при всех видах радиосвязи являются приёмо-передающие антенны и **радиомодемы** – устройства, осуществляющие модуляцию и демодуляцию радиосигналов (рис. 2.6).

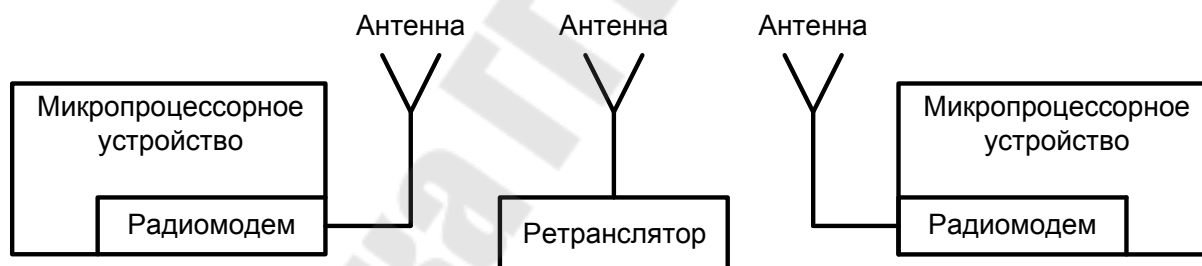


Рис. 2.6. Система радиосвязи

Передаваемый сигнал модулирует, то есть изменяет параметры высокочастотного сигнала синусоидальной формы, который называют несущим. Чаще всего используют частотную или фазовую модуляции несущего сигнала.

Принцип **частотной модуляции** при цифровой связи (путём передачи логических нулей и единиц) можно записать в виде формулы:

$$U(t) = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (f_H \pm \Delta f) \cdot t), \quad \Delta f \ll f_H, \quad (2.2)$$

где f_H – частота несущего сигнала; Δf – девиация, то есть изменение частоты при передаче логических нулей и единиц.

Частотная модуляция условно изображена на рис. 2.7.

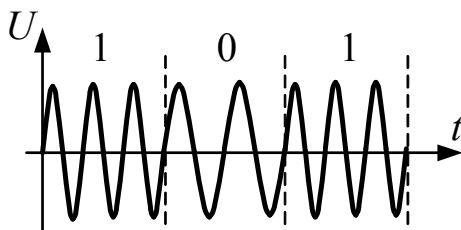


Рис. 2.7. Частотная модуляция сигнала

В зависимости от значения f_H существуют различные диапазоны радиосвязи (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Диапазоны радиосвязи

f_H	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 устанавливают **ретрансляторы** – приёмопередающие антенны, монтируемые на мачтах требуемой высоты (рис. 2.6, 2.8).

Радиорелейная связь применяется для организации элементов системы телемеханики в электрических сетях. Скорость передачи данных может достигать 1М Бит/с. Дальность передачи – до 1000 км.

Основной недостаток радиорелейной связи – необходимость сооружать систему ретрансляторов для организации новых каналов связи.

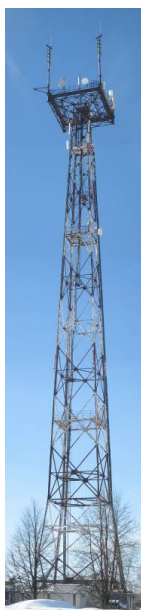


Рис. 2.8. Ретранслятор для радиорелейной связи

Диапазон ВЧ используется в **сотовой связи**, являющейся усовершенствованной радиорелейной связью. При этом виде связи устанавливается разветвлённая сеть из ретрансляторов, условные границы между которыми образуют на ровном рельефе правильные шестиугольники, напоминающие пчелиные соты (рис. 2.9, а).

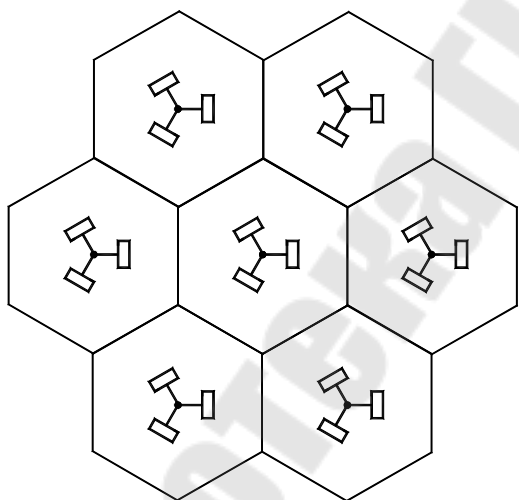


Рис. 2.9. Система сотовой связи:

а – расположение ретрансляторов; б – внешний вид базовой станции

Для нужд отечественной энергетики на сегодняшний день применяется основной стандарт сотовой связи типа *GSM (Global System for Mobile communications* – глобальная система мобильной связи) в

совокупности с подстандартом *GPRS* (*General Packet Radio Service* – пакетная радиосвязь общего пользования).

В стандарте *GSM+GPRS* данные от разных абонентов передаются пакетами с разделением этих пакетов во времени при частоте несущего сигнала от 890 до 960 МГц. Скорость передачи данных может достигать до 80К Бит/с. Стандарт *GSM+GPRS* поддерживает не только голосовую связь для сотовых телефонов, но и передачу данных для промышленных устройств, в том числе, для устройств сферы энергетики.

В промышленных устройствах, работающих с сотовой связью, как и в мобильных телефонах, требуется установка *SIM*-карты (*Subscriber Identification Module* – модуль идентификации абонента), на которой записан номер абонента.

Структурная схема сотовой связи для стандарта *GSM+GPRS* приведена на рис. 2.10.

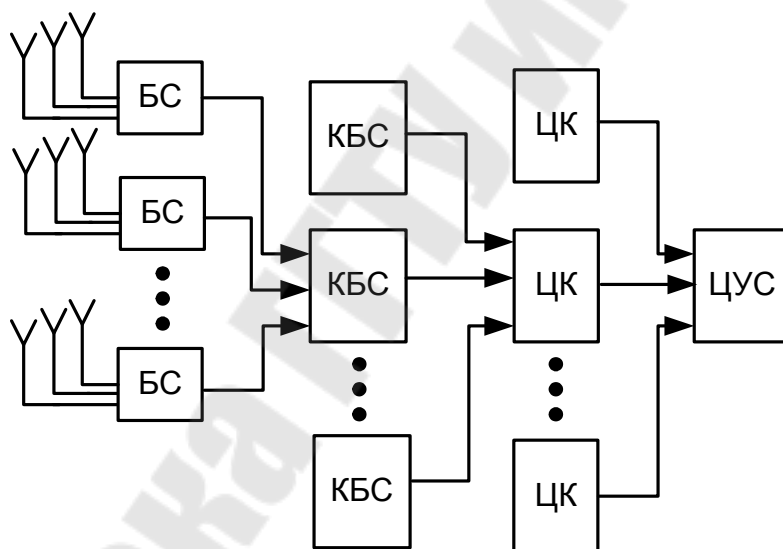


Рис. 2.10. Структурная схема сотовой системы связи:

БС – базовая станция; КБС – контроллер базовых станций; ЦК – центр коммутаций;
ЦУС – центр управления сотовой связью

В центре каждой соты находится базовая станция БС – ретранслятор с тремя блоками антенн направленного действия, расположенными под углом 120° (рис. 2.9). Сигналы от каждой базовой станции с помощью отдельных антенн радиорелейной связи передаются на контроллеры базовых станций КБС, выполняющие функции сетевых концентраторов. Далее с помощью радиорелейной связи или волоконно-оптических линий связи осуществляется передача информации

на более высокие уровни информационной сети – к центрам коммутаций ЦК и центру управления сотовой связью ЦУС, где происходит окончательная обработка данных, которыми обмениваются абоненты.

Стандарт *GSM+GPRS* относится к поколению 2,5G. Перспективным для задач энергетики является применение современных скоростных широкополосных систем сотовой связи поколений 4G и 5G.

Основное достоинство сотовой связи – её широкое распространение и, соответственно, отсутствие необходимости сооружения дополнительных ретрансляторов для увеличения дальности передачи. Недостатками применения сотовой связи в энергетике являются зависимость скорости обмена данными от уровня загрузки сети, а также необходимость выполнять условия договора с сотовым оператором.

На сегодняшний день в энергосистеме Республики Беларусь сотовая связь применяется в системах АСКУЭ (автоматических системах контроля и учёта электроэнергии), а также для дистанционного управления некоторыми устройствами, такими как реклоузеры.

Спутниковая связь использует диапазон СВЧ (табл. 2.1) и применяется для коммутации современных систем релейной защиты, автоматики и телемеханики с системами глобального позиционирования *GPS* (*Global Positioning System* — система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система).

Системы *GPS* и ГЛОНАСС на основе сигналов, передаваемых геостационарными орбитальными спутниками на землю, позволяют определять точные координаты объектов энергетики, а также получать сигналы точного времени, необходимые для синхронизации различных устройств, работающих в единой информационной сети.

Аппаратно-программные комплексы, применяющиеся для нужд энергетики и использующие системы *GPS* и ГЛОНАСС, называются геоинформационными системами.

Главное достоинство применения радиосвязи для задач энергетики заключается в отсутствии необходимости сооружения проводных линий связи, что существенно удешевляет организацию информационной сети. Вместе с тем, радиосвязь имеет и существенный недостаток – значительную чувствительность к электромагнитным помехам. В современных радиоинтерфейсах, как в радиорелейной связи, так и в сотовой радиосвязи применяется помехозащищённое кодирование данных, значительно снижающее вероятность сбоев при обмене

данными. Однако радиointерфейсы пока ещё уступают в помехозащищённости проводным интерфейсам связи.

2.4 Интерфейс связи ИРПС

В системах РЗА, телемеханики и АСКУЭ крайне важной является задача передачи измеренных величин на некоторое расстояние. Один из способов – использование интерфейса связи типа «токовая петля», или ИРПС – интерфейс радиальный последовательный.

Бывают аналоговый и импульсный ИРПС.

Аналоговый ИРПС применяется в измерительных преобразователях с унифицированным токовым выходом, то есть выходом таких устройств является источник постоянного тока с номинальным значением 5мА или 20 мА. Этот выход называют телеметрическим. Схема соединения устройств посредством аналогового ИРПС приведена на рис. 2.11.

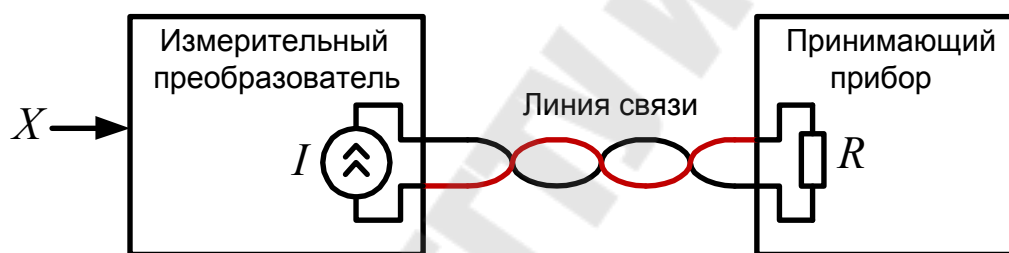


Рис. 2.11. Функциональная схема интерфейса связи ИРПС

Измеряемая электрическая или неэлектрическая величина X преобразуется в пропорциональный ток I в соответствии с формулой:

$$I = A \cdot X + B, \quad (2.3)$$

где: A , B – масштабирующие коэффициенты.

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

В системах РЗА и телемеханики применяют измерительные преобразователи напряжения, тока, частоты, мощности, температуры и других величин. На рис. 2.12 показан внешний вид измерительного преобразователя Е848М/1.



Рис. 2.12. Измерительный преобразователь E848M/1

E848M/1 – это измерительный преобразователь активной мощности трёхфазного тока. Он подключается к трёхфазной сети со стороны вторичных обмоток измерительных трансформаторов с номинальными параметрами 100 В и 5 А по методу трёх ваттметров. В результате формируется выходной постоянный ток в соответствии с формулой:

$$I = 5,77 \cdot 10^{-3} \cdot (U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C). \quad (2.4)$$

В импульсном ИРПС по линии связи передаются импульсы тока, период следования которых пропорционален измеряемой величине (рис. 2.13).

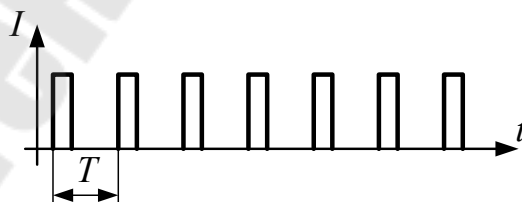


Рис. 2.13. Сигнал импульсного ИРПС

В основном импульсный ИРПС используют в счётчиках электроэнергии для их объединения в простейшую систему АСКУЭ. Импульсными выходами оснащено подавляющее большинство отечественных микропроцессорных счётчиков электроэнергии.

2.5 Интерфейс связи RS-232

RS-232 – это дуплексный асинхронный последовательный интерфейс связи, предназначенный для обмена данными микропроцессорных устройств с компьютером через *COM*-порт. Максимальная скорость обмена данными составляет 125000 бит/с, дальность передачи – до 200 м (при минимальных скоростях обмена).

Наиболее распространённая схема соединений *RS-232* и стандартный разъём показаны на рис. 2.14.

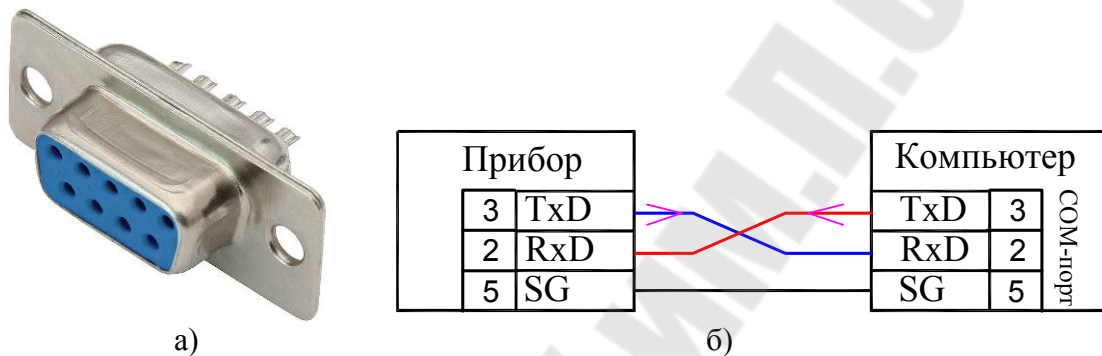


Рис. 2.14. Соединения в интерфейсе *RS-232*:
а – стандартный разъём; б – схема соединений

На рис. 2.14, б *TxD* – это выход данных; *RxD* – вход данных; *SG* – общий провод.

Сигналы *RS-232* имеют следующие уровни: +12 В – логический ноль; -12 В – логическая единица. Передаваемые логические уровни включают биты данных и биты синхронизации. На рис. 2.15 приведена диаграмма одного кадра, то есть элементарного пакета данных *RS-232*.

Обмен данными оба устройства должны вести с одинаковой частотой. Начало приёма или передачи данных соответствует моменту появления старт-бита. Затем передаются 8 бит данных и стоп-биты. Таким образом осуществляется синхронизация обмена данными.

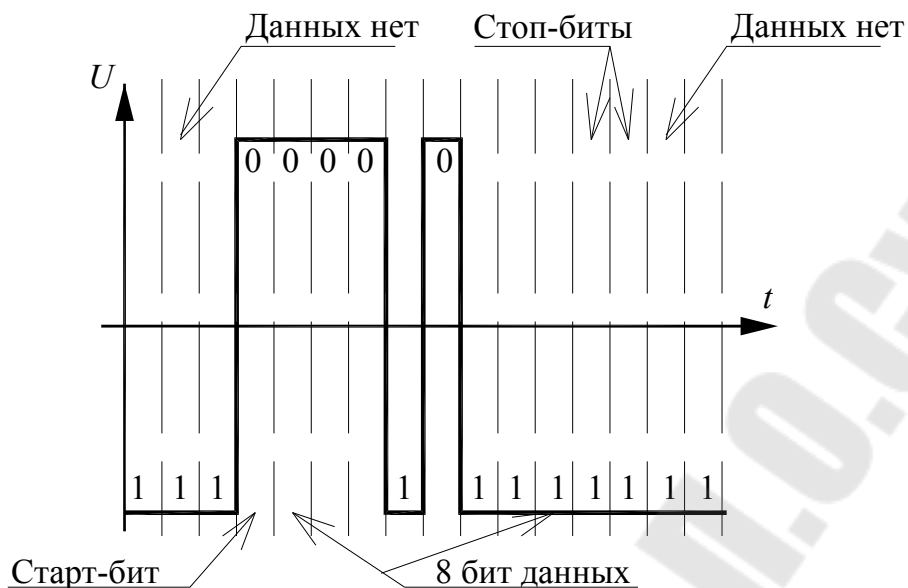


Рис. 2.15. Диаграмма работы интерфейса RS-232

RS-232 – это профессиональный помехоустойчивый интерфейс связи, применяемый в энергетике для стационарного или временного соединения различных устройств с компьютером.

2.6 Интерфейс связи RS-485

RS-485 – 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 10 Мбит/с, дальность передачи – до 1200 м (при минимальных скоростях обмена).

Для симплексного или полудуплексного обмена данными по интерфейсу RS-485 требуется только одна витая пара. Схема соединений RS-485 показана на рис. 2.16.

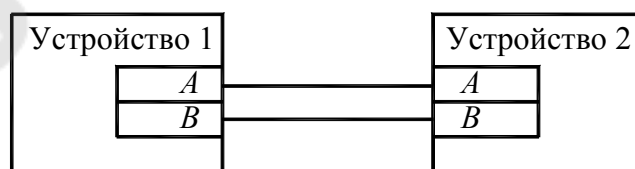


Рис. 2.16. Схема соединений RS-485

Интерфейс RS-485 имеет две линии *A* и *B*. По ним передаются одни и те же данные, но в инверсной форме один по отношению к другому. На рис. 2.17 приведены диаграммы работы RS-485.

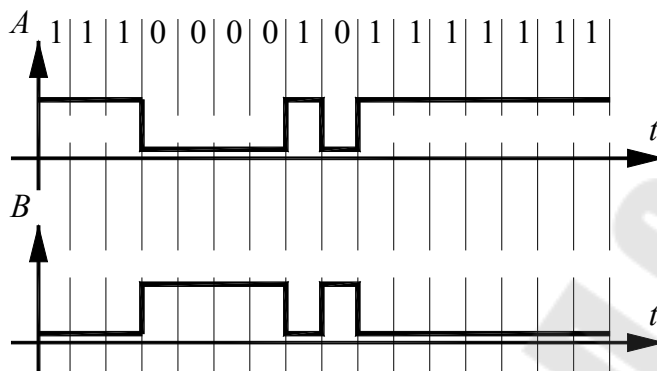


Рис. 2.17. Диаграммы работы RS-485

Приёмное устройство определяет разность потенциалов между линиями *A* и *B*. 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 RS-485 позволяет объединять устройства в магистральную сеть, как показано на рис. 2.18.

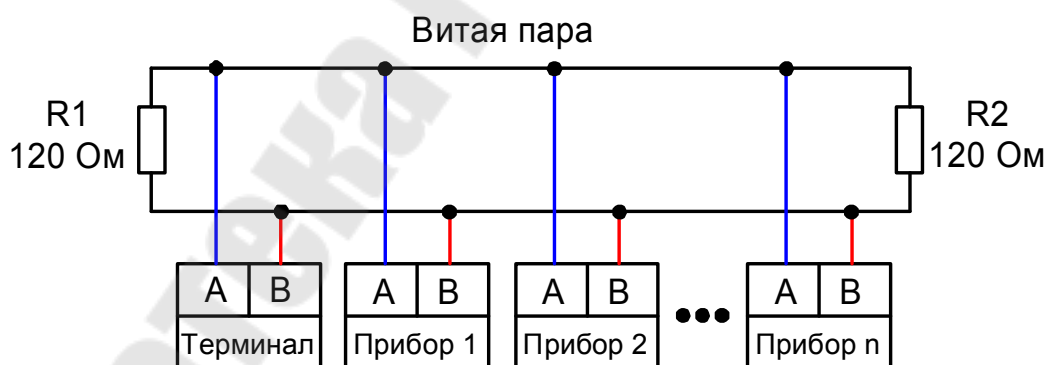


Рис. 2.18. Объединение приборов в магистральную сеть RS-485

Общая магистраль реализуется посредством витой пары, к концам которой для дополнительной защиты от помех и согласования с волновым сопротивлением линии подключают так называемые терминальные резисторы сопротивлением около 120 Ом.

Все устройства магистральной сети 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. Так реализуется полудуплексный обмен данными в сети.

Монтируется магистральная сеть с помощью специальных переходников-разветвителей, устанавливаемых в каждом узле сети.

Обмен данными между устройствами осуществляется в определённой последовательности, которая называется **протоколом**.

Для промышленных устройств, как правило, используют протокол *MODBUS RTU*. Формат кадра в этом протоколе включает участки двоичного кода, соответствующие необходимым действиям (рис. 2.19).

Адрес устройства (1 байт)	Код операции (1 байт)	Данные (0...255 байт)	Контрольная сумма (1 байт)
------------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------------

Рис. 2.19. Формат кадра протокола *MODBUS RTU*

Вначале терминальное (ведущее) устройство транслирует в линию 8 бит адреса устройства-получателя, затем 8 бит кода операции, сообщающие устройству-получателю необходимую команду или тип передачи. После этого могут передаваться дополнительные данные, содержащие, например, значения величин для настройки устройства-получателя или диапазон адресов памяти для чтения данных. В конце передаётся 8 бит контрольной суммы всех переданных данных для проверки отсутствия потери этих данных в процессе передачи. По окончании передачи терминальное устройство переходит в режим приёма. После этого, то устройство, чей адрес был передан в линию, переходит в режим передатчика и транслирует в линию те данные, которые были запрошены терминальным устройством в соответствии с тем же форматом кадра (рис. 2.19).

Интерфейс *RS-485* в совокупности с протоколом *MODBUS RTU* применяется в системах РЗА, АСКУЭ, в телемеханике и диспетчерских пунктах.

2.7 Интерфейс связи CAN

CAN (*Controller Area Network* — сеть контроллеров) – это усовершенствованный интерфейс *RS-485*, предназначенный для обмена данными в магистральной информационной сети по проводным витым парам или по волоконно-оптическим кабелям. Схемы подключения *CAN* такие же, как в *RS-485* (рис. 2.17 и 2.18). Основное отличие интерфейса *CAN* от интерфейса *RS-485* заключается в установке приоритета логических нулей (доминантные биты) над логическими единицами (рецессивные биты) и усложнённом формате кадра.

В интерфейсе *CAN* есть четыре вида кадров обмена данными:

- кадр данных;
- кадр удалённого запроса;
- кадр перегрузки;
- кадр ошибки.

Простейшая форма кадра данных показана на рис. 2.20.



Рис. 2.20. Формат кадра данных интерфейса CAN

Интерфейс *CAN* позволяет передавать данные на 40 м при скорости обмена 1 Мбит/с и на 5000 м при скорости 10 Кбит/с.

Исторически этот интерфейс применялся в автомобильной технике. В последние годы его используют и для задач энергетики как альтернативу интерфейсу *RS-485*.

2.8 Интерфейс связи Ethernet

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

Ethernet представляет собой усовершенствованный интерфейс RS-485 и использует передачу данных по витым парам или по волоконно-оптическим линиям связи. Основные разновидности и характеристики интерфейса *Ethernet* приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2
Разновидности и характеристики интерфейса *Ethernet*

Тип <i>Ethernet</i>	Скорость передачи	Линия связи	Длина одного сегмента
10BASE-T	10 Мбит/с	2 витые пары	до 100 м
10BASE-F	10 Мбит/с	одномодовое оптоволокно	до 2 км
100BASE-T (Fast Ethernet)	100 Мбит/с	2 витые пары	100 м
100BASE-FX (Fast Ethernet)	100 Мбит/с	одномодовое оптоволокно	до 10 км
1000BASE-T (Gigabit Ethernet)	1 Гбит/с	4 витые пары	100 м
1000BASE-LX (Gigabit Ethernet)	1 Гбит/с	одномодовое оптоволокно	до 5 км

Для задач энергетики используют, в основном, стандарты 10BASE и 100BASE.

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 информационной сети.

Концентраторы *Ethernet* бывают следующих видов: маршрутизаторы, коммутаторы и повторители.

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

Коммутатор (switch) – это концентратор, выполняющий функции многопозиционного переключателя для формирования радиальных участков сети.

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

На рис. 2.21 показана схема сети *Ethernet* типа «звезда».

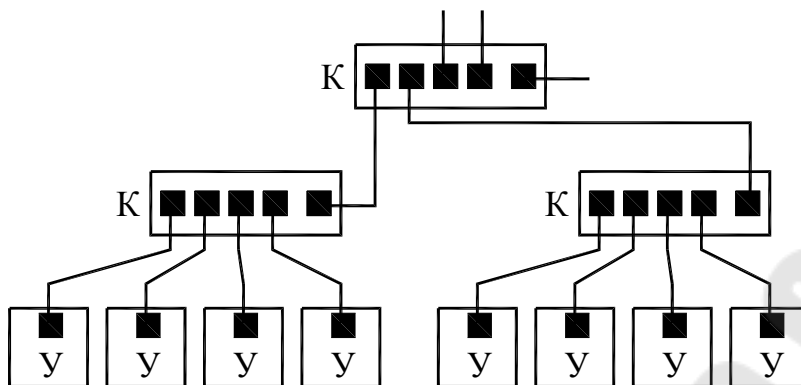


Рис. 2.21. Топология сети типа «звезда»:
У – микропроцессорные устройства; К - концентраторы

Для соединений в *Ethernet* применяют специальные разъёмы на 8 контактов (рис. 2.22).



Рис. 2.22. Разъёмы *Ethernet*:
а – розетка; б – вилка

Схема соединений для стандартов *10BASE-T* и *100BASE-T* (две витые пары) по «прямому» кабелю при соединении устройства с концентратором приведена на рис. 2.23, а. При соединении устройств или концентраторов между собой используется «перекрёстный» кабель (*crossover*), как показано на рис. 2.23, б.

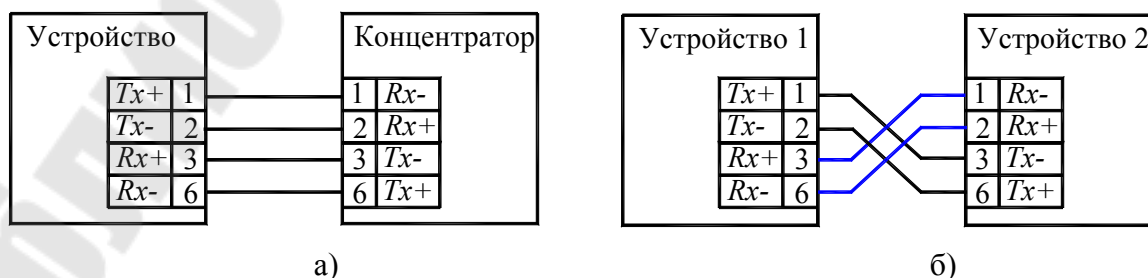


Рис. 2.23. Схемы соединений для интерфейса *Ethernet*:
а – «прямой» кабель; б – «перекрёстный» кабель

В процессе обмена данными каждое устройство имеет свой двоичный код адреса – *MAC (Media Access Control address)*. Обмен данными происходит пакетами (*frame*) двоичных кодов. Упрощённая форма кадра *Ethernet* приведена на рис. 2.24.

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

Рис. 2.24. 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.

Наиболее распространённым протоколом *Ethernet* является *TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)*, позволяющий осуществлять коммутацию с сетью Интернет. В этом случае в составе байт данных передаются двоичные коды маски подсети и *IP*-адрес устройства в подсети. В конце кадра 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.

Ethernet является основным интерфейсом связи при организации технологии «Цифровая подстанция». Также его используют в современных системах РЗА, АСКУЭ и телемеханики.

2.9 Мультимедийные интерфейсы связи

К мультимедийным интерфейсам связи относятся все коммуникационные интерфейсы, обеспечивающие высокоскоростной обмен данными между компьютерами, смартфонами и другими устройствами преимущественно бытового назначения. Такими интерфейсами, в первую очередь, являются: *USB, Gigabit Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth*, а

также все стандарты широкополосной сотовой связи типа *UMTS* или *LTE*.

До недавнего времени мультимедийные интерфейсы практически не использовались для задач энергетики, так как были недостаточно надёжны и слишком сложны для промышленных приборов. Однако в последние годы наметилась тенденция применения этих интерфейсов из-за повсеместного внедрения компьютерной техники и широкого распространения смартфонов.

Большинство современных компьютеров уже не имеют *COM*-порта, поэтому применение интерфейса *RS-232* вызывает затруднения. Сейчас значительно удобнее подключиться к прибору через интерфейсы *USB* или *Bluetooth*. Сам же прибор можно не оснащать дисплеем, а в качестве дисплея использовать смартфон.

Вместе с тем, главными недостатками мультимедийных интерфейсов связи являются сложность их программных драйверов, что приводит к значительной загрузке программного обеспечения прибора, а также повышенная вероятность несанкционированного доступа из-за универсальности протоколов обмена данными. Таким образом, для длительной стационарной работы на объектах энергетики мультимедийные интерфейсы пока ещё не могут быть рекомендованы.

3 МУЛЬТИМЕТРЫ

Мультиметр – это измерительный прибор, осуществляющий измерение трёх и более величин. В большинстве случаев к этим величинам относятся напряжение ток и сопротивление. Однако существуют и специальные мультиметры, не выполняющие, например, измерение сопротивления.

Для нужд энергетики используют два вида мультиметров: микроэлектронные и микропроцессорные. Первые не содержат микропроцессорной системы, а вторые функционируют на основе микроконтроллера. Эта разница влияет, в первую очередь, на точность измерения переменных напряжений и токов.

3.1 Микроэлектронные мультиметры

Обобщённая структурная схема микроэлектронного мультиметра показана на рис. 3.1.

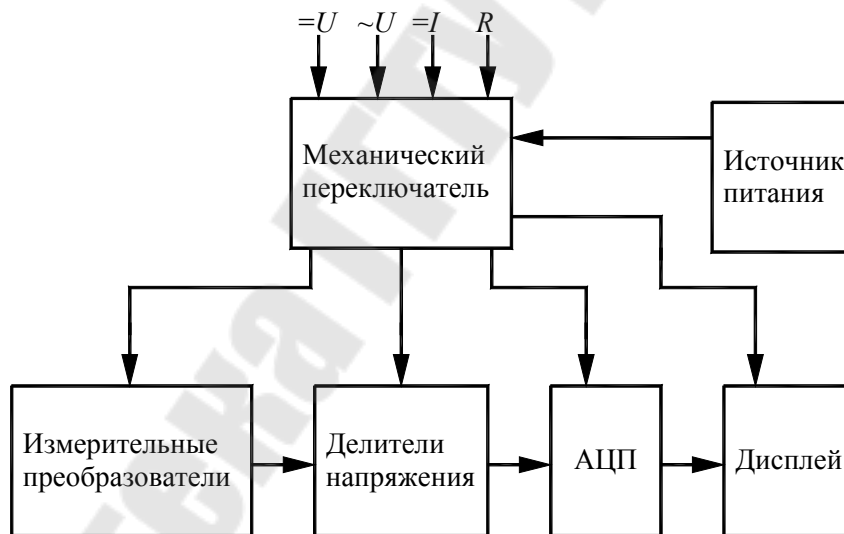


Рис. 3.1. Обобщённая структурная схема микроэлектронного мультиметра

Основным управляющим элементом такого мультиметра является механический переключатель поворотного типа с большим количеством контактов (рис. 3.2).

При переводе контактов этого переключателя задействуется требуемая конфигурация схемы.



Рис. 3.2. Механический переключатель микроэлектронного мультиметра

Главный электронный элемент микроэлектронного мультиметра – это АЦП. На измерительный вход и на вход опорного напряжения АЦП подаются постоянные напряжения с необходимым коэффициентом деления в зависимости от выбранного предела измерения. На выходах АЦП формируется двоичный код в специальной системе кодирования для непосредственного отображения результата измерения на цифровом дисплее.

Измерение постоянного напряжения осуществляется через резистивные делители напряжения (рис. 3.3, а), а измерение тока – с помощью шунта и резистивных делителей (рис. 3.3, б).

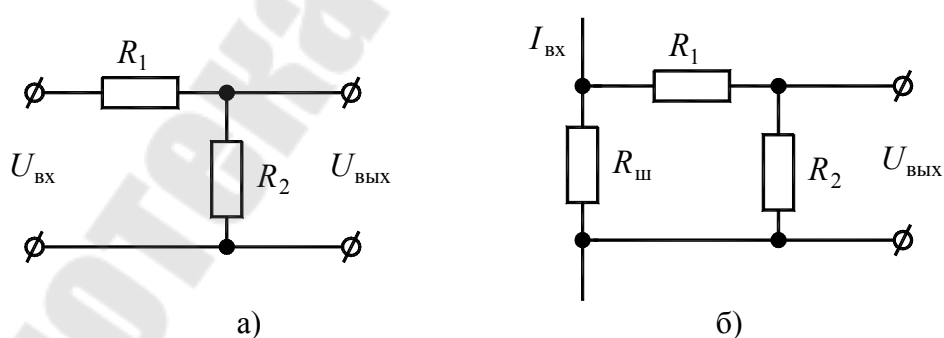


Рис. 3.3. Схемы для измерения:
а – постоянного напряжения; б – постоянного тока

При переводе механического переключателя значения сопротивлений R_1 и R_2 изменяются, и, соответственно, изменяются коэффициенты деления $k_{\text{дел}}$. Для схемы на рис 3.3, а:

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{дел}} \cdot U_{\text{вх}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{вх}}. \quad (3.1)$$

Для схемы на рис 3.3, б:

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{дел}} \cdot I_{\text{вх}} = \frac{R_2 \cdot R_{\text{ш}}}{R_1 + R_2} \cdot I_{\text{вх}}. \quad (3.2)$$

Измерение действующего значения переменного напряжения или тока в микроэлектронных мультиметрах выполняется на основе средневыпрямленного значения напряжения (см. п. 1.4).

В реальных условиях эксплуатации напряжения электрической сети по форме близки к синусоиде. Поэтому погрешность измерения действующего значения напряжения в микроэлектронном мультиметре, как правило, не превышает 2%. Однако токи в низковольтных сетях бывают резко несинусоидальными. Из-за этого функция измерения переменного тока в большинстве микроэлектронных мультиметров отсутствует.



Из п. 1.4 следует также, что на результат измерения действующего значения в микроэлектронном мультиметре влияет падение напряжения на диоде U_{vd} , которое составляет порядка 0,8 В. Таким образом, чем выше значение измеряемого напряжения, тем меньше это влияние. Данная ситуация объясняет отсутствие у большинства микроэлектронных мультиметров возможности измерения действующих значений напряжений ниже 0,5 В.

Рассмотрим мультиметр *M-838 (DT-838)* – один из наиболее распространённых типов микроэлектронных мультиметров (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Мультиметр M-838

Мультиметр M-838 выполняет следующие функции:

- *DCV (Direct Current Voltage)* – измерение постоянного напряжения (напряжения постоянного тока) в диапазоне от 500 мкВ до 600 В с погрешностью 0,5%;
- *DCA (Direct Current Amperage)* – измерение постоянного тока в диапазоне от 0,5 мкА до 20 А с погрешностью 1%;
- *ACV (Alternating Current Voltage)* – измерение действующего значения переменного напряжения (напряжения переменного тока) в диапазоне от 0,5 В до 600 В с погрешностью 1,2%;
- Ω – измерение сопротивления в диапазоне от 0,5 Ом до 2 МОм с погрешностью 0,8%;
-  – режим проверки диодов;
-  – режим проверки целостности проводников со звуковым сигналом;
- *TEMP (Temperature)* – измерение температуры с помощью термопары в диапазоне от -20 °С до 1000 °С с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- *hFE* – проверка биполярных транзисторов с отображением значения тока передачи коллектора.

Мультиметр M-838 имеет три гнезда для подключения измерительных проводов:

- *COM (Common)* – общий контакт для подключения чёрного провода;
- *VΩmA* – контакт для подключения красного провода для всех видов измерений кроме измерения постоянного тока с пределом измерения 20 А;
- *10ADC* – контакт для подключения красного провода для измерения постоянного тока с пределом измерения 10 А.

3.2 Микропроцессорные мультиметры

Обобщённая структурная схема, содержащая основные блоки микропроцессорного мультиметра, показана на рис. 3.5.

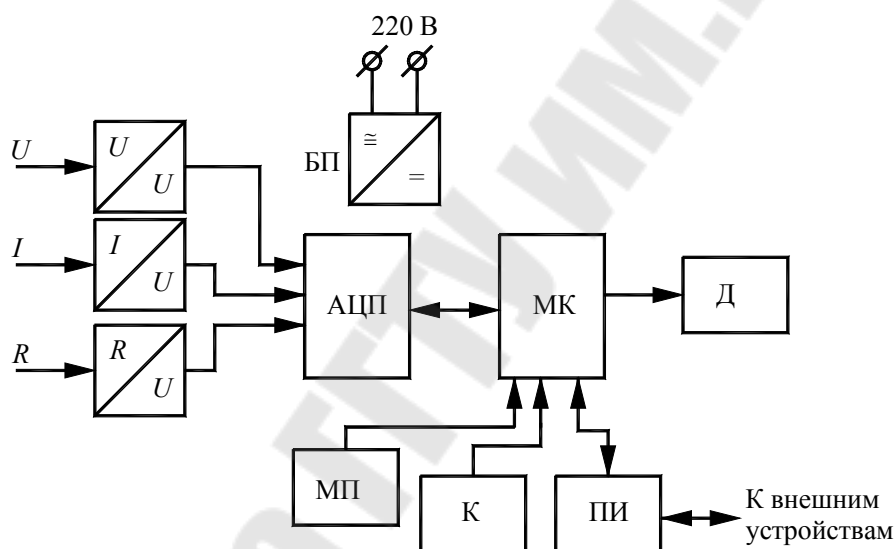


Рис. 3.5. Обобщённая структурная схема микропроцессорного мультиметра:
 БП – блок питания; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; Д – дисплей; МП – механический переключатель; К – кнопки; ПИ – преобразователь для интерфейса связи

В большинстве микропроцессорных мультиметров для удобства работы имеется механический переключатель МП, задающий требуемую функцию измерения. Положение этого переключателя периодически считывает микроконтроллер МК, управляя далее всеми остальными блоками мультиметра.

Необходимая измеряемая величина после соответствующего вторичного измерительного преобразователя подаётся на аналоговый вход АЦП, и затем, преобразованная в двоичный код, поступает далее в ОЗУ микроконтроллера МК.

Программное обеспечение микроконтроллера выполняет необходимые расчёты. Например, расчёт истинного действующего значения напряжения (см. п. 1.4). Результаты отображаются на дисплее в соответствии с выбранным пределом измерения.

Микропроцессорные мультиметры на лицевой панели имеют кнопки для дополнительных функций или для перемещения по меню.

Многие микропроцессорные мультиметры оснащают интерфейсами связи для подключения к компьютеру. Это, как правило, интерфейсы *RS232* или *USB*.

В качестве примера рассмотрим несколько микропроцессорных мультиметров.



VC9808 представляет собой классический мультиметр с механическим переключателем (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Мультиметр *VC9808*

Мультиметр *VC9808* выполняет следующие функции:

- измерение постоянного напряжения в диапазоне от 500 мкВ до 1000 В с погрешностью 0,5%;
- измерение постоянного тока в диапазоне от 0,5 мкА до 20 А с погрешностью 1,2%;
- измерение действующего значения переменного напряжения в диапазоне от 0,5 В до 750 В с погрешностью 0,8%;

- измерение действующего значения переменного тока в диапазоне от 5 мкА до 20 А с погрешностью 2%;
- Ω – измерение сопротивления в диапазоне от 0,5 Ом до 2 ГОм с погрешностью 0,8%;
- F – измерение ёмкости в диапазоне от 10 пФ до 200 мкФ с погрешностью 2,5%;
- L – измерение индуктивности в диапазоне от 1 мкГн до 20 Гн с погрешностью 2,5%;
- 10MHz – измерение частоты в диапазоне от 1 Гц до 10 МГц с погрешностью 2%;
-  – режим проверки диодов;
-  – режим проверки целостности проводников со звуковым сигналом;
- $^{\circ}\text{C}$ – измерение температуры с помощью термопары в диапазоне от -20°C до 1000°C с погрешностью 1%;
- hFE – проверка биполярных транзисторов с отображением значения тока передачи коллектора.

Мультиметр VC9808 имеет 4 гнезда для подключения измерительных проводов:

- *COM (Common)* – общий контакт для подключения чёрного провода;
- *V Ω Hz* – контакт для измерения напряжения, сопротивления и частоты;
- *mA* – контакт для измерения токов до 200 мА, а также ёмкости и индуктивности;
- *20A* – контакт для измерения постоянного и переменного тока с пределом измерения 20 А.

Помимо стандартных мультиметров, существуют и специальные мультиметры для задач энергетики. Примером является **мультиметр энергетический МЭ-01** (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Мультиметр МЭ-01

МЭ-01 – это энергетический мультиметр, предназначенный контроля параметров электрической сети.

На лицевой панели мультиметр МЭ-01 имеет две кнопки для перемещения по программному меню линейного типа и небольшой жидкокристаллический дисплей. Прибор выполнен в металлическом корпусе, что повышает его устойчивость к воздействию внешних электромагнитных помех.

Схема подключения мультиметра МЭ-01 к высоковольтной трёхфазной электрической сети показана на рис. 3.8.

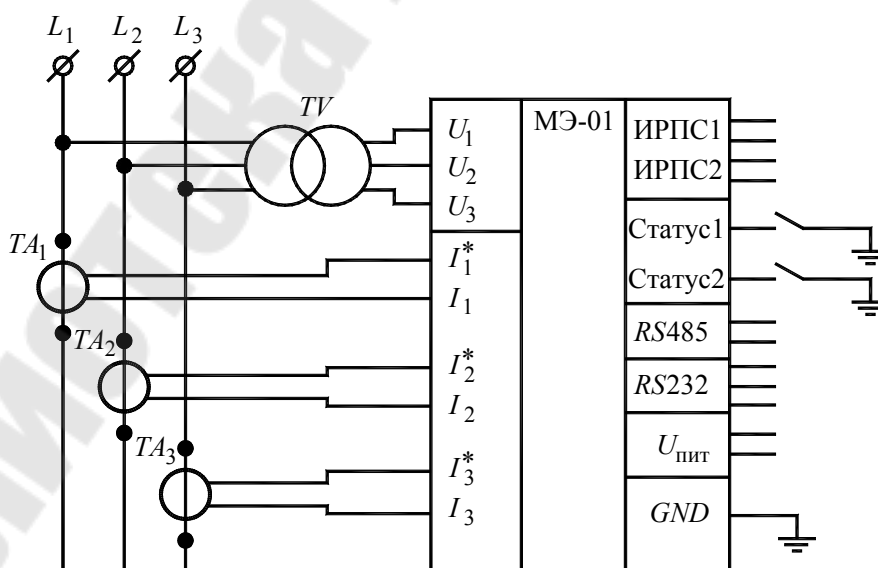


Рис. 3.8. Схема подключения мультиметра МЭ-01

Мультиметр имеет три канала для измерения напряжения и три канала для измерения тока. К высоковольтной электрической сети (с напряжением выше 1 кВ) подключение производится через измерительные трансформаторы TU и $TA_1 - TA_3$. При этом их коэффициенты трансформации могут быть учтены в программном обеспечении прибора.

МЭ-01 содержит два канала импульсного ИРПС (см. п. 2.4), для подключения к системе АСКУЭ, один канал интерфейса $RS232$ (см. п. 2.5) для подключения к компьютеру и один канал интерфейса $RS485$ (см. п. 2.6) для подключения к информационной сети.

Также в приборе МЭ-01 имеются два дискретных входа «Статус 1» и «Статус 2» для контроля положения механических контактов в системах автоматики.

Напряжение питания 220 В подаётся на отдельный вход $U_{пит}$.

Мультиметр МЭ-01 осуществляет измерение следующих параметров электрической сети:

- RMS -значений фазных напряжений по каждой фазе и отдельно по первой гармонике;
- RMS -значений линейных токов по каждой фазе и отдельно по первой гармонике;
- мгновенных значений активной, реактивной и полной мощностей по каждой фазе;
- значений частоты напряжения;
- значений коэффициента мощности и $\cos\varphi$ по каждой фазе;
- значений коэффициентов искажения синусоидальности напряжений.

Рассмотрим основные алгоритмы работы прибора МЭ-01.

Истинные действующие значения напряжений и токов (RMS -значения) прибор определяет по алгоритму, описанному в п. 1.4.

Значения активной P , реактивной Q и полной S мощностей рассчитываются по формулам:

$$P = \sum_{k=0}^{n/2} U_{RMS.k} \cdot I_{RMS.k} \cdot \cos\varphi_k ; \quad (3.3)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{n/2} U_{RMS.k} \cdot I_{RMS.k} \cdot \sin\varphi_k ; \quad (3.4)$$

$$S = \sum_{k=0}^{n/2} U_{RMS.k} \cdot I_{RMS.k}, \quad (3.5)$$

где: $U_{RMS.k}$, $I_{RMS.k}$ – соответственно, действующие значения напряжения и тока для k -й гармонической составляющей; φ_k – фазовые сдвиги между напряжением и током для k -й гармонической составляющей; n – количество отсчётов за один период измеряемого напряжения.

Зная значения P и S , прибор определяет значение коэффициента мощности:

$$K_M = \frac{P}{S}. \quad (3.6)$$

Отдельно на дисплее мультиметра отображаются значения $\cos\varphi$ для первых гармоник, так как отличие $\cos\varphi$ от коэффициента мощности K_M заключается в том, что формула (3.6) учитывает вклад всех высших гармонических составляющих напряжения и тока.

Значения коэффициентов искажения синусоидальности напряжений мультиметр рассчитывает следующим образом:

$$U_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{n/2} (U_{RMS.k})^2}}{U_{RMS.1}} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Таким образом, мультиметр МЭ-01 позволяет анализировать показатели трёхфазной электрической сети с учётом высших гармонических составляющих в спектре напряжений и токов.

4 МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для задач энергетики применяются следующие виды микропроцессорных измерителей сопротивлений:

- микроомметры;
- миллиомметры;
- омметры;
- мегаомметры;
- измерители сопротивления заземления;
- измерители сопротивления петли «Фаза-нуль».

4.1 Измерители малых сопротивлений

Малыми называют сопротивления, имеющие диапазоны мкОм и мОм. В энергетике диапазон мкОм имеют сопротивления контактов коммутационных аппаратов, болтовые, сварные и паяные соединения. Диапазон мОм имеют сопротивления обмоток мощных электрических машин – трансформаторов и электродвигателей, а также сопротивления некоторых датчиков температуры.

В большинстве современных измерителей малых сопротивлений используется четырёхпроводная схема измерения (рис. 4.1).

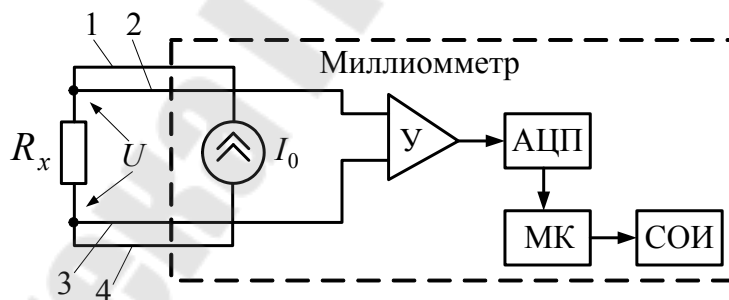


Рис. 4.1. Функциональная схема измерения малых сопротивлений четырёхпроводным методом:

U – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; СОИ – средство отображения информации

Встроенный в прибор источник тока I_0 подключается к измеряемому сопротивлению R_x через проводники 1 и 4. В результате на сопротивлении R_x формируется падение напряжения $U = I_0 \cdot R_x$. Это напряжение через проводники 2 и 3 подаётся на входы измерительного усилителя U , имеющего высокое входное сопротивление. При этом

ток по проводникам 2 и 3 практически не протекает, то есть не создаёт на них падения напряжения, и они не влияют на результаты измерения. Это и есть главное преимущество четырёхпроводного метода – исключение влияния измерительных проводов.

Двоичный код N , сформированный АЦП, пропорционален напряжению U :

$$N = k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot U = k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot I_0 \cdot R_x, \quad (4.1)$$

где k_y – коэффициент усиления измерительного усилителя; $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразования АЦП.

Тогда алгоритм расчёта измеряемого сопротивления, выполняемый программным обеспечением прибора, запишется в виде:

$$R_x = \frac{k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot I_0}{N}. \quad (4.2)$$

Для того, чтобы напряжение U можно было выделить на фоне помех, ток I_0 должен иметь достаточно высокие значения. Эти значения составляют десятки ампер для постоянной формы тока (рис. 4.2, а) и сотни ампер для импульсной формы (рис. 4.2, б).

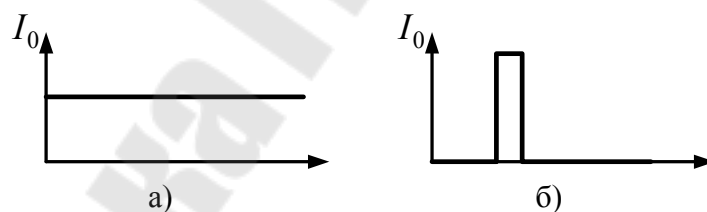


Рис. 4.2. Формы измерительного тока:

а – постоянный ток; б – импульсный ток

Измерение активной составляющей сопротивления обмоток электрических машин возможно только при постоянной форме тока из-за переходных процессов, обусловленных высокими значениями индуктивностей этих обмоток.

В качестве примера рассмотрим микрометр $MMR-630$ (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Микроомметр MMR-630

Прибор предназначен для измерения малых активных сопротивлений диапазоне от 0,1 мкОм до 1999 Ом.

На лицевой панели микроомметра расположены: механический переключатель видов измерений, кнопки джойстика для перемещения по программному меню разветвлённого типа, жидкокристаллический дисплей, четыре разъёма для измерения четырёхпроводным методом и разъём для интерфейса связи RS232.

Основные технические характеристики прибора MMR-630 сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Технические характеристики микроомметра MMR-630

Параметр	Значение
Диапазон измерения сопротивлений	от 0,1 мкОм до 1999,9 Ом
Погрешность измерения	$\pm(0,25\%R+2e.m.p)$
Максимальное значение измерительного тока	10 А
Защита от наружного напряжения	440 В
Максимальная индуктивность измеряемого сопротивления	40 Гн
Максимальное время измерения активного сопротивления	3 с

Запись погрешности « $\pm(0,25\%R+2e.m.p.)$ » необходимо интерпретировать следующим образом. Пусть отображаемое на дисплее значение составляет 471,8 мОм. Запись «e.m.p.» обозначает «единиц младшего разряда». В рассмотренном примере младший разряд составляет десятые доли мОм. Следовательно, добавка к основной погрешности будет 2e.m.p., то есть 0,2 мОм. Тогда реальное значение измеренного сопротивления составит:

$$471,8 \pm (0,0025 \cdot 471,8 + 0,2) = 471,8 \pm 1,38 \text{ мОм.}$$

Помимо значения сопротивления, на дисплее прибора MMR-630 отображается дополнительная информация (рис. 4.4).

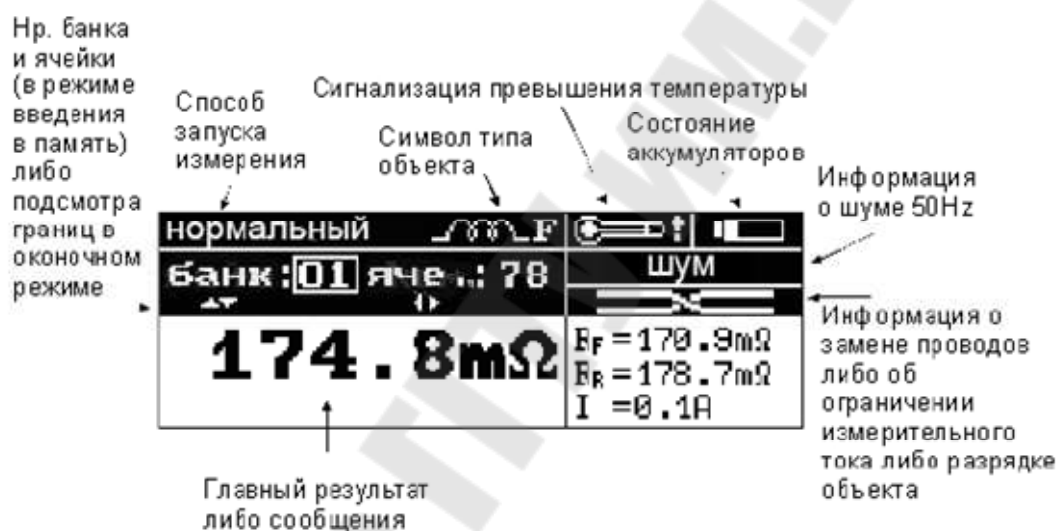


Рис. 4.4. Дополнительная информация на дисплее прибора MMR-630

Прибор контролирует свою внутреннюю температуру, уровень шума от электромагнитных помех, значение измерительного тока и другие параметры.

4.2 Измерители больших сопротивлений

Мегаомметры применяются в энергетике для контроля сопротивления изоляции различного оборудования.

Функциональная схема микропроцессорного мегаомметра показана на рис. 4.5.

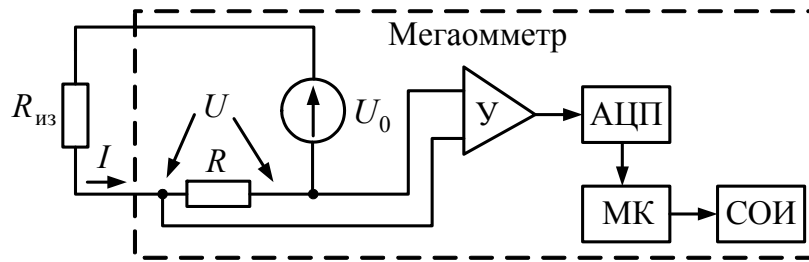


Рис. 4.5. Функциональная схема электронного мегаомметра:
 У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер;
 СОИ – средство отображения информации

Источник высокого постоянного напряжения U_0 , прикладываемого к изоляции, встроен непосредственно в прибор. Значение U_0 достаточно высоко и может достигать 5 кВ. В результате приложения этого напряжения через изоляцию протекает ток I , создающий падение напряжения на сопротивлении резистора $U = I \cdot R$, которое усиливается с помощью электронного измерительного усилителя $У$ и затем подаётся на аналоговый вход АЦП. Двоичный код N , формируемый на выходах АЦП, пропорционален напряжению U :

$$N = k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot U = k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot I \cdot R, \quad (4.3)$$

где k_y – коэффициент усиления измерительного усилителя; $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразования АЦП.

Учитывая, что $R \ll R_{\text{из}}$, можно записать:

$$I \approx \frac{U_0}{R_{\text{из}}}. \quad (4.4)$$

Подставив (4.4) в (4.3) и выразив $R_{\text{из}}$, получим:

$$R_{\text{из}} = \frac{k_y \cdot k_{\text{АЦП}} \cdot U_0 \cdot R}{N}. \quad (4.5)$$

Выражение (4.5) является алгоритмом для расчёта сопротивления изоляции в программном обеспечении микроконтроллера МК (рис. 4.5). Полученные значения выводятся на средство отображения информации СОИ, которым, в основном, является жидкокристаллический или светодиодный дисплей.

Особенностью измерения сопротивления изоляции является длительный переходный процесс изменения тока I , обусловленный явлениями поляризации (рис. 4.6). Поэтому фиксация значения этого сопротивления осуществляется не ранее, чем через 60 с после начала измерений.

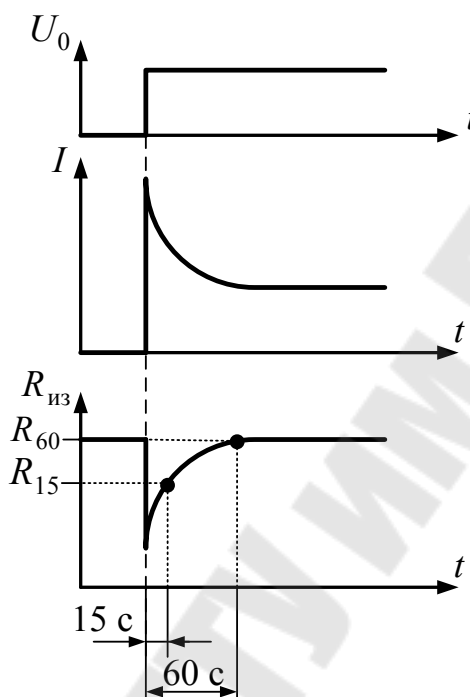


Рис. 4.6. Графики переходных процессов при измерении сопротивления изоляции

В процессе измерений программное обеспечение прибора фиксирует значения сопротивления изоляции через 15 с после начала измерения R_{15} и через 60 с после начала измерения R_{60} . На основе этих значений выполняется расчёт **коэффициента абсорбции**:

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}. \quad (4.6)$$

Этот коэффициент характеризует степень увлажнения изоляции. Для влажной изоляции его значение стремится к единице.

Современные мегаомметры выполняют также расчёт **коэффициента поляризации**:

$$K_{\text{пол}} = \frac{R_{600}}{R_{60}}. \quad (4.7)$$

Этот коэффициент характеризует наличие очень медленных процессов поляризации в изоляции, обусловленных её неоднородностью.

Требования к значениям сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции для различных объектов энергетики прописаны в ТКП 181-2009 «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей».

Рассмотрим пример промышленного прибора.

Мегаомметр Fluke 1550C (рис. 4.7) применяется для проверки качества изоляции коммутационных аппаратов, электродвигателей, трансформаторов и кабелей испытательным напряжением до 5 кВ.

На дисплее прибора результаты измерения отображаются не только в виде цифр, но и с помощью полукруглой шкалы, позволяющей более наглядно воспринимать медленные изменения сопротивления изоляции.



Рис. 4.7. Мегаомметр Fluke 1550C

Прибор измеряет сопротивление изоляции в диапазоне от 200 кОм до 2 ТОм (10^{12} Ом), рассчитывает коэффициент абсорбции,

коэффициент поляризации, а также сигнализирует о наличии пробоя изоляции.

Точность измерения составляет 5% в диапазоне от 200 кОм до 200 ГОм и 20% в диапазоне более 200 ГОм.

Помимо классического измерения параметров изоляции, мегаомметр *Fluke 1550C* может быть использован для испытания изоляции на пробой, поскольку в его программном обеспечении предусмотрена соответствующая функция. Однако при этом максимальное испытательное напряжение не превысит 5 кВ.

Прибор *Fluke 1550C* имеет три гнезда для измерительных проводов. Первые два гнезда подключаются к измеряемому сопротивлению, а третье гнездо – это электромагнитный экран. Его назначение – снижение уровня помех при измерениях. Также этот экран позволяет снижать значения поверхностных токов утечки, что повышает точность измерений.

На рис. 4.8 изображена схема подключения экранирующего провода при измерении сопротивления изоляции между жилой и защитным экраном силового кабеля.

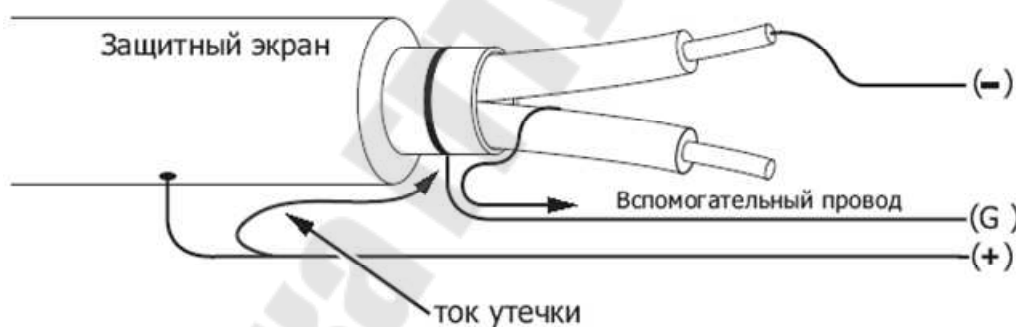


Рис. 4.8. Подключение экранирующего провода мегаомметра к силовому кабелю

На поясную изоляцию кабеля надевается электропроводящая лента, к которой присоединяется экранирующий провод мегаомметра *G*. При таком подключении поверхностные токи утечки изоляции жил кабеля замыкаются на экранирующий провод, минуя измерительные провода. Благодаря этому мегаомметр определяет только объёмное сопротивление изоляции.

Главным недостатком мегаомметра *Fluke 1550C* является то, что значение коэффициента абсорбции определяется не по формуле (4.6), а следующим образом:

$$K_{\text{abc}} = \frac{R_{60}}{R_{30}}. \quad (4.8)$$

Такой расчёт коэффициента абсорбции не соответствует требованиям ТКП 181-2009. Следовательно, по данному параметру рассматриваемый прибор не может быть использован в отечественной энергосистеме.

4.3 Измерители сопротивления заземления

Корректное измерение сопротивления заземления – одна из важнейших задач в энергетике. Особую сложность здесь вызывает распределённый в пространстве, неравномерный характер этого сопротивления.

Как и любое сопротивление, сопротивление заземления должно иметь две точки для измерения. Первая точка, естественно, находится на контролируемом заземляющем устройстве. Где же тогда вторая точка? Она, очевидно, должна быть где-то в грунте на некотором расстоянии от заземляющего устройства. Правильное определение расположения этой точки и является основной сложностью при выполнении измерений.

Приборы, осуществляющие измерение сопротивления заземления, являются измерителями малых сопротивлений и используют, как правило, четырёхпроводную схему измерения (см. п. 4.1).

Рассмотрим классический микропроцессорный измеритель сопротивления заземления ИС-10 (рис. 4.9).

Прибор ИС-10 предназначен для измерения сопротивления элементов заземления, металлосоединений, непрерывности защитных проводников в различных режимах: по двух-, трёх- или четырёхпроводному методу. Прибор позволяет измерять и автоматически вычислять удельное сопротивление грунта.

С помощью токовых клещей прибор ИС-10 измеряет переменный ток в системе заземления без разрыва измеряемой цепи, благодаря чему можно выполнить качественную оценку состояния единичных заземлителей в многоэлементном заземлении путём определения процентного распределения токов.



Рис. 4.9. Измеритель сопротивления заземления ИС-10

Диапазон измерения сопротивления заземления составляет от 1 мОм до 10 кОм. Погрешность измерения: 3%.

Диапазон измерения тока клещами: 1–250 мА.

В комплекте к прибору ИС-10 поставляются рулетки с намотанными на них измерительными проводами длиной не менее 40 м, а также 4 измерительных штыря для погружения в грунт.

Схема подключения прибора ИС-10 по четырёхпроводному методу показана на рис. 4.10.

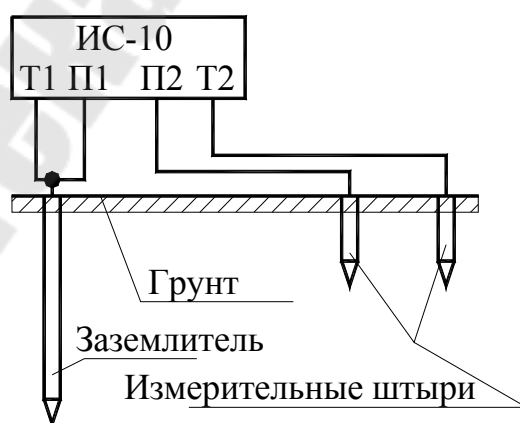


Рис. 4.10. Схема подключения прибора ИС-10 для измерения сопротивления заземления

Прибор имеет четыре гнезда для подключения измерительных проводов. Гнезда Т1 и Т2 представляют собой выход встроенного источника тока, а гнезда П1 и П2 являются входами измерительного усилителя.

Гнезда Т1 и П1 должны быть подключены к одному из заземлителей контролируемого заземляющего устройства (ЗУ). Гнезда Т2 и П2 необходимо присоединить к измерительным штырям, которые относятся на некоторое расстояние от ЗУ в соответствии с методикой измерения, имеющей следующие этапы:

- 1) определяют максимальную диагональ ЗУ D , то есть максимальное расстояние между имеющимися заземлителями в ЗУ;
- 2) штырь П2 устанавливают в грунт на расстоянии $1,5D$, но не менее 20 м от контролируемого ЗУ;
- 3) штырь Т2 устанавливают в грунт на расстоянии $3D$, но не менее 40 м от контролируемого ЗУ;
- 4) производят серию измерений сопротивления заземления при последовательной установке штыря П2 в грунт на расстоянии 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 и 10 % от расстояния до штыря Т2;
- 5) строят график зависимости сопротивления от расстояния X между ЗУ и штырём П2 (рис. 4.11).

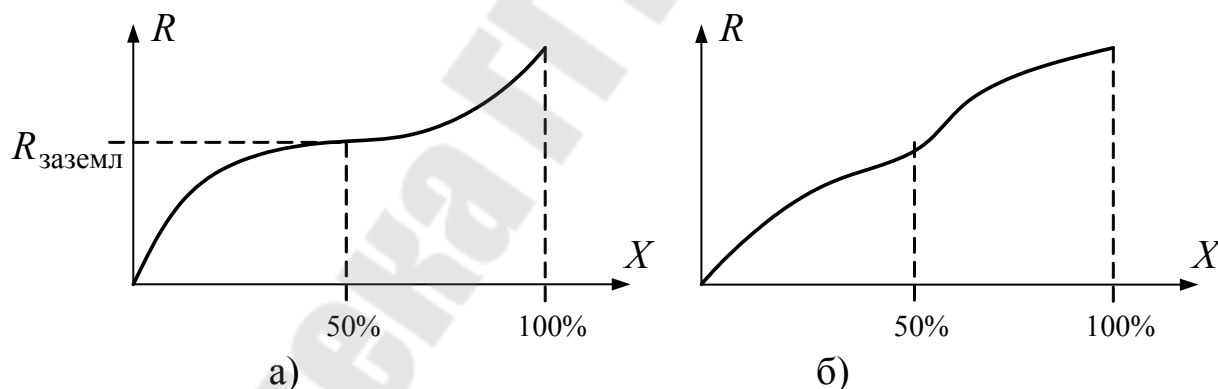


Рис. 4.11. Графики зависимости сопротивления от расстояния между измерительными штырями: а – верный график; б – неверный график

В полученном графике $R(X)$ должен быть приблизительно горизонтальный участок при расстояниях от 40% до 60% (рис. 4.11, а). Изменение сопротивления на этом участке не должно превышать 10%. Тогда значение сопротивления заземления $R_{\text{заземл}}$ необходимо определять при расстоянии 50%.

Если в области погружения измерительных штырей есть расположенные рядом системы заземления или другие подземные коммуникации, то форма графика может отличаться от требуемой формы (рис. 4.11, б). В этом случае измерения необходимо повторить, выбрав другое направление для установки штырей.

Для измерения удельного сопротивления грунта требуется четыре измерительных штыря, которые нужно погружать по прямой линии на расстоянии не менее 5 м (рис. 4.12).

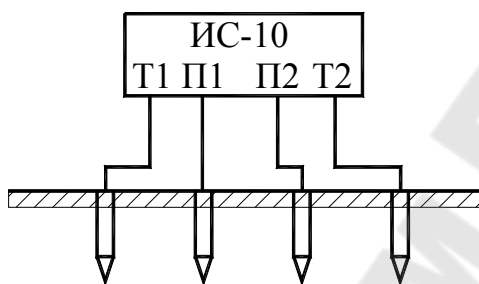


Рис. 4.12. Схема измерения удельного сопротивления грунта

Расчёт удельного сопротивления грунта осуществляется по методике Вернера по формуле:

$$\rho_{\text{уд}} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R_e, \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (4.9)$$

где: d – расстояние между штырями, м; R_e – значение сопротивления, измеренное прибором, Ом.

4.4 Измерители сопротивления петли «фаза-нуль»

В низковольтных электрических сетях актуальной является задача измерения эквивалентного сопротивления участка сети от точки измерения до вторичной обмотки силового трансформатора на трансформаторной подстанции. Специальные приборы осуществляют эти измерения непосредственно под напряжением.

Схема замещения петли «фаза-нуль» и функциональная схема измерительного прибора показаны на рис. 4.13.

Измерение осуществляется в два этапа. Вначале электронный ключ S разомкнут, и прибор измеряет напряжение сети U_c в режиме холостого хода. Затем ключ кратковременно замыкается, и к сети подключается нагрузочное сопротивление R_n около 10 Ом. В этом

случае прибор измеряет ток I_H , а также фазовый сдвиг φ между напряжением U_c и током I_H .

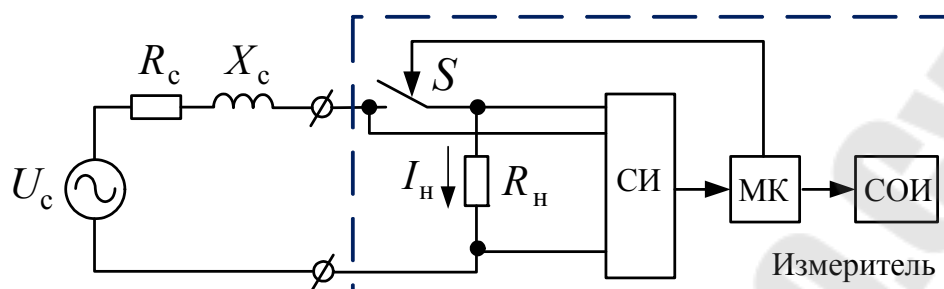


Рис. 4.13. Схема измерения сопротивления петли «фаза-нуль»:

СИ – схема измерения; МК – микроконтроллер; СОИ – средство отображения информации

В результате можно записать систему из двух уравнений с двумя неизвестными параметрами R_c и X_c :

$$\begin{cases} I_H = \frac{U_c}{\sqrt{(R_c + R_H)^2 + X_c^2}}; \\ \operatorname{tg}\varphi = \frac{X_c}{R_c + R_H}, \end{cases} \quad (4.10)$$

где R_c и X_c – соответственно, активное и реактивное сопротивления петли «фаза-нуль».

Решая систему (4.10), получим формулы для расчёта требуемых параметров:

$$\begin{cases} X_c = \frac{U_c \cdot \operatorname{tg}\varphi}{I_H \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}}; \\ R_c = \frac{U_c}{I_H \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}} - R_H. \end{cases} \quad (4.11)$$

Формулы (4.11) и использует программное обеспечение микроконтроллера.

Кроме значений R_c и X_c прибор может рассчитать значение тока короткого замыкания I_k в точке измерения по формуле:

$$I_k = \frac{U_c}{\sqrt{R_c^2 + X_c^2}}. \quad (4.12)$$

По параметрам R_c и X_c , рассчитанным прибором, можно оценить качество электропроводки. Если $R_c > 0,5$ Ом или $X_c > 1$ Ом, то, очевидно, имеет место ухудшение качества контактов или же обрыв провода.

Значение I_k используется для проверки правильности срабатывания автоматических выключателей при коротком замыкании в соответствии с условием:

$$I_{\text{эмрц}} < I_k, \quad (4.13)$$

где $I_{\text{эмрц}}$ – ток срабатывания электромагнитного расцепителя (отсечки) автоматического выключателя.

Рассмотрим классический микропроцессорный **измеритель сопротивления петли «фаза-нуль» ИФН-200** (рис. 4.14).



Рис. 4.14. Измеритель сопротивления петли «фаза-нуль» ИФН-200

Прибор ИФН-200 измеряет полное, активное и реактивное сопротивление цепи фаза-нуль, без отключения источника питания, вычисляет ожидаемый ток короткого замыкания в точке измерения, из-

меряет действующее значение напряжения. Также прибор может выполнять функции миллиомметра, то есть измерять сопротивления постоянному току при снятом напряжении. Для этого режима в приборе имеется отдельное гнездо.

Диапазон измерения сопротивления цепи фаза-нуль составляет от 0,01 до 200 Ом. Погрешность: 3%.

Диапазон измерения напряжения: от 30 до 280 В.

Предельное значение расчётного тока короткого замыкания: 22 кА.

В приборе имеется память на 35 измерений.

Питание ИФН-200 осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В. В комплекте к прибору поставляется зарядное устройство для аккумулятора.

Подключается прибор между одной из фаз и нулевым проводником, а также между одной из фаз и защитным проводником *РЕ*.

5 ПРИБОРЫ ДЛЯ УЧЁТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Современные приборы для учёта электрической энергии – это микропроцессорные счётчики и средства, обеспечивающие их соединение в информационную сеть.

5.1 Общие принципы учёта электрической энергии

Основным видом учитываемой электроэнергии в системах электроснабжения является **активная энергия**. Программное обеспечение счётчиков выполняет её расчёт, как правило, **по мгновенным значениям**. Для трёхфазной сети алгоритм расчёта приращения активной энергии ΔW_P на интервале времени t_1, t_2 можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta W_P &= \int_{t_1}^{t_2} u_{L1}(t) \cdot i_{L1}(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} u_{L2}(t) \cdot i_{L2}(t) \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} u_{L3}(t) \cdot i_{L3}(t) \cdot dt \approx \\ &\approx \sum_{i=0}^{n-1} u_{L1,i} \cdot i_{L1,i} \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^{n-1} u_{L2,i} \cdot i_{L2,i} \cdot \Delta t + \sum_{i=0}^{n-1} u_{L3,i} \cdot i_{L3,i} \cdot \Delta t = \\ &= \Delta t \cdot \left(\sum_{i=0}^{n-1} (u_{L1,i} \cdot i_{L1,i} + u_{L2,i} \cdot i_{L2,i} + u_{L3,i} \cdot i_{L3,i}) \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

где u_{L1}, u_{L2}, u_{L3} – мгновенные значения фазных напряжений (линейных напряжений при соединении нагрузки по схеме треугольника) соответствующих фаз; i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} – мгновенные значения линейных токов (фазных токов при соединении нагрузки по схеме треугольника) соответствующих фаз; i – номер шага расчёта; Δt – период дискретизации; n – количество шагов расчёта на расчётном интервале.

Важно отметить, что для корректного расчёта произведение $n \cdot \Delta t$ должно быть кратно периоду напряжения сети $T_{\text{сети}}$:

$$\frac{n \cdot \Delta t}{T_{\text{сети}}} = \alpha, \quad (5.2)$$

где α – любое целое положительное число.

Формула (5.1) учитывает все высшие гармонические составляющие напряжения и тока с частотами до $\frac{1}{2 \cdot \Delta t}$ (в соответствии с теоремой Котельникова).

В счётчиках активной энергии алгоритм (5.1) реализуется на специальных микроконтроллерах, которые называются *DSP – Digital Signal Processor* – цифровой сигнальный процессор. В этих микроконтроллерах имеются модули аппаратного перемножения двоичных кодов отсчётов аналоговых сигналов, что позволяет выполнять расчёт с высокой скоростью в реальном времени.

Для реактивной и полной энергии формул расчёта по мгновенным значениям не существует. Поэтому расчёт осуществляется по действующим (*RMS*) значениям. При этом для учёта высших гармонических составляющих в составе кривых напряжения и тока необходимо реализовать алгоритм разложения в ряд Фурье (см. п. 1.4).

Современные счётчики электроэнергии помимо расчётов энергии выполняют её учёт по многотарифной системе с использованием таких понятий, как тариф, тарифная зона, вариант тарификации и тарифный сезон.

Тариф – это стоимость электроэнергии в пределах некоторой тарифной зоны.

Тарифная зона – это интервал времени, в течение которого действует один из тарифов. Тарифные зоны обычно устанавливаются в рамках одних суток отдельно для рабочих, выходных и праздничных дней.

Вариант тарификации – это набор временных интервалов и тарифов для тарифных зон в течение тарифного сезона.

Тарифный сезон – это интервал времени длительностью от месяца до полугода, в течение которого действует один из вариантов тарификации.

Для выполнения этих функций все счётчики оснащаются электронными часами реального времени. В основном, функция часов реализуется в главном микроконтроллере счетчика путём присоединения к его специальным входам часового кварцевого резонатора, от которого тактируется один из таймеров микроконтроллера.

Счётчики, устанавливаемые в узлах передачи и распределения электроэнергии, должны вести её учёт по всем квадрантам в зависимости от направления активной и реактивной мощности (рис. 5.1).

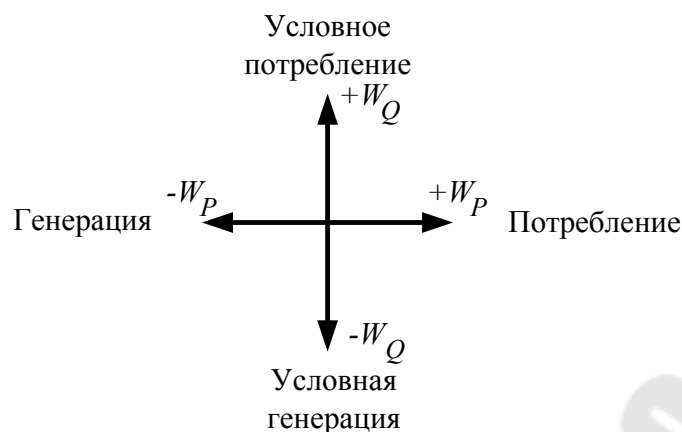


Рис. 5.1. Квадранты учёта энергии в зависимости от её направления

Положительная активная энергия соответствует направлению активной мощности от источника к потребителю, то есть является потребляемой энергией. Отрицательные значения активной энергии свидетельствуют о смене направления активной мощности и переходе потребителя в режим генерации.

Реактивная мощность условно меняет свой знак в зависимости от характера нагрузки. При преобладании индуктивной нагрузки реактивная энергия условно потребляется, а при преобладании емкостной нагрузки – условно генерируется.

Для учёта по всем энергии направлениям счётчик должен иметь четыре соответствующих банка памяти.

5.2 Счётчики электроэнергии

В качестве примера рассмотрим трёхфазный микропроцессорный счётчик электроэнергии ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301 (рис. 5.2), широко используемый в отечественной энергосистеме.

Счётчик предназначен для коммерческого учета электрической энергии на промышленных предприятиях и в энергосистемах, а также для работы в составе автоматических систем контроля и учета электроэнергии.



Рис. 5.2. Счётчик ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301

Счётчик выполняет измерения активной и реактивной энергии, а также активной и реактивной мощности прямого и обратного направлений, фазных напряжений и токов в трёхфазных трёх- или четырёхпроводных цепях переменного тока.

На лицевой панели счётчика расположены: светодиодный дисплей, кнопки управления «Меню», «Маркер» и «Ввод», три сигнальных светодиода и разъём для оптического порта.

Основные технические характеристики счётчика:

- класс точности по активной энергии: $0,2S$;
- класс точности по реактивной энергии: 1;
- количество тарифов: от 1 до 8;
- количество тарифных зон в сутки: до 48;
- количество тарифных сезонов: 12;
- глубина хранения срезов энергии: 60 дней;
- интервал усреднения мощности: 3, 15 или 30 мин;
- глубина хранения значений максимальной мощности за месяц: за текущий и 23 предыдущих;
- сохранение работоспособности часов реального времени после отключения сетевого питания: 8 лет;
- собственная потребляемая мощность: не более 5 ВА;

– интерфейсы связи: RS485 и оптический по ГОСТ Р МЭК 61107-2011.

Главные функциональные возможности счётчика:

– виды сохраняемых значений энергии: накопленная энергия, энергия по приращению за сутки, месяц и год, энергия по накоплению на начало суток, на начало месяца и на начало года;

– виды сохраняемых значений мощности: средняя и максимальная за рассматриваемый интервал;

– отображение текущих значений: напряжений и токов по фазам, активной и реактивной мощности по фазам; коэффициенты мощности по фазам, частота сети;

– запись событий: архив состояния фаз, архив кодов ошибок; архив корректировок параметров счётчика.

Монтажная схема подключения счётчика к высоковольтной электрической сети показана на рис. 5.3.

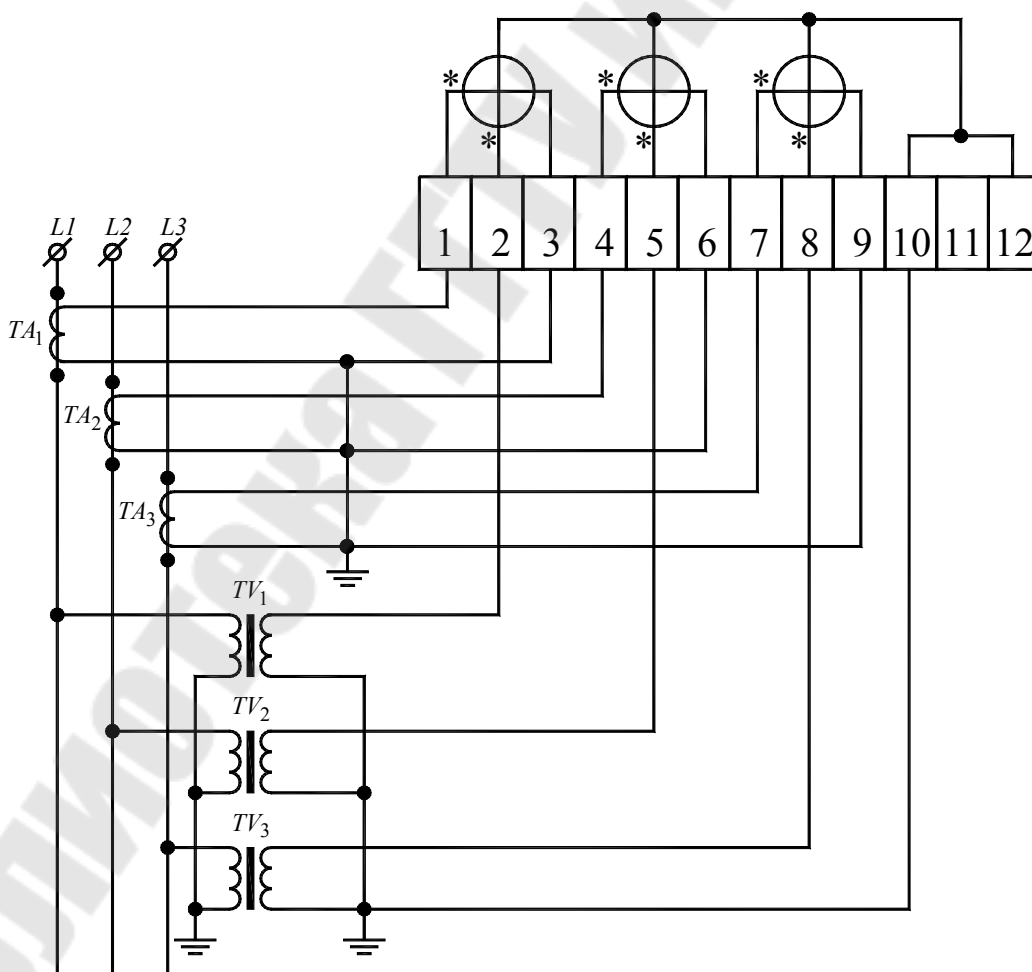


Рис. 5.3. Монтажная схема подключения счётчика ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301

В большинстве случаев в современных распределительных устройствах счётчики подключают по методу трёх ваттметров, так как на стороне вторичных обмоток измерительных трансформаторов тока TA_1-TA_3 и измерительных трансформаторов напряжения TV_1-TV_3 формируется трёхпроводная сеть с номинальным напряжением 100 В и номинальным током 5А. Однако в техническом руководстве к счётчику прилагаются и другие варианты схем.

На дисплее счётчика ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301 помимо результатов учёта электроэнергии отображается дополнительная информация (рис. 5.4).

Первая строка дисплея называется «Строка состояния», а вторая – «Накопленная энергия».

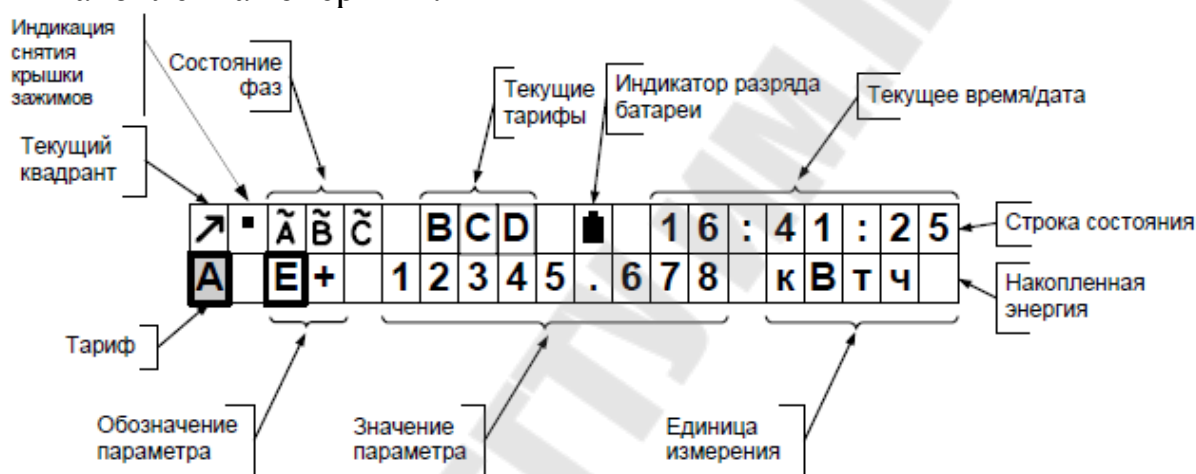


Рис. 5.4. Информация на дисплее счётчика ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301

Рассмотрим первую строку.

Зона «Квадрант» отображает текущий квадрант направления активной и реактивной энергии в соответствии с рис. 5.1 следующими символами:

- ↗ : $+W_P, +W_Q$;
- ↖ : $-W_P, +W_Q$;
- ↘ : $+W_P, -W_Q$;
- ↙ : $-W_P, -W_Q$.

Зона «Индикация снятия крышки зажимов» – наличие точки в этой зоне указывает, что крышка зажимов снята с корпуса счетчика, отсутствие точки – крышка установлена.

В зоне «Состояние фаз» отображается следующее. Если отсутствуют одна или две фазы, то буквы, соответствующие отсутствующим фазам, мигают на дисплее. Если последовательность фаз неправильная – происходит циклический сдвиг на индикаторе букв, обозначающих фазы. Если знак коэффициента мощности по одной из фаз не совпадает со знаками по другим двум фазам, то происходит периодическое изменение размера буквы, обозначающей эту фазу.

В зоне «Текущие тарифы» отображаются действующие в ближайшее время тарифы, обозначаемые буквами *A, B, C, D, E, F, G, H*.

Во второй строке в зоне «Тариф» отображается название тарифа, по которому в данный момент выводится значение накопленной энергии.

В зоне «Обозначение параметра» отображается тип выводимой на дисплей величины.

Параметризация счётчика ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301, то есть изменение его настроек осуществляется тремя способами:

- через управляющие кнопки;
- через компьютер и интерфейс *RS232*;
- через компьютер и оптический порт.

Счётчик ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301 имеет ряд ступеней защиты от несанкционированного доступа.

Конструкцией счётчика предусмотрено два уровня пломбирования.

Первый уровень пломбирования предотвращает несанкционированный доступ внутрь счетчика. Для этого уровня пломбы устанавливает служба технического контроля изготовителя при выходе счётчика из производства и ответственное лицо после поверки счётчика. Пломбы устанавливаются на винты крепления кожуха корпуса к цоколю.

Второй уровень пломбирования предотвращает несанкционированный доступ к зажимной плате, телеметрическим и интерфейсным выходам. Пломбу устанавливает представитель Энергонадзора после монтажа счётчика на объекте. Пломба устанавливается на винт крепления крышки зажимов к корпусу счетчика.

Помимо защиты пломбами имеются четыре уровня программного доступа.

Нулевой уровень доступа предоставляет возможность потребителю производить считывание данных со счётчика и производить

синхронизацию времени по интерфейсу RS232 (RS485) и оптическому порту.

Первый уровень доступа требует введения пароля дополнительного доступа и предоставляет возможность потребителю или организации, ответственной за монтаж и эксплуатацию системы АС-КУЭ, запись параметров, не влияющих на коммерческие характеристики счётчика:

- сетевой адрес счетчика;
- параметры интерфейса связи;
- перечень параметров, выводимых на дисплей.

Второй уровень доступа требует введения пароля основного доступа. Устанавливается Энергонадзором после проведения параметризации счетчика. Паролем основного доступа защищается запись параметров, влияющих на коммерческие характеристики счётчика.

Третий уровень доступа имеет следующие ограничения: пароль основного доступа + крышка зажимов снята (удаление пломбы Энергонадзора) + работа только через оптический порт. Предоставляет Энергонадзору возможность установки времени, обнуления энергии, срезов, максимальной мощности и даты переключения сезонов.

Четвёртый уровень доступа содержит ограничения: установка аппаратного ключа на плату микроконтроллера + удаление пломб Энергонадзора и изготовителя + работа только через оптический порт. Предоставляет изготовителю возможность изменения конфигурации и калибровочных коэффициентов счётчика на этапе его наладки.

Все изменения, которые производились со счётчиком, в виде двоичных **кодов коррекции** вместе с датой и временем записываются в его энергонезависимую память. Часть этих кодов приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Коды параметров коррекции

Двоичный код	Расшифровка кода
0000 0000.0000 0010	Снятие крышки зажимов
0000 0000.0000 0100	Изменение времени с панели счетчика
0000 0000.0000 1000	Изменение даты и времени по сети
0000 0000.0001 0000	Изменение тарифного расписания

Счётчик ГРАН-ЭЛЕКТРО СС-301 имеет функции самодиагностики. Опрашивая свои внутренние устройства, он формирует двоичные **коды ошибок**. Часть этих кодов приведена в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Коды ошибок	
Двоичный код	Расшифровка кода
0000 0001.0000 0001	Аппаратная ошибка. Ошибка при обмене с <i>DSP</i>
0000 0100.0000 0001	Аппаратная ошибка. Неисправно <i>EEPROM</i> калибровки
1000 0000.0000 0001	Аппаратная ошибка. Неисправно ОЗУ микроконтроллера
0000 0000.0000 0010	Сбой часов реального времени
0000 0000.0001 0000	Помехи в цепях переменного тока

Рассмотрим ещё один современный счётчик электроэнергии *Smart IMS* (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Счётчик электроэнергии *Smart IMS*

Основные функциональные возможности:

- автоматический многотарифный учёт потребляемой активной, а также реактивной электроэнергии;
- удалённый доступ к данным посредством встроенного *PLC*-модема или дополнительного канала связи;
- дистанционное управление нагрузками с помощью встроенных отключающих реле;

- контроль дифференциального тока и измерение потребления энергии, соответствующей дифференциальному току;
- реагирование на качество напряжения сети;
- накопление, хранение и передача в центр информации по аварийным состояниям сети, по собственным аварийным состояниям, по действиям потребителя, ведущим к нарушению договора с поставщиком электроэнергии.

Принципиальная схема прямого подключения счётчика *Smart IMS* к низковольтной сети показана на рис. 5.6.

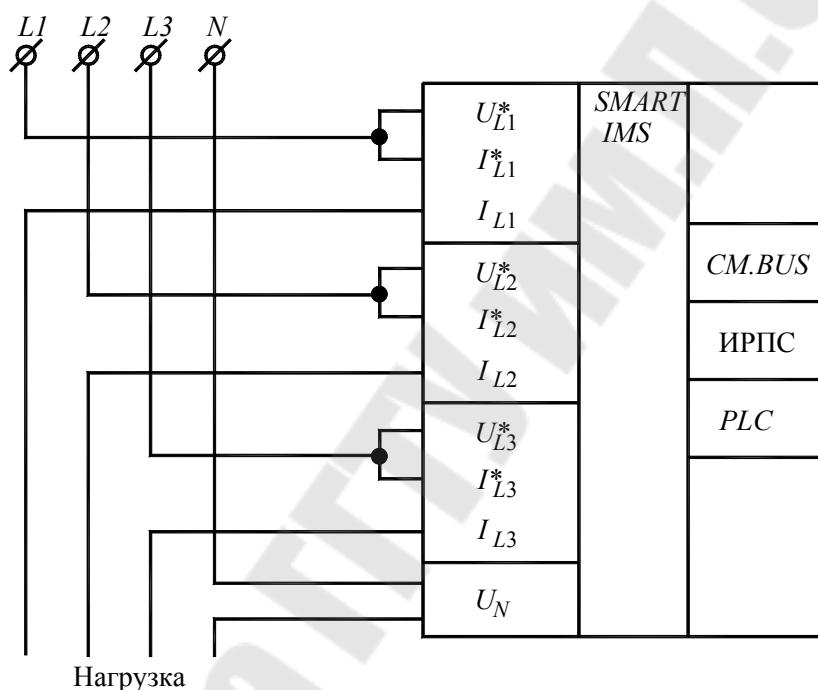


Рис. 5.6. Принципиальная схема прямого подключения счётчика *Smart IMS*

Схема подключения счётчика является стандартной в соответствии с методом трёх ваттметров.

На дисплее счётчика (рис. 5.7) помимо накопленных значений энергии отображаются дополнительные величины: длительность некачественного напряжения сети, длительность дифференциального тока, сальдо по энергии (разность между заявленной и реально потреблённой энергией), средняя мощность.

соединительных клемм. Выходы этих разветвителей подключаются к **концентраторам АСКУЭ**, выполняющим функции систем сбора и передачи данных.

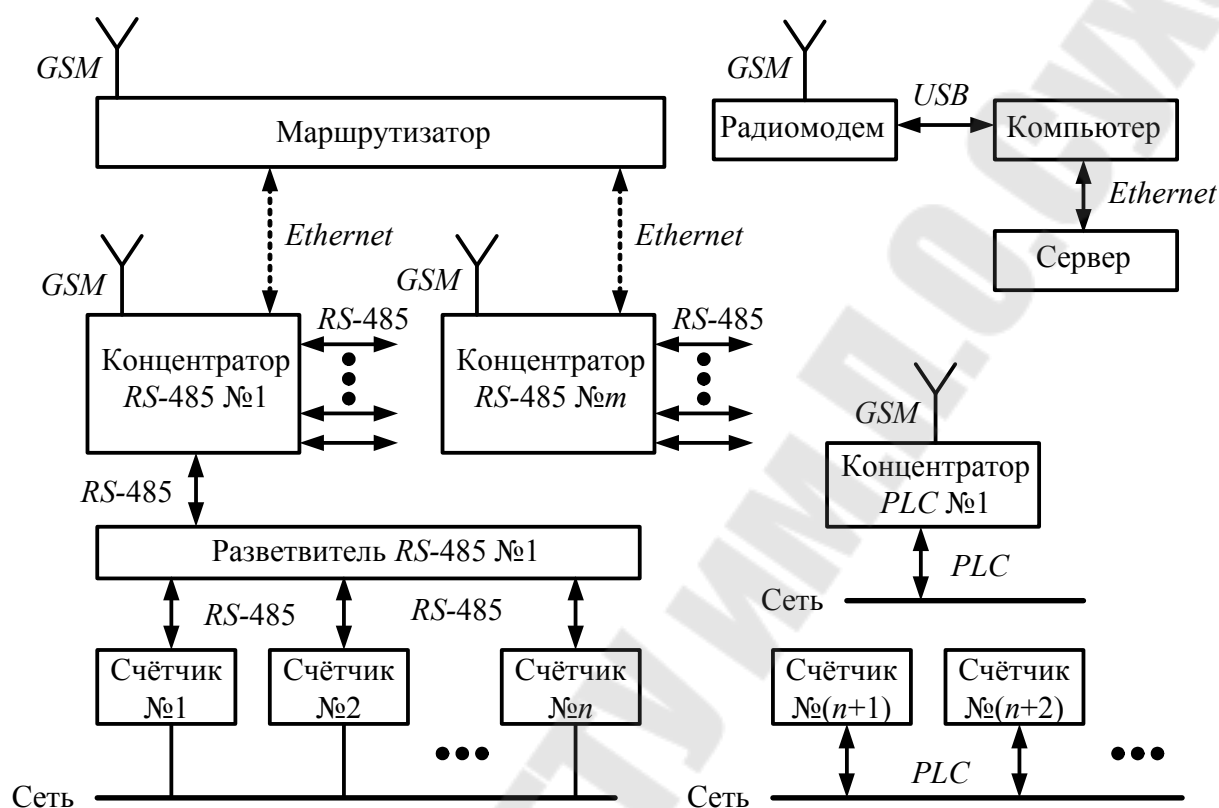


Рис. 5.8. Структурная схема АСКУЭ

Схема подключения четырёх счётчиков электроэнергии к концентратору по интерфейсу RS485 показана на рис. 5.9.

Монтаж участков сети АСКУЭ выполняют в специальных **шкафах АСКУЭ** (рис. 5.10).

В концентраторах формируются радиальные участки информационной сети АСКУЭ. К каждому разъёму концентратора по интерфейсу RS485 подключается магистральный участок сети.

Выходными интерфейсами концентраторов являются *Ethernet* или сотовая связь *GSM*. В крупных сетях АСКУЭ данные с концентраторов передаются в **маршрутизаторы**, являющиеся сложными концентраторами. В небольших сетях данные могут быть переданы сразу на терминальный компьютер.

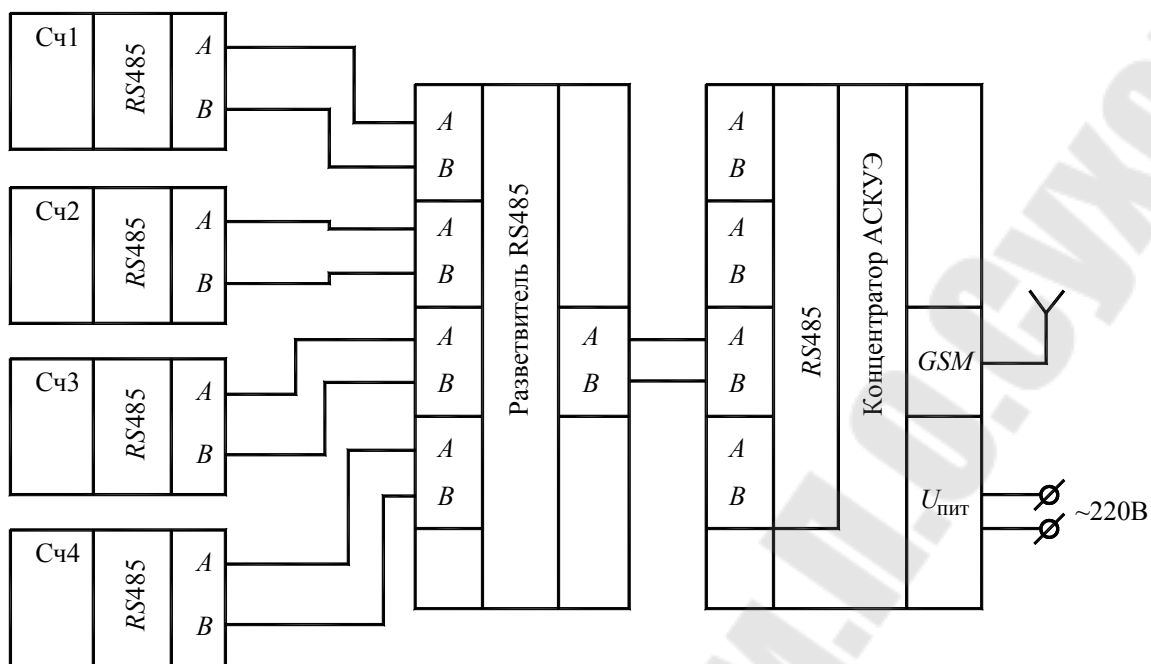


Рис. 5.9. Фрагмент схемы магистрального участка сети АСКУЭ

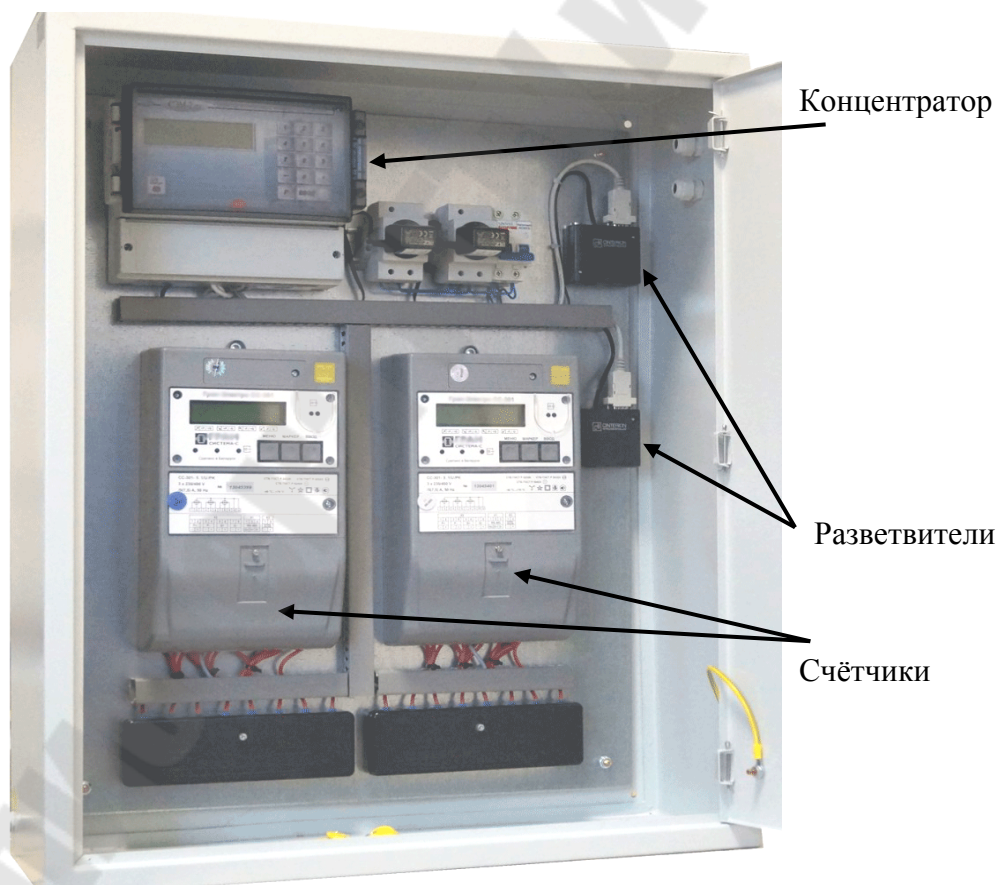


Рис. 5.10. Шкаф АСКУЭ

Верхний уровень АСКУЭ – это компьютеры главного энергетика предприятия, специалиста энергонадзора и диспетчера, оснащенные радиомодемами сотовой связи и подключенные к локальной сети по интерфейсу *Ethernet*. Принятые по сети параметры энергопотребления сохраняются в файлах-архивах на серверах.

Программное обеспечение компьютеров верхнего уровня выполняет следующие основные функции:

- параметризацию счётчиков;
- настройку концентраторов;
- считывание данных со счётчиков;
- статистическую обработку параметров электропотребления;
- анализ потерь электроэнергии в электрических сетях;
- выявление фактов хищений электроэнергии.

В базе данных АСКУЭ каждый счётчик электроэнергии имеет следующие атрибуты, то есть сопутствующие параметры:

- код сетевого адреса;
- номер разъёма концентратора;
- почтовый адрес потребителя;
- паспортные данные ответственного лица потребителя;
- имя файла для хранения данных на сервере;
- параметры тарификации;
- дополнительную информацию.

Большая часть этой информации хранится в памяти компьютеров верхнего уровня и концентраторов. Реже она записывается непосредственно в память счётчика.

При программировании АСКУЭ выполняют два вида операций:

- программирование концентраторов на запись;
- программирование концентраторов на чтение.

В первом случае осуществляется запись в память концентратора атрибутов счётчиков и затем непосредственно параметризация счётчиков, то есть запись в их память временных интервалов для тарифных зон и тарифных сезонов, корректировка показаний часов реального времени, запись значений коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов и так далее.

Во втором случае в концентратор записывают перечень параметров, которые необходимо считывать со счётчиков. Это могут быть текущие значения накопленной счётчиком энергии, данные из архива счётчика по накопленной энергии, значения средней мощности, гра-

фики нагрузки, файлы событий и неисправностей, показания часов реального времени и другие параметры.

Считывание данных со счётчиков осуществляется циклически через запрограммированные оператором интервалы времени или спорадически, то есть по запросу оператора.

Современная тенденция в организации АСКУЭ – это включение АСКУЭ в концепцию *Smart Grid* (разумная сеть) с расширением использования возможностей новых стандартов сотовой связи, таких как 5G. Эта тенденция предполагает оснащение счётчиков электроэнергии соответствующими радиомодемами и встроенными реле для управления нагрузкой.

6 ИЗМЕРИТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Для задач энергетики наиболее важными неэлектрическими величинами, которые необходимо контролировать, являются температура, давление, уровень расхода жидкости и механические перемещения.

6.1 Методы измерения температуры

Различают методы контактного и бесконтактного измерения температуры.

В случае контактных методов применяют температурные датчики следующих видов:

- металлические термометры сопротивления (ТС);
- термоэлектрические преобразователи (ТП) – термопары;
- полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы).

6.1.1 Методы контактного измерения температуры

Металлические термометры сопротивления обеспечивают высокую точность, хорошие линейность, стабильность и повторяемость характеристик. Основные недостатки – возможное значительное влияние на результат измерения сопротивления проводников линии связи, необходимость дополнительного источника питания (напряжения или тока). Кроме того, возможен саморазогрев ТС от протекающего по нему тока, что может привести к дополнительным погрешностям.

Термопары не требуют вспомогательного источника питания, имеют широкий диапазон измеряемых температур. Однако им присуща заметная нелинейность характеристики преобразования. Некоторые проблемы создает необходимость учёта (или компенсации) влияния температуры свободных концов ТП на результат измерения. Кроме того, малое выходное напряжение (и сравнительно невысокая чувствительность) требует довольно чувствительных вторичных измерительных преобразователей (усилителей).

Термометры сопротивления и термопары отличаются достаточно высокой точностью, стабильностью и повторяемостью своих характеристик преобразования.

Термисторы (полупроводниковые сопротивления), в свою очередь, имеют высокую чувствительность, простую двухпроводную схему включения (не требующую компенсации температуры свободных концов, как у ТП), сравнительно высокое быстродействие. Но при этом у них есть серьезные недостатки: резко нелинейная характеристика преобразования и плохая повторяемость характеристики. Кроме того, они имеют сравнительно узкий диапазон измеряемых температур.

Приборы и преобразователи на основе металлических ТС используют зависимость электрического сопротивления металлов R_T от температуры θ . У чистых металлов эта зависимость практически линейна и количественно выражается следующим образом:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\theta), \quad (6.1)$$

где R_0 – сопротивление при температуре 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления.

Значения температурного коэффициента сопротивления α у современных ТС лежат в диапазоне $0,003\dots 0,006\ 1/^\circ\text{C}$, что соответствует приращению сопротивления примерно на $0,3\dots 0,6\ \%$ от исходного (номинального) значения (при 0°C) при увеличении температуры на 1°C .

Наиболее часто используемые материалы: медь (для диапазона температур $-50\dots+200^\circ\text{C}$) и платина (для диапазона $-250\dots +1000^\circ\text{C}$). Номинальные значения сопротивления ТС определяются конструкцией и материалом датчика, конкретной градуировкой и лежат в диапазоне $10\dots 1000\ \text{Ом}$ (при 0°C или при комнатной температуре).

В зависимости от специфики конкретных задач измерений применяются двухпроводное, трехпроводное или четырёхпроводное подключение ТС к измерителю. Наибольшее распространение получила четырёхпроводная схема, полностью соответствующая схеме измерения малых сопротивлений, рассмотренной в п. 4.1.

Задача измерения температуры с помощью ТС совпадает с задачей измерения малых сопротивлений, за исключением последнего этапа, когда в программном обеспечении прибора будет выполнен расчёт температуры на основе соотношения (6.1).

Компактные цифровые термометры на основе термопар являются в настоящее время основным и самым массовым инструментом в температурных измерениях.

Выходной сигнал термопары – постоянное напряжение – довольно легко может быть преобразован в цифровой код или измерен простыми средствами (например, малогабаритным цифровым мультиметром). Термопары могут быть подключены для дальнейшего преобразования к различным вторичным измерительным преобразователям (приборам) как аналоговым, так и цифровым, для статических и динамических измерений.

Диапазон температур, измеряемых с помощью ТП, довольно широк: от -200 до $+2000$ °С. Измерители на основе ТП отличаются высокой точностью и чувствительностью, хорошей повторяемостью характеристики преобразования. Обычный диапазон выходных напряжений составляет $0...50$ мВ (в зависимости от используемых в ТП материалов), типичный температурный коэффициент преобразования (чувствительность ТП) лежит в диапазоне $10...50$ мкВ/°С.

В основе ТП лежит термоэлектрический эффект, суть которого заключается в следующем. Если два проводника из различных металлов (сплавов) соединены в замкнутую цепь, причём температура одного соединения (спая) заметно отличается от температуры другого, то возникает термоЭДС E_T , значение которой зависит от разности температур спаев и характеристик материалов проводников. Если в разрыв свободных концов включен измерительный преобразователь или вольтметр V , то его показания будут определяться разницей температур ($\theta_1 - \theta_2$) (рис. 6.1).

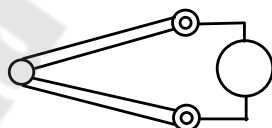


Рис. 6.1. Термопара

Зависимость термоЭДС от разности температур спаев нелинейна, но для небольших диапазонов температур, при невысоких точностных требованиях её можно считать линейной. И тогда значение термоЭДС термопары E_T определяется (в первом приближении) следующим образом:

$$E_T = S_T (\theta_1 - \theta_2), \quad (6.2)$$

где: S_T - чувствительность ТП (коэффициент преобразования); θ_1 – температура рабочего (так называемого «горячего») спаев; θ_2 – температура свободных (так называемых «холодных») спаев.

Для обеспечения однозначной зависимости термоЭДС от температуры θ_1 необходимо или поддерживать постоянное значение температуры θ_2 , или компенсировать её влияние на результат измерения. В настоящее время, как правило, применяют второй способ на базе электронных схем компенсации.

6.1.2 Методы бесконтактного измерения температуры

Любой объект, обладающий температурой выше абсолютного нуля ($-273\text{ }^\circ\text{C}$), имеет тепловое излучение. С ростом температуры увеличиваются амплитуда и частота колебаний молекул вещества тела.

Методы и приборы бесконтактного измерения основаны на количественной оценке инфракрасного (теплого) излучения объекта. Тепловое излучение обладает практически теми же свойствами, что и видимый человеком свет: распространяется прямолинейно, способно отражаться, преломляться, проникать сквозь некоторые тела, может быть сфокусировано оптической системой линз (не обязательно прозрачных) и т. п.

Бесконтактные методы измерения реализованы в различных инфракрасных (ИК) средствах измерения – термометрах и измерительных преобразователях, а также в оптических термометрах – **пирометрах**. Инфракрасные измерители обеспечивают измерение температур в широком диапазоне температур: $-50\dots+5000\text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 6.2 показана упрощённая структура ИК-термометра.

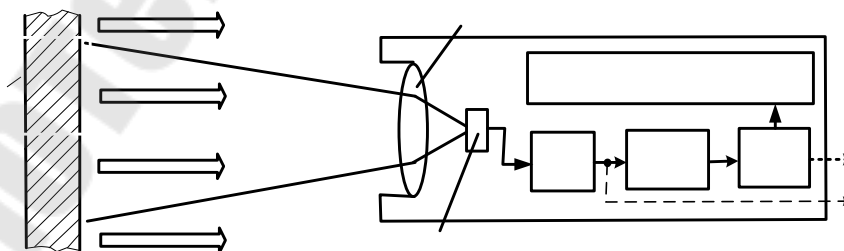


Рис. 6.2. Упрощённая структура ИК-термометра:
1 - объект; 2 - объектив; 3 - приёмник

Тепловое излучение поверхности объекта объективом прибора фокусируется на приёмник, усиливается и после АЦП записывается в память цифрового регистратора РГ.

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**.

Структурная схема тепловизора приведена на рис. 6.3.

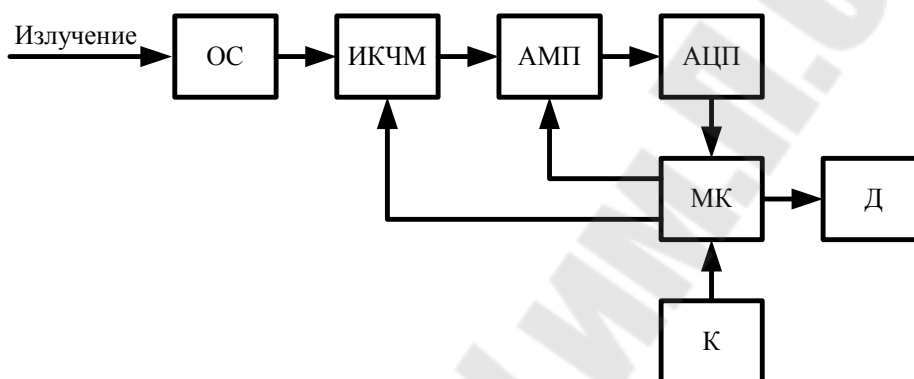


Рис. 6.3. Структурная схема тепловизора:

ОС – оптическая система; ИКЧМ – инфракрасно-чувствительная матрица; АМП – аналоговый мультиплексор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; Д – дисплей; К - клавиатура

Пользователь осуществляет настройку тепловизора и запуск его в работу с помощью клавиатуры К.

Тепловое излучение через оптическую систему ОС попадает на инфракрасно-чувствительную матрицу ИКЧМ, состоящую из множества фоточувствительных ячеек – **пикселей**. Каждый пиксель вырабатывает напряжение, пропорциональное пришедшему на него излучению.

Работой тепловизора управляет микроконтроллер МК, представляющий собой микропроцессорную систему в рамках одной микросхемы.

С помощью аналогового мультиплексора АМП, выполняющего функции многопозиционного переключателя, микроконтроллер осуществляет сканирование матрицы. Это процесс происходит следующим образом. Вначале микроконтроллер передаёт в матрицу двоичный код, активизирующий её первую строку, а затем вырабатывает управляющие двоичные коды для мультиплексора таким образом, что

к его выходу последовательно подключаются все пиксели первой строки. В это же время АЦП преобразует аналоговые напряжения пикселей в соответствующие двоичные коды, поступающие в микроконтроллер. После опроса всей строки микроконтроллер активизирует вторую строку и далее процесс повторяется циклически. В результате в памяти микроконтроллера формируется массив двоичных кодов, пропорциональных интенсивности излучения, попадающего на соответствующие пиксели.

После сканирования матрицы микроконтроллер выполняет математические расчёты температуры, воспринятой каждым пикселем. Результаты расчётов он выводит в виде термограммы на цветной дисплей. При этом температуры для каждого пикселя отображаются 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.

Полученные термограммы тепловизор хранит в виде графических файлов со стандартными расширениями. Эти файлы могут быть считаны и переданы в компьютер. Их можно открывать и обрабатывать в специальных программах, что позволяет анализировать техническое состояние обследуемых объектов.

6.2 Измерительные преобразователи давления

В настоящее время используются разнообразные методы и средства измерения давления. Средства измерения давления (манометры, вакуумметры, барометры) по физическим эффектам, положенным в основу принципа действия первичного измерительного преобразователя (датчика), делятся на несколько групп.

Наибольшее распространение получили: **деформационные** (в которых значение деформации упругого чувствительного элемента пропорционально измеряемому давлению); **тензометрические** (основанные на тензометрическом эффекте материалов) средства измерения.

Для преобразования перемещения упругого элемента в электрический сигнал используются различные вторичные измерительные преобразователи: индуктивные/индукционные (меняется индуктивность катушки или взаимная индуктивность двух катушек), транс-

форматорные (меняется выходное напряжение трансформатора), резистивные (меняется сопротивление, например, тензодатчика), емкостные (меняется емкость датчика) и др. Рассмотрим некоторые из возможных вариантов преобразования давления в электрический сигнал.

Один из вариантов перехода к электрическому выходному сигналу представлен на рис. 6.4.

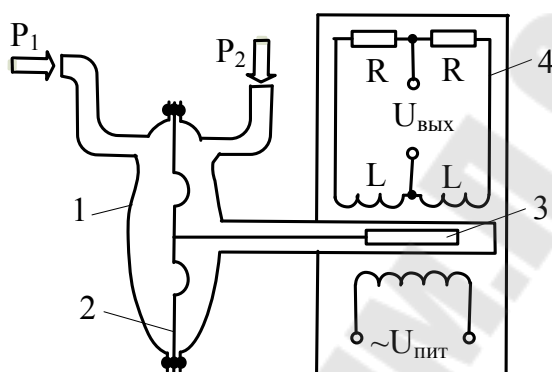


Рис. 6.4. Манометр с электрическим выходным сигналом:

1 - мембранная коробка; 2 - мембрана; 3 - сердечник; 4 - дифференциальный трансформаторный преобразователь

В основе конструкции механической части – мембранная коробка 1, герметично разделенная на две части упругой мембраной 2. Под воздействием разности входных давлений p_1 и p_2 поступающих в обе части коробки 1, мембрана 2 прогибается, перемещая при этом сердечник 3 дифференциального трансформаторного преобразователя 4.

Перемещение сердечника изменяет исходное равновесие мостовой схемы, образованной двумя одинаковыми половинами L вторичной обмотки трансформатора и двумя равными резисторами R . При этом выходной сигнал моста $U_{\text{вых}}$ изменяется пропорционально перемещению сердечника и, следовательно, измеряемому давлению или разности давлений p_1 и p_2 . Это выходное напряжение далее подаётся на измерительную часть прибора.

Сегодня всё большее распространение находят манометры с тензометрическими чувствительными элементами, которые закреплены на деформируемых под воздействием измеряемого давления поверхностях.

Тензометрический эффект проявляется в изменении электрического сопротивления проводников (или полупроводников) при изменении геометрии (например, при изгибе) проводника.

Тензорезисторы часто выполняются из тонкой металлической фольги (например, медной) и представляют собой достаточно длинные проводники, компактно уложенные в плоскости поверхности упругой пластины или мембраны (рис. 6.5).

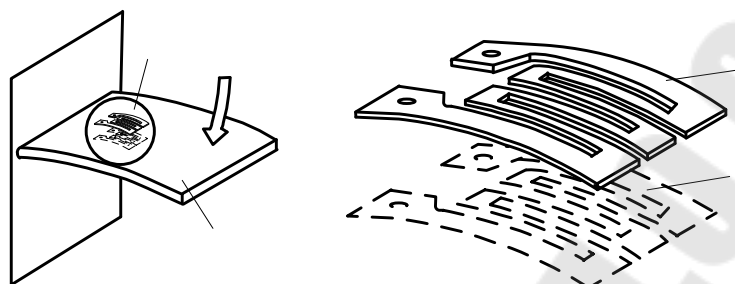


Рис. 6.5. Тензометрический эффект:

1 - упругая пластина; 2 - 1-й тензорезистор ($R_0 + \Delta R$); 3 - 2-й тензорезистор ($R_0 - \Delta R$)

Обычно (для повышения чувствительности измерения) устанавливают два тензорезистора - на противоположные поверхности пластины. Эти датчики жестко крепятся (приклеиваются) к пластине и изгибаются вместе с ней.

7 ПРИБОРЫ ДЛЯ УЧЁТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

7.1 Алгоритмы расчёта тепловой энергии

Тепловую энергию принято выражать в Калориях. При этом справедливо равенство: $1 \text{ кал} = 4,184 \text{ Дж}$. Это значит, что результат, полученный в Джоулях нужно разделить на 4,184, чтобы получить ответ в Калориях. Тогда за интервал времени от t_1 до t_2 приращение отданной тепловой энергии ΔQ равно:

$$\Delta Q = \frac{1}{4,184} \cdot c_{\text{уд}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} M(t) \cdot (\theta_1(t) - \theta_2(t)) \cdot dt, \text{ кал}, \quad (7.1)$$

где $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоёмкость теплоносителя, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; $M(t)$ – массовый расход теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; $\theta_1(t)$ – температура на входе теплоносителя, $^\circ\text{C}$; $\theta_2(t)$ – температура на выходе теплоносителя, $^\circ\text{C}$.

В свою очередь, массовый расход $M(t)$ рассчитывается следующим образом:

$$M(t) = \rho \cdot V(t) = \rho \cdot v(t) \cdot F, \quad (7.2)$$

где ρ – плотность теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $V(t)$ – объёмный расход теплоносителя, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$; $v(t)$ – скорость теплоносителя, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; F – площадь сечения трубопровода, м^2 .

Поставив (7.2) в (7.1), получим:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{1}{4,184} \cdot c_{\text{уд}} \cdot \rho \cdot F \cdot \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot (\theta_1(t) - \theta_2(t)) \cdot dt = \\ &= K \cdot \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot (\theta_1(t) - \theta_2(t)) \cdot dt, \end{aligned} \quad (7.3)$$

где: K – коэффициент, характеризующий параметры теплоносителя и переход от Джоулей к Калориям.

Переходя от интеграла (7.3) к приближённой сумме, запишем алгоритм расчёта тепловой энергии:

$$\Delta Q \approx K \cdot \sum_{i=1}^n v_i \cdot (\theta_{1,i} - \theta_{2,i}) \cdot \Delta t = K \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n v_i \cdot (\theta_{1,i} - \theta_{2,i}), \quad (7.4)$$

где i – номер шага расчёта; Δt – период дискретизации; n – количество шагов расчёта на расчётном интервале.

Из алгоритма (7.4) следует, что для определения тепловой энергии необходимо знать плотность и удельную теплоёмкость теплоносителя, сечение трубопровода и в режиме реального времени измерять скорости теплоносителя и его температур на входе и выходе. Иногда дополнительно измеряется давление в трубопроводе, по значению которого счётчик тепловой энергии корректирует значение плотности жидкости.

7.2 Измерительные преобразователи расхода жидкости

Как показано в п. 7.1, для измерения тепловой энергии необходимо осуществлять непрерывные измерения скорости движения теплоносителя по трубопроводу. Устройства, реализующие эту операцию, называются измерительными преобразователями расхода или **расходомерами**.

Для измерения скорости жидкости в промышленности и для бытовых потребителей применяют следующие виды расходомеров:

- турбинные;
- электромагнитные;
- ультразвуковые;
- вихревые.

Турбинный расходомер представляет собой небольшую турбину, установленную по направлению течения жидкости. Электронное устройство, подключенное к обмотке турбины, должно измерять скорость вращения турбины. Главные недостатки такого типа расходомеров – низкая надёжность и сопротивление потоку жидкости. По-

этому турбинные расходомеры сейчас считаются морально устаревшими.

Одним из самых распространённых типов расходомеров на сегодняшний день являются **электромагнитные расходомеры**. Конструкция такого расходомера показана на рис. 7.1.

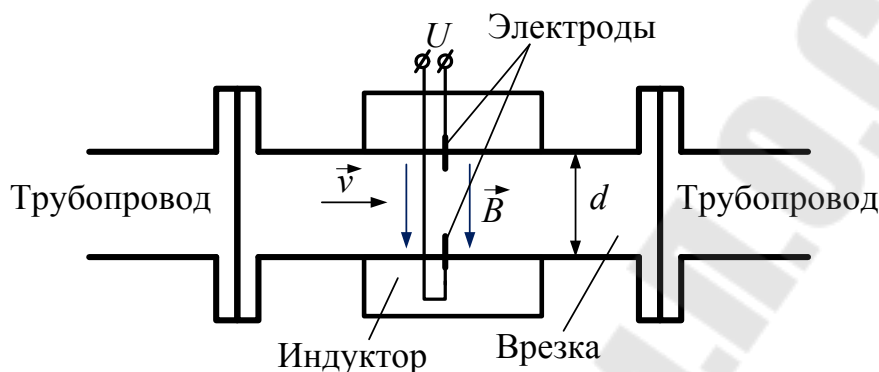


Рис. 7.1. Конструкция электромагнитного расходомера

В разрез металлического трубопровода вставляется пластмассовая врезка диаметром d . На врезке размещена катушка индуктора, создающего магнитное поле с индукцией B . На заряженные частицы жидкого теплоносителя, движущегося со скоростью v , действуют сила Лоренца $F_{\text{л}}$ и сила Кулона $F_{\text{к}}$, которые стремятся уравновеситься:

$$F_{\text{л}} = B \cdot v \cdot q = F_{\text{к}} = E \cdot q, \quad (7.5)$$

где q – средний заряд частиц; E – напряжённость электрического поля.

Действие сил Лоренца и Кулона приводит к разделению зарядов и появлению разности потенциалов U между электродами, находящимися с противоположных сторон неметаллической врезки. Связь между напряжением U на электродах и напряжённостью электрического поля E выражается известной формулой:

$$U = E \cdot d, \quad (7.6)$$

где: d – диаметр врезки.

Выразив величину v из выражения (7.5) с учётом формулы (7.6), получим:

$$v = \frac{U}{B \cdot d}. \quad (7.7)$$

Таким образом, скорость течения жидкости v пропорциональна напряжению U . Расчёт по формуле (7.7) и должен выполняться в программном обеспечении соответствующего измерительного прибора.

В **ультразвуковом расходомере** также применяется специальная врезка в трубопровод, в которой размещаются генераторы и приёмники ультразвуковых волн, выполняемые на основе пьезоэлементов (рис. 7.2).

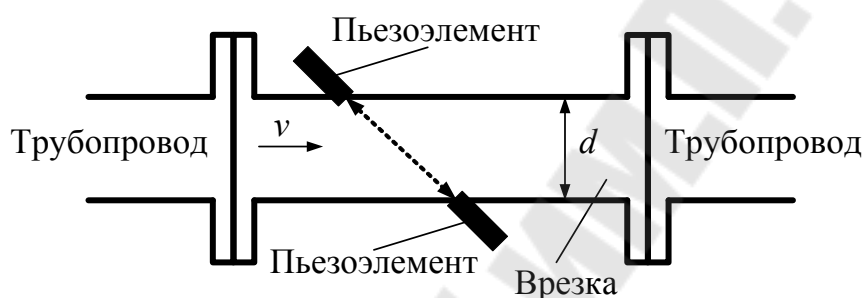


Рис. 7.2. Конструкция ультразвукового расходомера

Пьезоэлементы могут быть одновременно и излучателями и приёмниками ультразвуковых волн.

Ультразвуковой расходомер работает следующим образом. Вначале генерируется ультразвуковая волна по направлению потока жидкости и измеряется время хода волны t_1 . Затем волна генерируется против потока и измеряется время хода t_2 . Разность $t_2 - t_1$ пропорциональна скорости потока v .

Во врезке **вихревого расходомера** присутствует тело обтекания, за которым формируются вихри текущей жидкости (рис. 7.3), которые называются вихревой дорожкой Кармана.

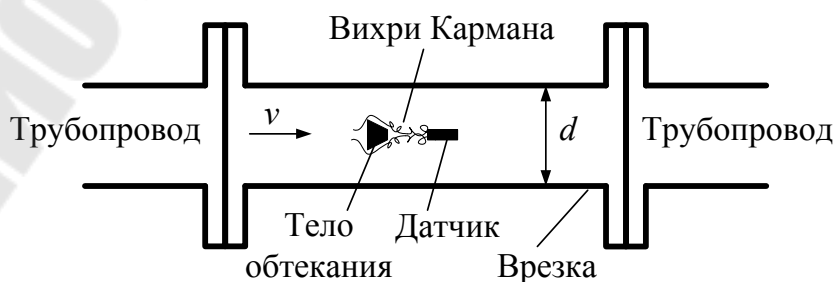


Рис. 7.3. Конструкция вихревого расходомера

Частота f вихрей Кармана пропорциональна скорости жидкости v в соответствии с формулой:

$$f = \frac{S \cdot v}{w}, \quad (7.8)$$

где S – число Струхалия (безразмерная константа $\approx 0,2$); w – ширина тела обтекания.

За телом обтекания находится датчик, реагирующий на отклонения потока и позволяющий микропроцессорным устройствам измерять значение f , а затем рассчитывать значение v в соответствии с формулой (7.8).

7.3 Счётчики тепловой энергии

Рассмотрим промышленный счётчик тепловой энергии (теплосчётчик) СКМ-2 (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Счётчик тепловой энергии СКМ-2

Теплосчетчик СКМ-2 предназначен для измерения тепловой энергии, которую поглощает или отдает в системах водяного тепло-снабжения теплоносящая жидкость, а также для измерения количества воды и для организации информационных систем баз данных.

В состав счётчика входят следующие элементы:

- микропроцессорный вычислитель;
- электромагнитные расходомеры (до 5 шт.);

- датчики температуры (до 5 шт.);
- датчики давления (до 5 шт.).

Функциональная схема подключения теплосчётчика СКМ-2 приведена на рис. 7.5.

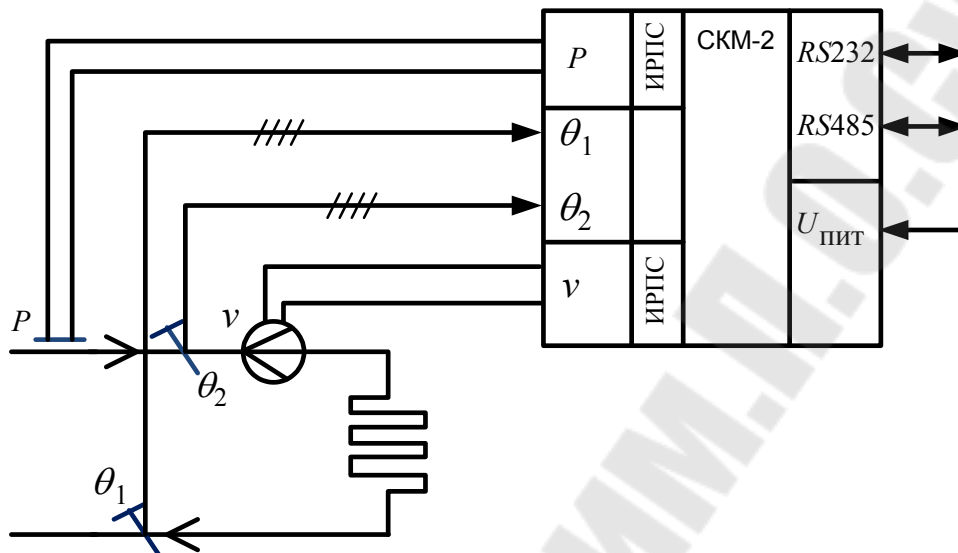


Рис. 7.5. Функциональная схема подключения теплосчётчика СКМ-2

Датчики температур θ_1 и θ_2 , представляющие собой термометры сопротивления, устанавливаются в специальные гнезда в трубопроводе. Каждый из них посредством четырёхжильных экранированных сигнальных кабелей (четырёхпроводный метод измерения) подключается к соответствующим входам вычислителя.

Выход каждого расходомера является токовым по аналоговому интерфейсу ИРПС (см. п. 2.4). Это значит, что выходной ток расходомера пропорционален скорости течения жидкости v . Этот ток по двухпроводному сигнальному кабелю подаётся на соответствующий вход вычислителя.

Датчики давления P также оснащаются выходом ИРПС и подключаются к вычислителю.

Вычислитель счётчика СКМ-2 выполняет расчёты в соответствии с алгоритмами (7.4), (7.7). Результаты измерения учтённой тепловой энергии отображаются в Мкал, МВт·ч или МДж.

Кроме энергии можно просматривать дополнительные значения:

- массы или объёма расхода воды;

- интервалов времени, когда расход воды меньше или больше заданного минимального или максимального порога;
- средние значения температуры в контролируемых точках за час, месяц и год.

Вычислитель может быть подключен к информационной сети посредством интерфейса *RS485*, или к компьютеру через интерфейс *RS232*.

По аналогии с АСКУЭ в последние годы реализуются системы АСКУТ – автоматические системы контроля и учёта тепловой энергии. Их структура подобна АСКУЭ. Удалённый обмен данными также осуществляется через концентраторы преимущественно с помощью сотовой связи.

8 ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Диагностическими называют приборы, позволяющие определять корректность работы и техническое состояние энергооборудования.

8.1 Микропроцессорные вольтамперфазометры

Вольтамперфазометры (ВАФ) применяются для контроля показателей трёхфазной электрической сети переменного тока, а также для проверки правильности подключения различных устройств к трёхфазной сети.

Главным отличительным признаком ВАФ от других измерительных приборов является возможность анализа векторных диаграмм. На основе этого анализа можно установить правильность чередования фаз, а также правильность направления токов в трёхфазной системе.

При подключении приборов к трёхфазной сети персонал может допустить следующие ошибки:

- нарушить полярность подключения токов;
- нарушить чередование фаз токов;
- нарушить чередование фаз напряжений.

На рис. 8.1.а показан пример нарушения полярности подключения тока фазы «А».

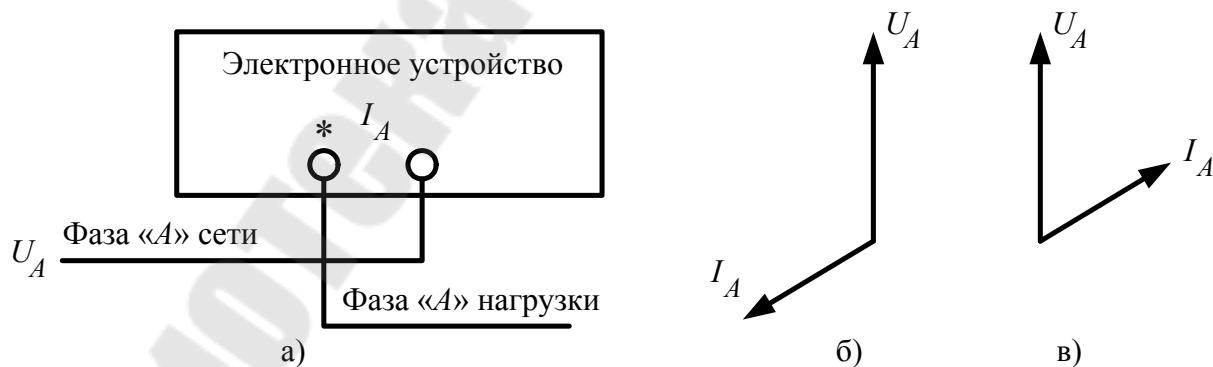


Рис. 8.1. Пример ошибки подключения цепи тока:

а – схема подключения с ошибкой; б – векторная диаграмма для схемы с ошибкой;
в – векторная диаграмма для верного подключения

При анализе векторной диаграммы нарушение полярности подключения можно выявить по фазовому сдвигу между фазным напря-

жением и соответствующим линейным током. Если фазовый сдвиг больше, либо равен 90° (рис. 8.1.б), то это свидетельствует о нарушении полярности тока, за исключением ситуации, когда в рассматриваемой системе возможна смена направления активной мощности.

Нарушение полярности тока на векторной диаграмме проявляется поворотом этого тока на 180° по отношению к его расположению при отсутствии нарушения (рис. 8.1.в).

Пример нарушения чередования фаз напряжения демонстрирует рис. 8.2.

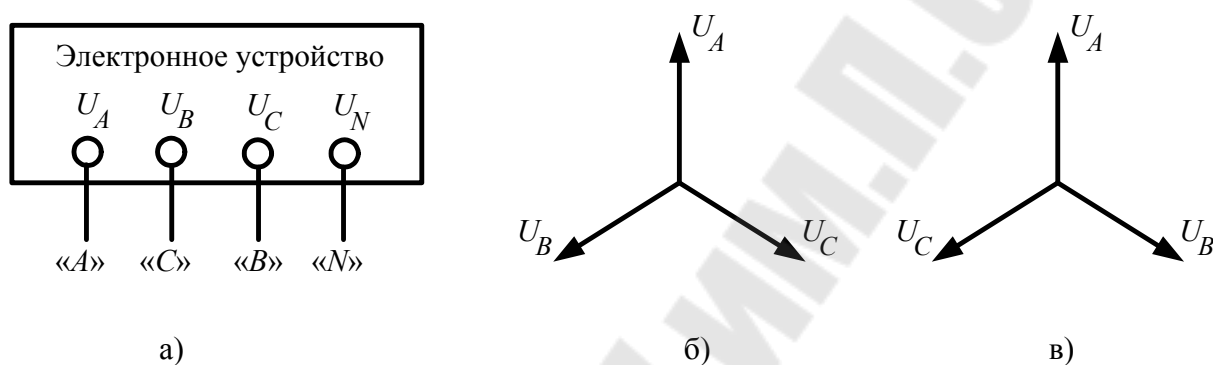


Рис. 8.2. Пример ошибки подключения цепи напряжений:

- а – схема подключения с ошибкой; б – векторная диаграмма для схемы с ошибкой;
в – векторная диаграмма для верного подключения

При верном чередовании фаз напряжение U_B должно отставать от напряжения U_A , а напряжение U_C должно опережать напряжение U_A .

Наибольшую трудность представляет выявление одновременно нескольких ошибок подключения. Так, например, может быть нарушена не только полярность подключения токов, но и чередование фаз.

Рассмотрим промышленный вольтамперфазометр ВФМ-3 (рис. 8.3).

Прибор предназначен для измерения действующего значения трёх фазных и трёх линейных напряжений, а также действующего значения силы трёх переменных токов с одновременным вычислением активной, реактивной и полной мощностей в трёх цепях, измерения частоты, угла сдвига фаз между токами и напряжениями одноименных фаз.



Рис. 8.3. Вольтамперфазометр ВФМ-3

На лицевой панели прибор имеет цветной жидкокристаллический дисплей и две кнопки: включение питания 1 и переключение режима измерения 2.

Измеряемые величины имеют следующие диапазоны:

- напряжение от 0 до 460 В;
- ток от 0 до 30 А;
- угол сдвига фаз от -180° до $+180^\circ$.

Связь с компьютером осуществляется посредством интерфейса *USB*.

Классическая схема подключения ВАФ ВФМ-3 приведена на рис. 8.4.

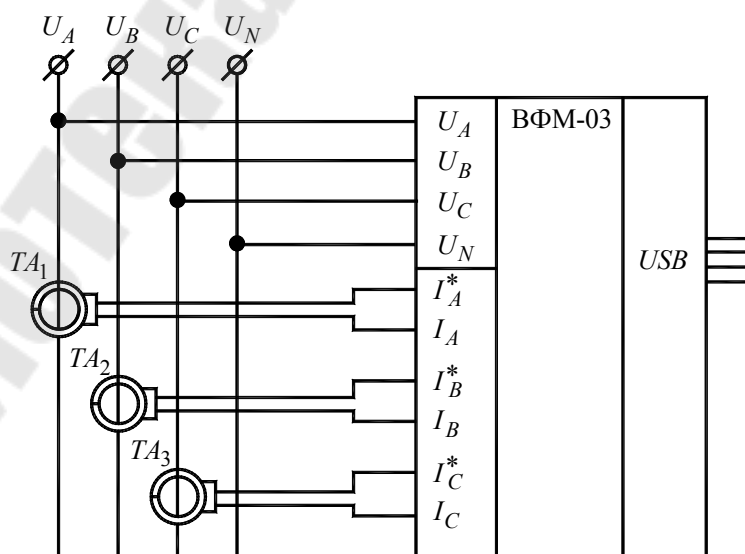


Рис. 8.4. Схема подключения ВАФ ВФМ-3

К цепям напряжения прибор подключается непосредственно с помощью зажимов типа «крокодил», а к цепям тока – через токовые клещи TA_1 – TA_3 .

Прибор ВФМ-3 имеет два экрана для отображения информации. На первом экране отображаются значения по напряжениям, токам и фазовым сдвигам между ними, а также векторные диаграммы (рис. 8.5).



Рис. 8.5. Экран №1 прибора ВФМ-3

На втором экране можно видеть значения мощностей (рис. 8.6).



Рис. 8.6. Экран №2 прибора ВФМ-3

ВАФ ВФМ-3 комплектуется тремя токовыми клещами (рис. 8.7).



Рис. 8.7. Токовые клещи для прибора ВФМ-3

Дополнительной особенностью ВАФ ВФМ-3 является возможность измерять фазовые сдвиги между линейными напряжениями и фазными токами. Для этого измерительный щуп «N» напряжения можно подключить ко второй из измеряемых фаз, соединив предварительно с первой фазой щуп с названием этой фазы.

8.2 Высоковольтные испытательные установки

Существует класс специализированных приборов, использующихся в высоковольтных испытательных лабораториях. Эти приборы характеризуются тем, что имеют высоковольтный блок, формирующий постоянное или переменное напряжение выше 1 кВ. В некоторых случаях значение этого напряжения может превышать 100 кВ.

Высоковольтные испытательные приборы применяют для следующих целей:

- испытание изоляции на электрическую прочность;
- определение диэлектрических параметров изоляции.

Вначале изучим **аппарат для испытания диэлектриков АИД-70Ц** (рис. 8.8).



Рис. 8.9. Аппарат для испытания диэлектриков АИД-70Ц

Аппарат предназначен для проверки электрической прочности изоляции постоянным напряжением до 70 кВ и переменным напряжением с действующим значением до 50 кВ.

В состав аппарата входит следующий комплект оборудования: пульт управления, высоковольтный генератор, принтер, соединительные кабели, провод для заземления.

Высоковольтный генератор содержит:

- высоковольтный трансформатор, предназначенный для получения высокого напряжения;
- однополупериодный выпрямитель, собранный из последовательно соединенных высоковольтных диодов;
- высоковольтный резистивный делитель, предназначенный для получения сигнала пропорционального выходному напряжению аппарата;
- высоковольтный переключатель с приводом от соленоида, предназначенный для замыкания диодов при работе на переменном напряжении и для замыкания высоковольтного вывода генератора через обмотку высоковольтного трансформатора на «землю» после выключения высокого напряжения и при выключении аппарата;
- плату защиты, предназначенную для предварительного измерения и защиты измерительных цепей от электрических помех и перенапряжений.

Корпус генератора заполнен трансформаторным маслом, являющимся электроизолятором и теплоносителем. На корпусе имеется клемма для подключения защитного заземления.

Высоковольтный генератор устанавливается на некотором расстоянии от пульта управления и высоковольтным вводом подключается к испытываемой изоляции. Второй контакт генератора, как и второй контакт испытываемой изоляции должны быть заземлены.

Внутри корпуса пульта управления установлен автотрансформатор, подсоединённый через привод к ручке регулирования высокого напряжения на лицевой панели. В процессе проведения испытаний необходимо с помощью ручки плавно повышать напряжение. На дисплее прибора отображаются значения подаваемого напряжения, тока через испытываемую изоляцию, а также дополнительная информация (рис. 8.10).



Рис. 8.9. Информация на дисплее аппарата АИД-70Ц

При достижении значения тока на выходе высоковольтного генератора 10 мА при постоянном напряжении или 50 мА при переменном напряжении, срабатывает защита, отключающая высокое напряжение.

Далее рассмотрим **установку для испытания трансформаторного масла Тангенс-3м-3** (рис. 8.11).



Рис. 8.10. Установка Тангенс-3М-3:

1,2,3 – измерительные ячейки; 4 – прижимные контакты; 5 – крышка испытательного отсека с встроенным термостатом; 6 – блок управления

Образцы жидких диэлектриков (например, трансформаторное масло) заливают в специальные измерительные ячейки, которых в данной установке три штуки. Эти ячейки устанавливаются в испытательный отсек с высоковольтным генератором и электронагревателем.

В процессе работы установка формирует высоковольтное переменное напряжение, подаёт его на измерительные ячейки и на встроенную образцовую ёмкость по схеме моста переменного тока. Далее программное обеспечение измерительного блока выполняет измерение необходимых напряжений, токов, фазовых сдвигов между ними, и рассчитывает значения **тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$** и ёмкости C_x образцов жидких диэлектриков. При этом связь между блоком управления и испытательным отсеком осуществляется посредством радиоканала.

Основные технические характеристики установки:

- диапазон измерения $tg\delta$: от 10^{-4} до 0,99;
- диапазон измерения C_x : от 5 пФ до 100 пФ;
- диапазон испытательного напряжения: от 1,5 кВ до 2 кВ.

В процессе измерений можно исследовать зависимость $tg\delta$ от температуры. Для этого в меню прибора устанавливается значение требуемой температуры нагрева диэлектрика и запускаются измерения. Прибор вначале отображает значения C_x и $tg\delta$ при комнатной температуре, а затем включает электронагреватель. При достижении необходимой температуры осуществляется операция термостатирования, то есть поддержание этой температуры в течение некоторого времени для равномерного прогрева измерительных ячеек. Затем на экране прибора появляются новые значения C_x и $tg\delta$.

Если предварительно измерить ёмкость C_0 пустой ячейки, то можно определить **относительную диэлектрическую проницаемость** испытуемого диэлектрика по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_0}. \quad (8.1)$$

Перед измерениями выполняется операция сушки пустых ячеек.

Для определения **электрической прочности жидких диэлектриков** выпускаются специальные приборы, такие как УИМ-90м (рис. 8.11).



Рис. 8.11. Установка УИМ-90м

Установка УИМ-90м предназначена для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков. Испытания проводятся переменным напряжением в диапазоне от 0 до 80 кВ.

Установка имеет испытательный отсек, где размещается измерительная ячейка. Испытательный отсек закрывается прозрачной крышкой, снабжённой блокировкой. При открытой крышке включение высокого напряжения блокируется.

Справа от испытательного отсека расположена панель управления установкой, содержащая элементы управления и индикации.

Испытания проводят следующим образом.

Сосуд с пробой жидкого диэлектрика несколько раз осторожно переворачивают вверх дном с тем, чтобы содержащиеся в пробе случайные загрязнения равномерно распределились по всему объёму жидкости. При этом избегают интенсивного встряхивания во избежание попадания в жидкость пузырьков воздуха. Непосредственно после этого небольшим количеством жидкости ополаскивают ячейку, затем медленно заполняют ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости стекала по её стенке, и не образовывалось пузырьков воздуха. При наличии в жидкости пузырьков воздуха их следует удалить осторожным перемешиванием жидкости стеклянной палочкой. Через 10 минут после заполнения ячейки на образец подают электрическое напряжение и фиксируют значение пробивного напряжения.

При одном заполнении ячейки жидким электроизоляционным материалом осуществляют шесть последовательных пробоев с интервалами между каждым из них, равными 5 мин. После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешивают для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства, не допуская при этом образования воздушных пузырьков.

Для одной пробы жидкого диэлектрика должно быть проведено шесть пробоев.

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения $\bar{U}_{\text{пр}}$ вычисляют по формуле:

$$\bar{U}_{\text{пр}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (U_{\text{пр}})_i, \quad (8.2)$$

где $(U_{\text{пр}})_i$ – значение, полученное при последовательных пробоях, кВ;
 n – число пробоев.

Среднеквадратическую ошибку σ_u пробивного напряжения определяют по формуле:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((U_{\text{пр}})_i - \bar{U}_{\text{пр}})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (8.3)$$

Значение пробивного напряжения должно отвечать нормированному значению коэффициента вариации V , вычисленного по формуле:

$$V = \frac{\sigma_u \cdot 100}{\bar{U}_{\text{пр}}} \quad (8.4)$$

Если значение коэффициента вариации превышает 20%, то в этом случае дополнительно производят еще одно заполнение испытательной ячейки порцией жидкости из того же сосуда с пробой жидкости, проводят еще шесть определений пробивного напряжения и для расчета по формулам (8.2)–(8.4) число пробоев n берут равным 12. Если и в этом случае коэффициент вариации превышает 20%, качество диэлектрика следует считать неудовлетворительным.

Электрическая прочность диэлектрика рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{\bar{U}_{\text{пр}}}{h}, \text{ кВ/мм} \quad (8.5)$$

где h – расстояние между электродами в измерительной ячейке.

Стандартное значение h составляет 2,5 мм.

8.3 Приборы для испытания коммутационных аппаратов

Промышленностью выпускаются испытательные электронные приборы, как для низковольтных, так и для высоковольтных коммутационных аппаратов.

Прибор ВЕГА-500 (рис. 8.13) предназначен для испытания автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током (дифавтоматов).



Рис. 8.12. Прибор ВЕГА-500

Подключается прибор к одной из фаз на выходе аппарата и защитному проводнику PE или контуру заземления (рис. 8.14).

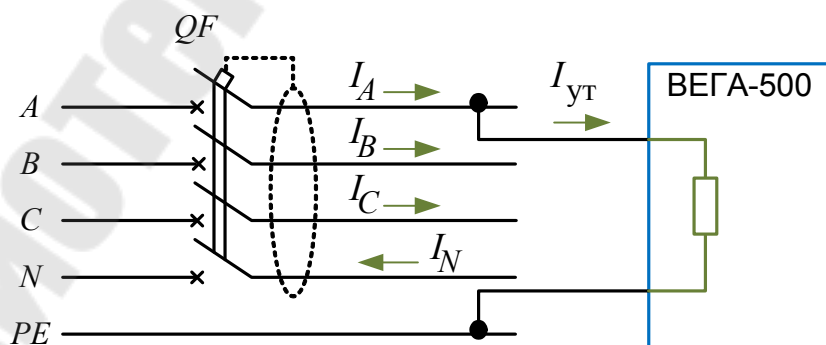


Рис. 8.13. Схема подключения прибора ВЕГА-500

Через внутреннее сопротивление прибора протекает ток утечки $I_{ут}$, который и является дифференциальным током ΔI :

$$\Delta \underline{I} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C - \underline{I}_N = \underline{I}_{ут}, \quad (8.6)$$

где символ подчёркивания обозначает комплексные величины.

Отключение испытуемого аппарата происходит, когда значение тока утечки превышает значения тока срабатывания.

Прибор ВЕГА-500 осуществляет два вида испытаний: измерение тока срабатывания и измерение времени срабатывания. В первом случае прибор постепенно увеличивает значение тока утечки до момента отключения выключателя. Во втором случае формируется стандартное значение тока отключения выключателя и измеряется время отключения. Опыт повторяется для двукратного и пятикратного значений тока.

Далее изучим **комплектное испытательное устройство Сатурн-М2** (рис. 8.13).

Устройство предназначено для проверки характеристик низковольтных автоматических выключателей переменного тока с электромагнитными, тепловыми и электронными расцепителями, а также выключателей, управляемых дифференциальным током.



Рис. 8.14. Испытательное устройство САТУРН-М2

Функциональные возможности устройства:

- проверка характеристик классических автоматических выключателей (автоматов) при токах короткого замыкания или перегрузки;
- проверка характеристик автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током (дифавтоматов);
- выдача и измерение токов синусоидальной и пульсирующей формы;
- самодиагностика;
- передача результатов измерений в компьютер по интерфейсу *USB*.

Основные технические характеристики:

- выдача переменного тока нагрузки в диапазоне от 0,2 до 200 А;
- регулировка тока короткого замыкания сети в диапазоне от 25 до 2000 А;
- регулировка переменного тока утечки в диапазоне от 1 до 2000 мА;
- регулировка пульсирующего тока утечки в диапазоне от 1 до 1400 мА;
- предел основной приведенной погрешности измерения силы переменного тока нагрузки $\pm(1,5 + 3 \text{ ед. мл. разр.})\%$;
- диапазон задания длительности протекания тока от 0,02 до 7200 с;
- измерение времени срабатывания в диапазоне от 0,001 до 7200 с.

Далее рассмотрим **устройство для проверки высоковольтных выключателей РМЕ-500** (рис. 8.15).

Прибор предназначен для контроля правильности работы выключателей среднего и высокого класса напряжений и рассчитан на проведение испытаний в полевых условиях.



Рис. 8.15. Прибор PME-500

На лицевой панели прибора отсутствуют какие-либо кнопки. Вместо этого предусмотрен сенсорный дисплей. Также имеется встроенный принтер.

Функциональные возможности прибора PME-500:

- проверка синхронности срабатывания контактов выключателя;
- измерение токов катушек включения и отключения выключателя;
- измерение сопротивления контактов выключателя;
- измерение скорости и ускорения контактов выключателя;
- запись осциллограмм;
- программируемые последовательности операций: В, О, В-О, О-В, О-В-О, В-О-В (В – включение; О – отключение).

Основные технические характеристики:

- измерение напряжения: до 360 В;
- измерение тока: до 50 А;

– измерение сопротивления контактов с разрешением 0,1 мкОм;

– ток, пропускаемый через контакты выключателя в режиме микроамметра: 0,1 А – при измерении времени срабатывания; 10 А – при измерении сопротивления.

Упрощённая схема подключения прибора приведена на рис. 8.17.

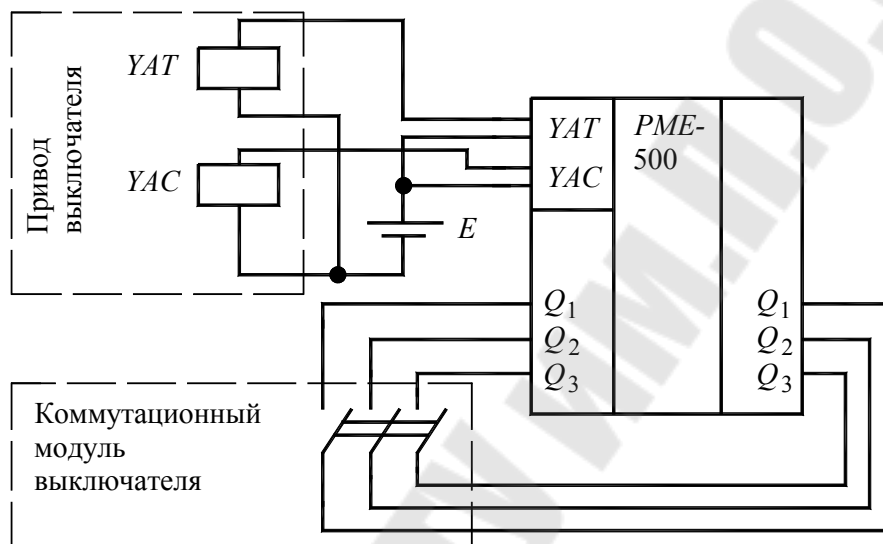


Рис. 8.16. Схема подключения прибора PME-500

Схема работает следующим образом. Прибор PME-500 коммутирует напряжение внешнего источника E на катушку отключения выключателя YAT или на катушку включения выключателя YAC через соответствующие входы. При этом происходит размыкание или замыкание контактов коммутационного модуля. Могут испытываться, как силовые контакты, так и блок-контакты выключателя. Далее прибор определяет параметры, перечисленные выше. Результаты отображаются на дисплее в виде цифр, масштабных полос или осциллограмм (рис. 8.17).

Для измерения скорости и ускорения контактов выключателя используется специальный внешний датчик (акселерометр), закрепляемый на подвижной части контактов.



Рис. 8.17. Графические результаты на дисплее прибора PME-500

8.4 Приборы для испытания электрических машин

Существует ряд специальных промышленных приборов для определения состояния электрических машин, то есть трансформаторов и электродвигателей. Эти приборы имеют достаточное количество входов и выходов для того, чтобы выполнить необходимые измерения при однократном подключении.

Вначале рассмотрим измеритель коэффициента трансформации СА-610 (рис. 8.19).



Рис. 8.18. Измеритель коэффициента трансформации СА-610

Прибор предназначен для измерения характеристик однофазных и трёхфазных трансформаторов, автотрансформаторов и других масштабных преобразователей напряжения и тока.

Функциональные возможности и технические характеристики прибора СА-610:

- измерение коэффициента трансформации напряжения в диапазоне от 0,8 до 10000;
 - измерение разности фаз между входным и выходным напряжениями;
 - измерение тока возбуждения в диапазоне от 0 А до 0,7 А;
 - проверка группы соединения обмоток;
 - ввод с клавиатуры названий объектов;
 - соединение с компьютером по интерфейсу RS232.
- Схема подключения прибора изображена на рис. 8.20.

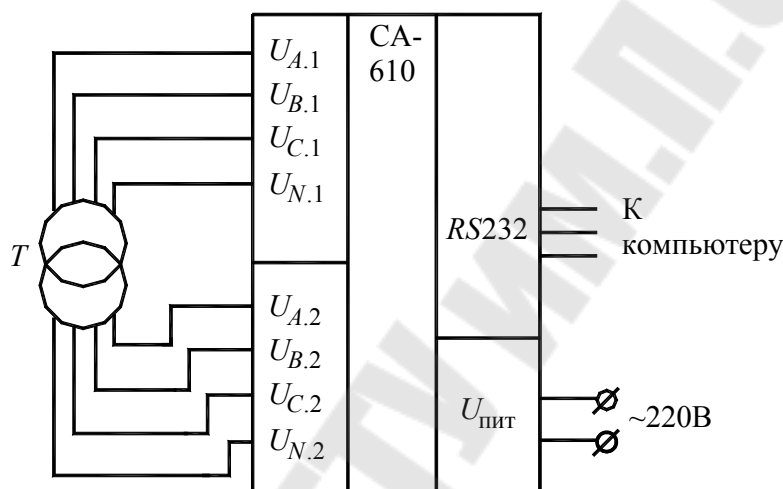


Рис. 8.19. Схема подключения прибора СА-610

Прибор генерирует трёхфазную систему напряжений на первичную обмотку трансформатора T , измеряет напряжения на вторичной обмотке и необходимые фазовые сдвиги. Возможные действующие значения формируемых напряжений составляют 1 В, 8 В, 40 В, 100 В и 200 В.

Далее изучим **индикатор дефектов обмоток электрических машин ИДО-07** (рис. 8.20).

Прибор ИДО-07 предназначен для контроля обмоток электрических машин напряжением до 1000 В (преимущественно, электродвигателей).

Конструктивно индикатор выполнен в виде портативного прибора, корпус которого состоит из двух пластмассовых крышек, стянутых резиновыми окантовками.

На лицевой панели расположены небольшой светодиодный дисплей и сигнальные светодиоды.



Рис. 8.20. Прибор ИДО-07

Из-за небольшого размера дисплея результаты измерений отображаются специальными символами, описанными в руководстве по эксплуатации прибора.

Функциональные возможности прибора:

- выявление междувитковых замыканий, обрыва фазы и неправильного соединения фаз в трёхфазных обмотках;
- выявление междувитковых замыканий в катушках, уложенных в пазы;
- выявление неудовлетворительного состояния изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками.

При проверке трёхфазной обмотки на наличие междувитковых замыканий, обрыва фазы и на правильность соединения фаз программное обеспечение прибора выполняет расчёт коэффициентов несимметрии K_n по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{н.1} = \frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \cdot 100\%; \\ K_{н.2} = \frac{I_B - I_C}{I_B + I_C} \cdot 100\%; \\ K_{н.3} = \frac{I_C - I_A}{I_C + I_A} \cdot 100\%. \end{array} \right. \quad (8.7)$$

Чем выше значения этих коэффициентов, тем выше вероятность, что в испытываемой электрической машине имеются неисправности, обуславливающие несимметрию токов в обмотках. Так при замыкании даже одного витка в катушке значение K_n превышает 10%.

При проверке катушек, уложенных в пазы, на наличие междувитковых замыканий принцип работы индикатора базируется на индуктировании импульсной ЭДС в проверяемой катушке. В случае наличия в последней короткозамкнутых витков происходит регистрация импульса магнитной индукции поля, создаваемого током короткого замыкания, протекающим по ним. Для этой цели в комплекте к прибору поставляется индукционный датчик.

При проверке состояния изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками принцип работы индикатора состоит в подаче на обмотку напряжения постоянного тока, определении сопротивления изоляции и сравнении его с пороговым значением 0,5 МОм.

Основные технические характеристики прибора ИДО-07:

- контролируемый диапазон значений K_n от 0% до 99%;
- диапазон измерения сопротивления изоляции: от 0 до 500 МОм;
- значение испытательного напряжения при измерении сопротивления изоляции: 1000 В;
- питание автономное или от внешнего блока питания.

Схема подключения индикатора ИДО-07 к трёхфазному электродвигателю показана на рис. 8.21.

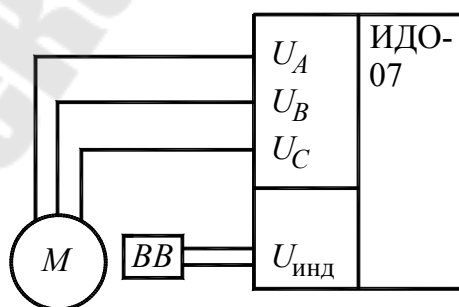


Рис. 8.21. Схема подключения прибора ИДО-07

Прибор имеет три измерительных провода, которые необходимо подключить к соответствующим фазам электродвигателя M . После запуска первого режима по определению значений K_n прибор формирует трёхфазную систему напряжений, измеряет линейные токи

фаз, выполняет расчёты по формулам (8.7) и выводит необходимые сообщения на дисплей (рис. 8.22).

При измерении значения K_H статорной обмотки электродвигателя значительную погрешность может вносить эксцентриситет ротора. Поэтому для машин в сборе в качестве измеренного значения K_H следует выбирать минимальное из значений K_H , которые показывает индикатор при медленном проворачивании ротора вручную. В случае, когда не удастся получить значение K_H менее 10 %, нужно произвести проверку статорной обмотки машины на наличие дефектов при отсутствии ротора.

Показания индикатора	Вид дефекта
–ЬС А–С АЬ– «Неуд.»	Обрыв фазы
А00 – А09 Ь00 – Ъ09 С00 – С09 «Норм.»	Дефект отсутствует (междувитковых замыканий нет)
А10 – А99 Ь10 – Ъ99 С10 – С99 «Неуд.»	Междувитковые замыкания. Неправильное соединение фаз

Рис. 8.22. Основные сообщения на дисплее прибора ИДО-07

В режиме проверки катушек, уложенных в пазы, на наличие междувитковых замыканий индукционный датчик *ВВ* необходимо расположить вдоль оси паза и, плотно прижимая его к поверхности пакета жестей, поочередно «пройти» по всем пазам. В случае обнаружения катушки с короткозамкнутыми витками индикатор издает прерывистый звуковой сигнал и на дисплее появляется изображение «[□]».

Дополнительно к показаниям дисплея имеются показания сигнальных светодиодов:

- « K_H » – на дисплее отображаются значения коэффициентов несимметрии;
- «КЗВ» – на дисплее отображается информация в режиме проверки на короткозамкнутые витки;

- «Ри» – на дисплее отображается информация в режиме измерения сопротивления изоляции;
- «Норм.» – дефектов в испытываемой машине не обнаружено;
- «Неуд.» – обнаружены дефекты в испытываемой машине.

8.5 Приборы для испытания линий электропередачи

Для обнаружения повреждений и неоднородностей в кабельных или воздушных линиях электропередачи, как правило, применяются **рефлектометры** – приборы, функционирующие на основе метода импульсной рефлектометрии. Суть этого метода заключается в генерировании в предварительно обесточенную и разряженную линию электропередачи короткого зондирующего импульса длительностью в несколько десятков наносекунд и амплитудой не более 10 В. В результате в линии возникает сложный переходный процесс, при котором часть энергии отражается от места повреждения, неоднородности волнового сопротивления или конца линии, и возвращается обратно к источнику (рис. 8.23).

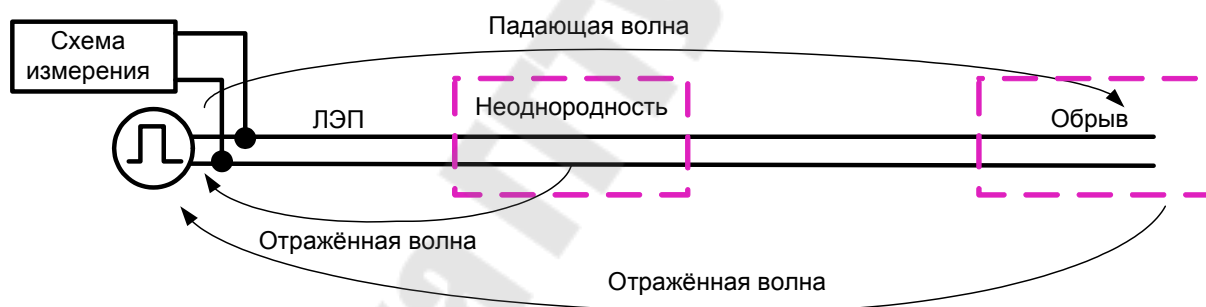


Рис. 8.23. Схема направления энергии электромагнитных волн в линии электропередачи для метода импульсной рефлектометрии

На дисплее прибора формируется изображение формы напряжения для переходного процесса, которое называется **рефлектограмма**.

Пример рефлектограммы показан на рис. 8.24.

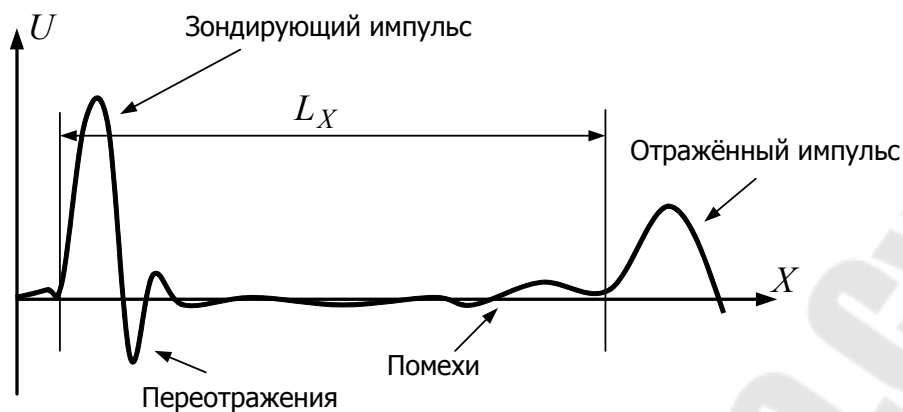


Рис. 8.24. Пример рефлектограммы для линии с обрывом на конце

На рефлектограммах необходимо выделять следующие участки: зондирующий импульс, переотражения от зондирующего импульса, наведенные помехи, отражённые импульсы.

Переотражения возникают из-за переходных процессов вблизи зондирующего импульса. Для устранения этого явления необходимо выполнять операцию согласования выходного сопротивления прибора с волновым сопротивлением линии.

Помехи могут быть синхронными и асинхронными.

Синхронные помехи обусловлены сложностью переходного процесса при подаче зондирующего импульса и различными мелкими неоднородностями в испытываемой линии.

Асинхронные помехи вызываются наводками от соседних линий, коммуникаций, транспорта, оборудования и так далее.

В линии электропередачи могут быть два основных типа повреждений и неоднородностей – продольные и поперечные. В первом случае полярность отражённого импульса та же, что и полярность зондирующего импульса, как показано на рис. 8.25. Во втором случае полярность отражённого импульса будет противоположной.

К продольным повреждениям относятся обрывы проводников, а к продольным неоднородностям – увеличенные сопротивления проводников. Нормальный обрыв на конце линии на рефлектограмме эквивалентен продольному повреждению (рис. 8.25).

К поперечным повреждениям относятся короткие замыкания, а к поперечным неоднородностям – увеличенные проводимости изоляции.

При обрывах или коротких замыканиях амплитуда отражённых импульсов значительно превосходит амплитуду помех. Поэтому вы-

явить такие повреждения достаточно просто. Однако в случае более сложных неоднородностей, вызываемых соединительными муфтами, изменениями сечения жил, сжатиями кабеля или ответвлениями от линии амплитуда отражённых импульсов сравнима с амплитудой помех. Это вызывает определённые трудности по идентификации подобных неоднородностей.

На рис. 8.26 изображён пример рефлектограммы для кабельной муфты.

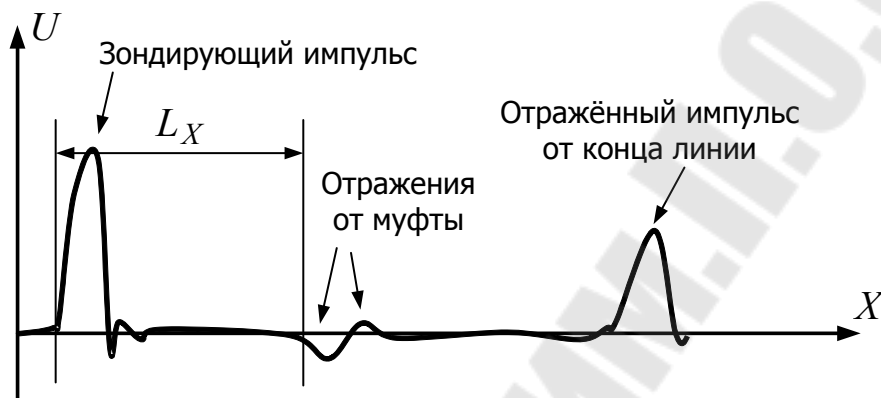


Рис. 8.25. Пример рефлектограммы для кабельной муфты

Кабельная муфта имеет сразу два вида неоднородностей – поперечную и продольную. Первая вызвана изменением сопротивления изоляции при монтаже муфты, а вторая – увеличенным сопротивлением в области соединения жил кабеля.

После появления рефлектограммы на экране рефлектометра необходимо правильно установить вертикальные курсоры для измерения расстояния до места повреждения. Первый курсор устанавливают на начало зондирующего импульса, а второй курсор – на начало отражённого от рассматриваемой неоднородности импульса, как показано на рис. 8.24 и 8.25. В некоторых приборах эта процедура может выполняться автоматически.

Далее программное обеспечение рефлектометра определяет интервал времени Δt между курсорами, соответствующий двойному пробегу волны от источника до повреждения и обратно. После этого рассчитывается расстояние до места повреждения L_x по формуле:

$$L_x = \frac{v \cdot \Delta t}{2} = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot \gamma}, \quad (8.8)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны в линии; c – скорость света в вакууме; $\gamma > 1$ – коэффициент укорочения.

Коэффициент укорочения γ характеризует во сколько раз скорость распространения электромагнитной волны в линии ниже, чем скорость света в вакууме. В основном, значение этого коэффициента определяется типом материала изоляции линии в соответствии с формулой:

$$\gamma \approx \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (8.9)$$

где ε – средняя относительная диэлектрическая проницаемость изоляции испытуемой линии электропередачи.

Требуемое значение коэффициента укорочения вводится в память прибора перед измерениями. Если этого не сделать, то все показания рефлектометра будут неверны.

Для силовых кабелей значения коэффициента укорочения не нормируются, поэтому должны быть либо рассчитаны по формуле (8.9), либо определены экспериментально.

Методика экспериментального определения значения коэффициента укорочения заключается в следующем. Берут требуемую марку неповреждённого разомкнутого с обоих концов кабеля длиной L . Затем подключают рефлектометр между жилами или между жилой и бронёй (экраном), вводят значение $\gamma = 1$ и измеряют значение L_x . После этого коэффициент укорочения для исследуемого кабеля можно рассчитать по формуле:

$$\gamma = \frac{L_x}{L}. \quad (8.10)$$

Длительность зондирующего импульса влияет на разрешающую способность прибора. Чем короче зондирующий импульс, тем выше разрешающая способность, то есть точность определения значения L_x , но ниже дальность обнаружения повреждения. И наоборот, чем шире зондирующий импульс, тем ниже разрешающая способность, но выше дальность.

Точность результатов, полученных с помощью рефлектометра, во многом зависит от подготовки и опыта оператора.

Рассмотрим промышленный портативный рефлектометр РЕЙС-105М1 (рис. 8.26).



Рис. 8.26. Рефлектометр РЕЙС-105М1

Основные технические характеристики прибора:

- 2 входа для измерения;
- плавная регулировка выходного сопротивления в диапазоне от 30 до 450 Ом;
- измерение расстояний в диапазоне от 1 м до 25600 м;
- длительность зондирующего импульса от 10 до 5000 нс;
- амплитуда зондирующего импульса 3,5 В;
- установка коэффициента укорочения в диапазоне от 1 до 7 с дискретностью 0,001;
- память на 200 рефлектограмм и 64 коэффициента укорочения;
- интерфейс связи для подключения к компьютеру: RS232.

Прибор имеет следующие режимы работы:

- «нормальный» – считывание и отображение текущей рефлектограммы (вход 1, вход 2);

- «сравнение» – наложение двух рефлектограмм (вход 1 – вход 2; вход – память; память – память);
- «разность» – вычитание двух рефлектограмм (вход 1 – вход 2; вход – память; память – память);
- обмен данными с компьютером.

Клавиатура прибора позволяет выполнять следующие основные действия:

- работа с программным меню;
- изменение коэффициента усиления аналогового усилителя;
- изменение диапазона измерения;
- растяжка рефлектограммы на экране;
- выбор и передвижение курсора;
- изменение значения коэффициента укорочения;
- изменение длительности зондирующего импульса;
- включение-отключение подсветки дисплея.

Классический метод импульсной рефлектометрии не всегда позволяет точно определить расстояние до места повреждения. Это происходит, например, когда короткое замыкание является высокоомным, то есть после пробоя изоляции кабеля металлического замыкания между жилами не возникает, и значение переходного сопротивления составляет более 10 кОм. В таких ситуациях применяют дополнительные методы:

- метод колебательного разряда по току (*ICE – Impulse Current Method*);
- метод колебательного разряда по напряжению (*Decay – Decay Travelling Wave Method* – метод блуждающей волны);
- методом отражения от электрической дуги (*ARM – Arc Reflection Method*);
- метод прожига изоляции кабеля.

В методе колебательного разряда по току встроенный в прибор источник тока заряжает собственную ёмкость кабеля до возникновения пробоя. В момент пробоя прибор записывает в память осциллограмму переходного процесса. Постоянная времени апериодической составляющей колебаний пропорциональна расстоянию до места повреждения.

В методе колебательного разряда по напряжению в приборе заряжается встроенный высоковольтный конденсатор до необходимого напряжения, а затем разряжается на ёмкость кабеля. В результате

возникают затухающие периодические колебания, период которых пропорционален расстоянию до места повреждения.

В методе отражения от электрической дуги встроенный в прибор высоковольтный импульсный генератор подключают к испытуемому кабелю и добиваются возникновения кратковременной электрической дуги в месте пробоя. Отражённый от неё импульс далее фиксируется с помощью обычного рефлектометра, определяющего расстояние до места повреждения.

В методе прожига изоляции кабеля используют высоковольтный мощный генератор, позволяющий создать в кабеле металлическое короткое замыкание путём длительного горения электрической дуги. После этого применяют обычный рефлектометр, определяющий расстояние до места повреждения.

Внешний вид установки для определения мест повреждения в кабелях среднего и низкого напряжения Surgeflex 32 показан на рис. 8.24.

Функциональные возможности установки Surgeflex 32:

- определения расстояния до места повреждения методом импульсной рефлектометрии;
- определения расстояния до места высокоомного повреждения методом *ARM*;
- определения расстояния до места высокоомного повреждения методами *ICE/Decay*;
- прожиг силовых кабелей;
- интерфейсы связи: *Ethernet, USB, CAN*.



Рис. 8.27. Испытательная установка Surgeflex 32

Основные технические характеристики:

- максимальное значение испытательного напряжения: 32 кВ;
- дальность определения повреждений: от 20 м до 160 км;
- длительность зондирующего импульса в режиме рефлектометра: от 20 нс до 10 мкс;
- амплитуда зондирующего импульса в режиме рефлектометра: от 30 до 50 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зализный, Д.И. Электроника и информационно-измерительная техника: учебное пособие / Д. И. Зализный, О. Г. Широков. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. - 177 с.
2. Зализный, Д.И. Микроэлектронные и микропроцессорные устройства в энергетике : учеб. пособие / Д. И. Зализный - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 194 с.
3. Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. Серия «Библиотека инженера» / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 248 с.
4. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. / Э.Г. Атамалян. – Москва: Дрофа, 2005. – 415 с.
5. Афонский, А. А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения / под ред. В. П. Дьяконова. – Москва: Солон-Пресс, 2007. – 540 с.
6. Информационно-измерительная техника и электроника / Г. Г. Раннев [и др.]; под ред. Г. Г. Раннева. - Москва: Академия, 2007. – 511 с.
7. Котеленец, Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов - М.: Академия, 2003. – 384 с.
8. Кузин, А.В. Микропроцессорная техника / А. В. Кузин, М.А. Жаворонков, М.: Академия, 2004. – 304 с.
9. Лачин, В. И. Электроника: учебное пособие для вузов / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – 703 с.
10. Новиков, Ю.В. Основы микропроцессорной техники / Ю.В. Новиков, П.К. Скоробогатов. М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2004. – 421 с.
11. Панфилов, В.А. Электрические измерения / В.А. Панфилов. – Москва: Академия, 2008. – 285 с.
12. Рощин, В. А. Схемы включения счётчиков электрической энергии: производственно-практ. пособие / В. А. Рощин. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. – 112 с.

Зализный Дмитрий Иванович

**ИЗМЕРЕНИЯ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
И КОМПЛЕКСЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ ОРГАНИЗАЦИИ**

ПОСОБИЕ

**для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание
энергооборудования организаций»
заочной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 12.10.21.

Рег. № 40Е.

<http://www.gstu.by>