

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ**

**ЧАСТЬ 1**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

*Составители* **А.И. Сапожников, М.А. Нечаев, К.В. Образцов**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2012

УДК 681.51(076.5)

ББК 32.965я73

Л12

Л12        **Лабораторный практикум по курсу Элементы систем автоматики: учебное пособие. Часть 1 / сост.: А.И. Сапожников, М.А. Нечаев, К.В. Образцов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 116 с.**

Практикум содержит краткое описание физических процессов в исследуемых элементах систем автоматики, широко применяемых в современных системах управления, порядок проведения экспериментов при исследовании этих элементов, требования к оформлению отчетов по лабораторным работам. Кроме того, для подготовки к лабораторным работам приводятся контрольные вопросы, а также список рекомендованных источников литературы.

Предназначен для студентов, обучающихся по образовательной программе «Электротехника» («Electrical Engineering»), объединяющей направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 «Электроэнергетика».

**УДК 681.51(076.5)**

**ББК 32.965я73**

*Рецензенты*

Кандидат технических наук, доцент кафедры ЭиАФУ  
Северского технологического института НИЯУ МИФИ

*А.А. Филипас*

Доктор технических наук, профессор кафедры конструирования  
электронно-вычислительной аппаратуры ТУСУРа

*В.А. Бейнарович*

© Составление. ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012

© Сапожников А.И., Нечаев М.А.,  
Образцов К.В., составление, 2012

© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
Лабораторная работа № 1 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА</b> .....	5
Лабораторная работа № 2 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ</b> ...	13
Лабораторная работа № 3 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ</b> ..	39
Лабораторная работа № 4 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ</b> .....	53
Лабораторная работа № 5 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ</b> .....	73
Лабораторная работа № 6 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНОГО ПОЛОЖЕНИЯ (ПРИБЛИЖЕНИЯ)</b> .....	86
Лабораторная работа № 7 <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ</b> .....	98
Приложение <b>Правила выполнения лабораторных работ</b> .....	113
<b>Пример оформления титульного листа отчета по лабора- торной работе</b> .....	114
<b>Пример оформления рисунков, формул и таблиц в отчете по лабораторной работе</b> .....	115

## ВВЕДЕНИЕ

Современные техника и технологии немислимы без автоматических систем контроля, регулирования и управления в любой сфере деятельности человека: различных видах производств, подвижных объектов, социальной сфере, бытовой технике и др. В учебном плане подготовки студентов по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» очной и заочной формы обучения дисциплина «Элементы систем автоматики» является обязательной. Наряду с лекциями для закрепления теоретических знаний, предусмотрены лабораторные занятия.

Данный лабораторный практикум включает в себя изучение элементов систем автоматики. В лабораторных работах представлены конкретные датчики и регуляторы, широко применяемые на практике в промышленных системах автоматики. В начале каждой лабораторной работы студенту необходимо внимательно изучить теоретическую часть, понять принцип построения и работу исследуемого элемента. Исследования проводятся на лабораторном стенде бригадой из трёх-четырёх человек.

По каждой лабораторной работе бригада студентов должна представить оформленный отчет и защитить его. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе приведены в Приложении, а также в конце описания каждой работы. Как правило, отчет должен включать в себя следующие элементы:

- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- название раздела программы работы, результаты его выполнения (формулы, таблицы, графики, их обработка) и выводы;
- ответы на контрольные вопросы.

Содержание данного лабораторного практикума «Элементы систем автоматики» предусматривает дальнейшее использование полученных знаний во всех специальных технических дисциплинах при последующем обучении, включая курсовое проектирование, а также при выполнении выпускных квалификационных работ.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение принципа действия, схем включения потенциометрического датчика или задающего устройства, исследование влияния нагрузки на характеристики устройства.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Потенциометрический (резистивный) датчик представляет собой переменное электрическое сопротивление, величина выходного напряжения которого зависит от положения токосъемного контакта.

Токосъемники датчиков могут совершать угловое или линейное перемещение. В первом случае при повороте движка потенциометра выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  изменяется пропорционально входному углу поворота  $\varphi_X$ . Здесь осуществляется преобразование углового перемещения в электрическое напряжение. Для режима холостого хода ( $R_H = \infty$ , рис. 1) статическая регулировочная характеристика датчика линейна, так как справедливо соотношение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U}{R} \cdot R_X,$$

где  $U$  – напряжение питания датчика (потенциометра);

$R$  – полное сопротивление потенциометра;

$R_X$  – сопротивление части обмотки потенциометра, соответствующее углу перемещения  $\varphi_X$  (рис. 1).

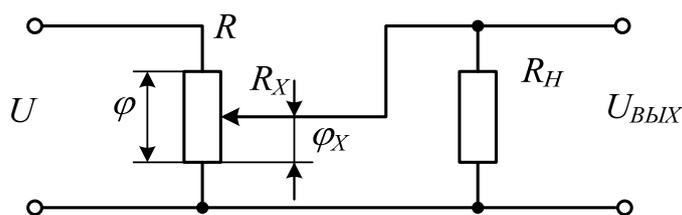


Рис. 1

Учитывая, что  $\frac{R_X}{R} = \frac{\varphi_X}{\varphi}$ , где  $\varphi$  – полный угол поворота датчика потенциометра, получим:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U}{\varphi} \cdot \varphi_X = k \cdot \varphi_X, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент преобразования потенциометра на холостом ходу (х. х.).

В относительных единицах выражение (1) принимает вид:

$$\bar{u}_X = \bar{\varphi}_X,$$

где  $\bar{u}_X = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U}$  – относительное значение напряжения на выходе;

$\bar{\varphi}_X = \frac{\varphi_X}{\varphi}$  – относительное значение угла поворота датчика потен-

циометра,

С учетом нагрузки  $R_H \neq \infty$  получим, что

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_X \cdot R_H}{R \cdot R_H + R \cdot R_X - R_X^2} \cdot U$$

или в относительных единицах

$$\bar{u}_X = \frac{r_X \cdot \beta}{\beta + r_X(1 - r_X)} = \frac{\beta \cdot \bar{\varphi}_X}{\beta + \bar{\varphi}_X(1 - \bar{\varphi}_X)}, \quad (2)$$

где  $r_X = \frac{R_X}{R}$  – относительное значение сопротивления обмотки потенциометра, соответствующее углу поворота  $\varphi_X$ ;

$\beta = \frac{R_H}{R}$  – коэффициент нагрузки.

Ошибка, вызываемая нагрузкой, определится выражением:

$$\delta = \bar{u}_{X0} - \bar{u}_X = \bar{\varphi}_X - \frac{\bar{\varphi}_X \cdot \beta}{\beta + \bar{\varphi}_X(1 - \bar{\varphi}_X)} = \frac{\bar{\varphi}_X^2(1 - \bar{\varphi}_X)}{\beta + \bar{\varphi}_X(1 - \bar{\varphi}_X)}. \quad (3)$$

Если в выражении (2) принять постоянным коэффициент нагрузки  $\beta = const$ , то изменяя  $\bar{\varphi}_X$  получим статическую регулировочную характеристику  $\bar{u}_X = F(\bar{\varphi}_X)$  при  $R_H = const$ .

Изменяя  $R_H$  при постоянном значении  $\bar{\varphi}_X$  получим статическую внешнюю характеристику  $\bar{u}_X = f(R_H)$  при  $\bar{\varphi}_X = const$ .

Из приведенных на рис. 2 зависимостей  $\bar{u}_X = F(\bar{\varphi}_X)$  и  $\delta = f(\bar{\varphi}_X)$  следует, что с увеличением величины сопротивления нагрузки, т. е. с увеличением значения коэффициента нагрузки  $\beta$ , искажение зависимости  $\bar{u}_X = F(\bar{\varphi}_X)$  и величина ошибки  $\delta$  уменьшаются.

Приведенная статическая регулировочная характеристика (рис. 2, а) позволяет заключить, что рассмотренный потенциометрический датчик имеет однополярную характеристику, т. е. он относится к классу **однотактных** элементов.

Однако на основе однотактных схем можно построить **двухтактные**, т. е. реагирующие на знак входного сигнала. Существует несколько

ко схем включения потенциометров, образующих двухтактный потенциометрический датчик. На рис. 3 приведена одна из них.

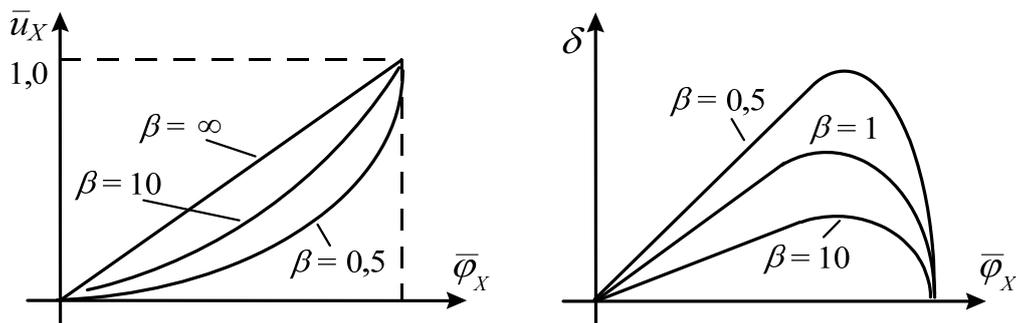


Рис. 2

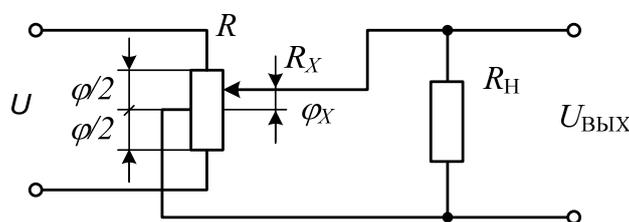


Рис. 3

Для данной реверсивной схемы (рис. 3) напряжение на нагрузке определяется следующим образом:

$$\bar{u}_X = \frac{\beta \cdot r_X}{2\beta + r_X(1 - 0,5r_X)} = \frac{\beta \cdot \bar{\varphi}_X}{2\beta + \bar{\varphi}_X(1 - 0,5\bar{\varphi}_X)}, \quad (4)$$

где  $r_X = \frac{R_X}{0,5 \cdot R} = \frac{\varphi_X}{0,5 \cdot \varphi}$ .

Знак величины  $\bar{u}_X$  определяется местоположением токоотъемника относительно средней точки (т. е. больше (меньше), выше (ниже) какого-то фиксированного значения).

Кроме того, существуют другие схемы **специальных двухтактных потенциометрических датчиков**, две из которых показаны на рис. 4.

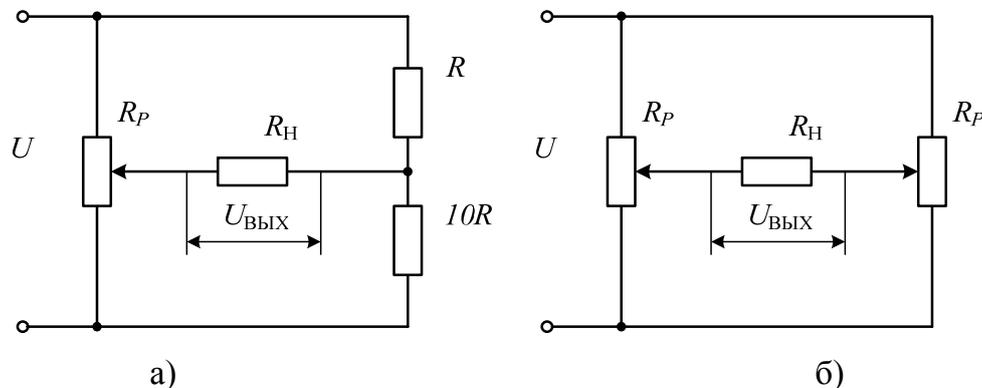


Рис. 4

Схема, показанная на рис. 4, *а* обладает несимметричной регулировочной характеристикой, так как нагрузка подключается к токосъемнику потенциометра и к средней точке делителя напряжения 1:10. К схеме на рис. 4, *б* нагрузка подключается между токосъемниками двух потенциометров, причем токосъемники механически связаны так, что при перемещении одного, например, вверх, второй перемещается на такое же расстояние вниз.

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- 2.1. Переменный резистор  $R_p$  с угловым перемещением типа ППБ-50Г, размещенный на дополнительном блоке.
- 2.2. Переменный резистор с линейным перемещением, устанавливаемый на блок испытания датчиков линейного положения 395.
- 2.3. Мультиметры блока 509.3 – 2 шт.
- 2.4. Блок питания 216.1.
- 2.5. Нагрузочные сопротивления.
- 2.6. Соединительные провода.

## 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

### Исследование датчика углового перемещения

3.1. Определить величину полного сопротивления резистора  $R_p$  с угловым перемещением, размещенного на дополнительном блоке и полный угол поворота движка в градусах или делениях.

3.2. Снять зависимость  $R_x = f(\varphi_x)$  с помощью мультиметра. Результаты измерения занести в табл. 1.

Таблица 1

$\varphi$ , град	0	30	60	...	300
$R_x$ , Ом					

3.3. Найти на стенде такие два сопротивления нагрузки  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$ , для которых  $1 \leq \beta \leq 9$ ;  $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ .

3.4. На блоке питания 216.1 с помощью мультиметра выставить напряжение  $U = 20$  В (или по указанию преподавателя).

3.5. Снять характеристику однотактного потенциометрического датчика с угловым перемещением.

3.5.1. При отключенном питании собрать схему, изображенную на рис. 1, для режима х. х. К выходу датчика подключить мультиметр на пределе измерения 20 В.

3.5.2. Поворачивая рукоятку потенциометра  $R_p$ , через каждые 30 градусов фиксировать по мультиметру выходное напряжение.

Результаты наблюдений занести в табл. 2.

Таблица 2

$\varphi$ , град	0	30	60	...	300	Примечания
$U_{\text{ВЫХ1}}$ , В						$\beta = \infty$ (х. х.)
$U_{\text{ВЫХ2}}$ , В						$\beta =$ ( $1 \leq \beta \leq 9$ )
$U_{\text{ВЫХ3}}$ , В						$\beta =$ ( $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ )

3.5.3. К выходу датчика параллельно мультиметру подключить нагрузочное сопротивление  $R_H$ .

Повторить пункт 3.5.2 для коэффициентов нагрузки  $1 \leq \beta \leq 9$ ;  $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ .

3.6. Снять характеристику двухтактного потенциометрического датчика с угловым перемещением.

3.6.1. Мультиметр и сопротивление нагрузки подключить между выходом датчика и **средней точкой** потенциометра (в соответствии с рис. 3).

3.6.2. Поворачивая рукоятку потенциометра  $R_p$  на 30 градусов, фиксировать изменение выходного напряжения и наблюдать за полярностью этого напряжения. Считать при этом, что угол  $\varphi$  меняется в пределах  $-150^\circ \dots +150^\circ$ .

Результаты наблюдений занести в табл. 3.

Таблица 3

$\varphi_{\text{ИЗМ}}$ , град	0	30	60	...	300	Примечания
$\varphi$ , град	-150	-120	-90	...	150	
$U_{\text{ВЫХ1}}$ , В						$\beta = \infty$ (х. х.)
$U_{\text{ВЫХ2}}$ , В						$\beta =$ ( $1 \leq \beta \leq 9$ )
$U_{\text{ВЫХ3}}$ , В						$\beta =$ ( $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ )

3.6.3. К выходу датчика параллельно мультиметру подключить нагрузочное сопротивление  $R_H$ . Повторить пункт 3.6.2 для коэффициентов нагрузки  $1 \leq \beta \leq 9$ ;  $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ .

### Исследование датчика линейного положения

3.7. При отключенном питании испытываемый потенциометрический датчик линейного положения (2, рис. 5) установить в каретку горизонтального перемещения блока испытания датчиков линейного положения (1). Указатель датчика (3) переместить в крайнее левое положение.

ние и ручкой горизонтального перемещения (4) установить указатель датчика (3) на отметку 0 горизонтальной линейки (5).

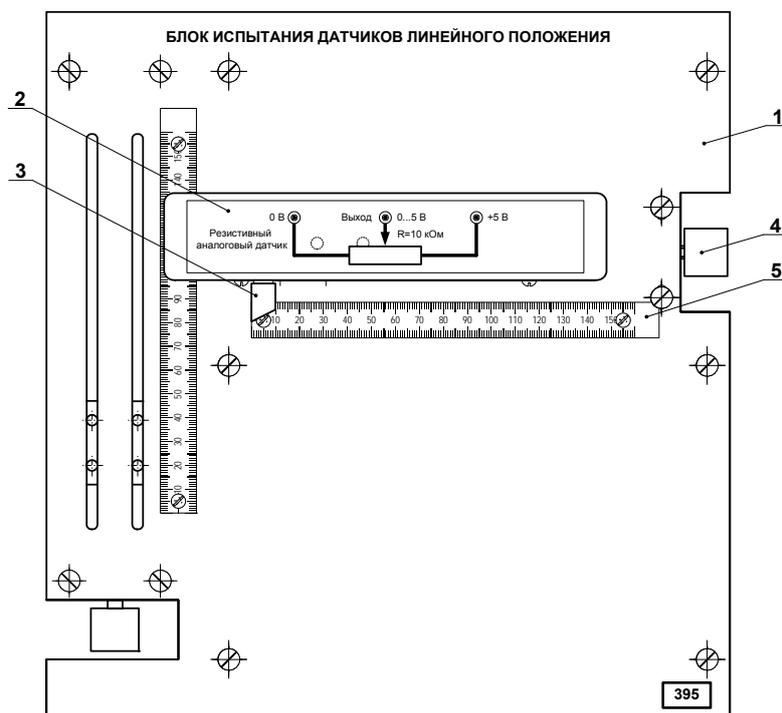


Рис. 5. Установка для испытания резистивного датчика положения

3.8. Определить величину полного сопротивления резистора с линейным перемещением и максимальный диапазон перемещения движка в миллиметрах.

3.9. Снять зависимость  $R_x = f(l_x)$  с помощью мультиметра. Результаты измерения занести в табл. 4.

Таблица 4

$l$ , мм	0	10	20	...	100
$R_x$ , кОм					

3.10. Найти на стенде такие два сопротивления нагрузки  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$ , для которых  $1 \leq \beta \leq 9$ ;  $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ .

3.11. На блоке питания 216.1 выставить напряжение  $U = 5$  В (или по указанию преподавателя).

3.12. Снять регулировочную характеристику однотактного потенциометрического датчика с линейным перемещением.

3.12.1. При отключенном питании собрать схему, изображенную на рис. 1, для режима х. х. К выходу датчика подключить мультиметр на пределе измерения 20 В.

3.12.2. Перемещая указатель датчика вдоль горизонтальной линейки через каждые 10 мм фиксировать по мультиметру выходное напряжение.

Результаты наблюдений занести в табл. 5.

Таблица 5

$l$ , мм	0	10	20	...	100	Примечания
$U_{\text{ВЫХ1}}$ , В						$\beta = \infty$ (х. х.)
$U_{\text{ВЫХ2}}$ , В						$\beta =$ ( $1 \leq \beta \leq 9$ )
$U_{\text{ВЫХ3}}$ , В						$\beta =$ ( $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ )

3.12.3. К выходу датчика параллельно мультиметру подключить нагрузочное сопротивление  $R_H$ .

Повторить пункт 3.12.2 для коэффициентов нагрузки  $1 \leq \beta \leq 9$ ;  $0,5 \leq \beta \leq 0,9$ .

### Исследование потенциометрического датчика в среде EWB

3.13. Снять характеристику специального двухтактного потенциометрического датчика в среде моделирования Electronics Workbench (по заданию преподавателя).

3.13.1. В среде моделирования электронных схем Electronics Workbench собрать заданную схему по рис. 4. Полное сопротивление потенциометра, сопротивления нагрузки и напряжение питания взять из опыта 3.5.

3.13.2. Меняя положение потенциометра  $R_p$  (или двух потенциометров для схемы рис. 4, б), фиксировать изменение выходного напряжения и наблюдать за полярностью этого напряжения.

Результаты наблюдений занести в табл. 6, аналогичную табл. 1.

3.13.3. Для заданной схемы вывести выражение для величины  $\bar{u}_x$  аналогично (2) и (4).

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Зарисовать схемы включения потенциометрического датчика и привести все таблицы с результатами измерений.

4.2. Построить характеристики переменных резисторов  $R_x = f(\varphi_x)$  и  $R_x = f(l_x)$ .

4.3. Построить регулировочные характеристики для каждой схемы датчика по экспериментальным данным  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)_{\beta=\text{const}}$ .

4.4. Построить регулировочные характеристики для каждой схемы датчика по выражениям (2), (4) и полученному в п. 3.13.3.

4.5. Построить нагрузочные характеристики для каждой схемы датчика (по указанию преподавателя) **по экспериментальным данным**  $U_{\text{ВЫХ}} = F(\beta)_{\varphi=\text{const}}$ .

4.6. Построить нагрузочные характеристики для каждой схемы датчика (по указанию преподавателя) рассчитанные **по выражениям** (2), (4) и полученному в п. 3.13.3.

4.7. Определить чувствительность датчика для каждой схемы **по экспериментальным данным** при заданных преподавателем значениях  $\beta$  и  $\varphi$ , сравнить их между собой и объяснить разницу.

4.8. Построить зависимость ошибки от входного сигнала **по экспериментальным данным** для разных значений  $\beta$

$$\delta = f(\varphi_x)_{\beta=\text{const}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\varphi_x)_{\beta=\infty} - U_{\text{ВЫХ}}(\varphi_x)_{\beta=\text{const}}}{U_{\text{ВЫХ}}(\varphi_x)_{\beta=\infty}}.$$

4.9. Рассчитать зависимость ошибки от входного сигнала **по формулам** подобным (3) для тех же значений  $\beta$ , что и в эксперименте, сравнить.

4.10. Выводы по работе.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. В чем состоит назначение датчиков в системах автоматики?

5.2. Что такое чувствительность датчика?

5.3. Какие величины позволяют контролировать потенциометрические датчики?

5.4. В чем особенность двухтактной схемы включения потенциометрического датчика?

5.5. Какие достоинства и недостатки можно выделить у потенциометрических датчиков?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подлесный Н.И., Рубанов В.Г. Элементы систем автоматического управления и контроля: Учебник. – Киев, Высш. шк., 1991. – 461 с.
2. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.: ил.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение принципа действия, схем включения и передаточных характеристик гальванически изолированных датчиков тока и напряжения.

#### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### 1.1. Измерение тока с помощью шунта

При использовании в качестве первичного измерительного преобразователя шунт представляет собой сопротивление  $R_{\text{ш}}$ , включаемое последовательно в цепь измеряемого тока  $I_{\text{изм}}$  (рис. 1). Падение напряжения на шунте  $U_{\text{ш}}$  подается на измерительный прибор (вольтметр) или на усилитель (измерительную схему). Шунты обычно изготавливаются из манганина, обладающего малым температурным коэффициентом сопротивления, благодаря чему его сопротивление практически остается постоянным.

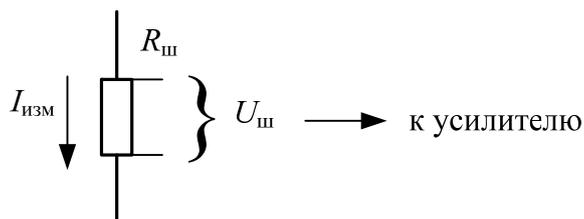


Рис. 1. Схема включения шунта

При схеме включения, показанной на рис. 1, шунт используется как преобразователь тока в напряжение, которое при условии  $R_{\text{ш}} \ll R_{\text{вх}}$  определяется по формуле:

$$U_{\text{ш}} = R_{\text{ш}} \cdot I_{\text{изм}} = k \cdot I_{\text{изм}},$$

где  $U_{\text{ш}}$  – выходное напряжение на шунте;

$R_{\text{ш}}$  – сопротивление шунта;

$I_{\text{изм}}$  – измеряемый ток;

$k$  – коэффициент передачи шунта, В/А.

В зависимости от сопротивления шунта в качестве этого элемента могут быть использованы медный провод на катушке, металлическая пластина, нормализованный (стандартный) резистор с малым допуском отклонения сопротивления.

## 1.2. Гальваническая развязка

Большинство датчиков тока и напряжения, применяемые в промышленности для измерения больших токов, имеют гальваническую развязку первичных и вторичных цепей. Это необходимо для исключения протекания выравнивающих токов и других токов, способных повреждать компоненты вторичных цепей или поражать людей, прикасающихся к оборудованию вторичных цепей.

Гальваническая развязка – это передача энергии или сигнала между электрическими цепями без электрического контакта между ними. Прибор, обеспечивающий развязку, искусственно ограничивает передачу энергии из одной цепи в другую. В качестве такого прибора может использоваться трансформатор (магнитная развязка) или оптопара (оптическая развязка). В обоих случаях цепи оказываются электрически разделёнными, но между ними возможна передача энергии или сигналов.

У трансформатора первичная обмотка полностью изолирована от вторичной, поэтому между ними никаких токов возникнуть не может в принципе (кроме случаев пробоя и высокочастотных помех), хотя разность потенциалов в обмотках может быть очень большой.

Оптопары, как правило, обеспечивают напряжение изоляции между светодиодом и фототранзистором до 2500 В и более. Оптопары являются приемлемым выбором благодаря своей дешевизне по сравнению с трансформаторами. Основным недостатком оптопар является большой разброс передаточной функции от экземпляра к экземпляру.

## 1.3. Датчик тока с шунтом и опторазвязкой

Функциональная схема датчика тока с шунтом с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL-7840 показана на рис. 2. Измеряемый ток протекает через резистор (шунт), а падение напряжения на этом резисторе подается на вход микросхемы HCPL-7840, которая представляет собой усилитель с гальванической развязкой.

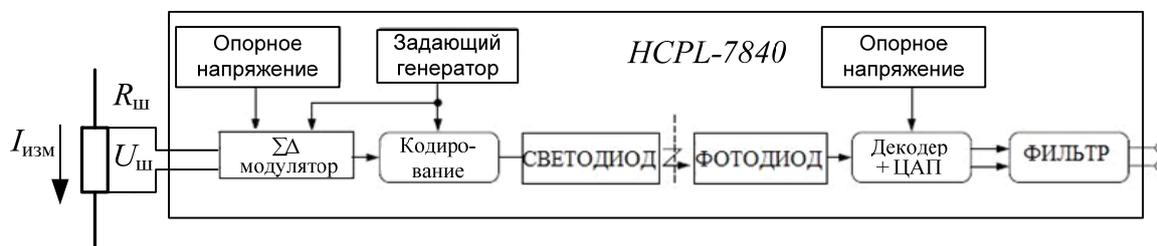


Рис. 2. Функциональная схема датчика тока с опторазвязкой

Напряжение на входе микросхемы в диапазоне  $\pm 200$  мВ преобразуется сигма-дельта модулятором в высокочастотный сигнал, кодируется

и передаётся через оптопару. Затем сигнал преобразуется декодером и цифро-аналоговым преобразователем ЦАП в выходное напряжение в диапазоне  $2,5 \pm 1,6$  В.

Датчик тока с опторазвязкой имеет ряд достоинств по сравнению с датчиком Холла: меньше по размерам, имеет лучшую линейность регулировочной характеристики.

**Модулятор** – это устройство для преобразования входного медленно изменяющегося сигнала в изменение параметров колебаний более высокой частоты. Частота выходного сигнала определяется частотой несущего (опорного) напряжения. Если напряжение описывается уравнением  $U=U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ , то амплитуда  $U_m$ , частота  $\omega$  и начальная фаза  $\varphi_0$  постоянны. Модуляция основывается на том, что один из параметров изменяется в соответствии с изменениями модулирующего сигнала низкой частоты.

По виду модуляции модуляторы бывают амплитудные, частотные, фазовые и импульсные. Исходя из того, какой параметр – амплитуда, фаза или частота – изменится, различают амплитудно-импульсную, фазо-, частотно- и широтно-импульсную модуляции.

Управление колебаниями модуляторов осуществляется нелинейным резистором или управляющим элементом, параметры которого изменяются в процессе модуляции.

**Демодулятор** – это устройство, производящее операцию, обратную модуляции, то есть выделяет низкочастотный сигнал из модулированного колебания.

К основным характеристикам амплитудных модуляторов и демодуляторов относятся характеристика управления, коэффициента преобразования, входное и выходное сопротивление, уровень собственных шумов, выходная мощность и динамические свойства.

#### 1.4. Измерение тока с помощью преобразователя Холла

Датчики тока с преобразователем Холла основаны на использовании эффекта Холла, который был обнаружен в 1879 году американским физиком Эдвином Гербертом Холлом. **Эффект Холла** вызывается силой Лоренца, которая воздействует на подвижные носители зарядов в проводнике, когда на них действует магнитное поле перпендикулярно направлению тока.

На рис. 3 пояснен эффект Холла. Вдоль по тонкой пластине полупроводника течёт ток управления  $I_C$ . Магнитный поток  $B$  создает силу Лоренца  $F_L$ , направленную перпендикулярно движению зарядов (электронов), которые образуют ток. Это приводит к смещению электронов

перпендикулярно направлению своего движения, поэтому вблизи одной грани возникает избыток носителей зарядов, а вблизи другой – недостаток, то есть возникает разность потенциалов, которую называют ЭДС Холла  $U_H$ , и которая находится по выражению:

$$U_H = \frac{K}{d} \cdot I_C \cdot B, \quad (1)$$

где  $K$  – константа Холла для материала пластины;  
 $d$  – толщина полупроводниковой пластины.

Такое устройство получило название *генератора Холла*. Генераторы Холла обладают определённой зависимостью чувствительности и начального выходного напряжения от температуры, тем не менее, эта зависимость может быть значительно компенсирована электронной схемой датчика тока.

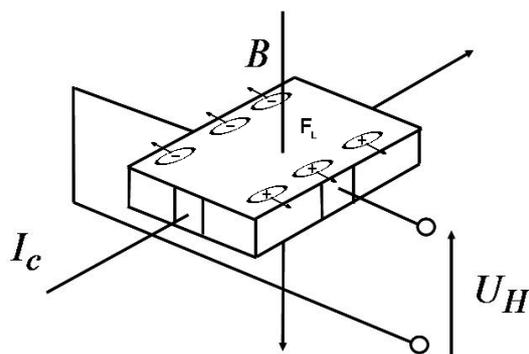


Рис. 3. Эффект Холла

Датчики Холла изготавливают на основе полупроводниковых материалов: кремния, германия, арсенида галлия и арсенида индия. В зависимости от конкретного материала датчики имеют различную чувствительность, ток управления и выходное напряжение. Существует два основных вида датчиков тока, основанных на эффекте Холла – датчики прямого усиления и датчики компенсационного типа.

В **датчике прямого усиления** (рис. 4) провод (шина), по которому протекает измеряемый ток  $I_p$ , проходит через окно сердечника. В воздушном зазоре этого сердечника, где помещён элемент (генератор) Холла, напряжённость магнитного поля  $H$  создаётся измеряемым первичным током  $I_p$ , который необходимо преобразовать в выходной сигнал датчика. При протекании постоянного тока управления  $I_C$ , который подаётся от стабилизированного источника тока, на поперечных сторонах пластинки генерируется ЭДС Холла, пропорциональная напряжённости  $H$  и току  $I_C$ .

В области линейного участка кривой намагничивания материала сердечника магнитная индукция  $B$  пропорциональна напряжённости магнитного поля  $H$ , которая в свою очередь пропорциональна  $I_p$  ( $B = a \cdot I_p$ , где  $a$  – константа), следовательно, напряжение Холла выражается следующим образом:

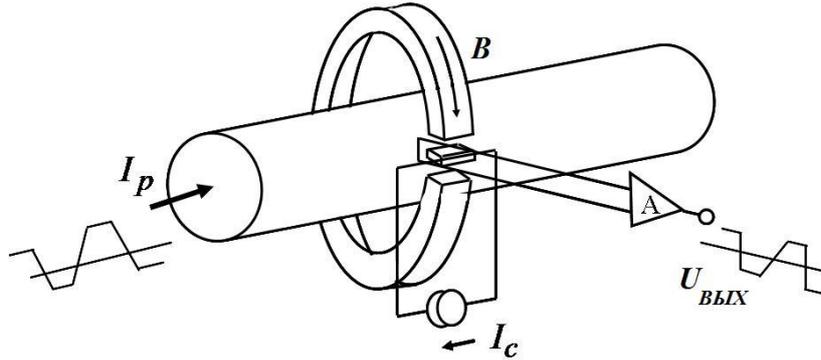


Рис. 4. Датчик прямого усиления, основанный на эффекте Холла

$$U_H = \frac{K}{d} \cdot I_C \cdot a \cdot I_P \quad (2)$$

Если кроме тока  $I_P$  все составляющие выражения (2) величины постоянные, то

$$U_H = b \cdot I_P, \quad (3)$$

где  $b$  – константа.

Измеряемый сигнал (напряжение Холла  $U_H$ ) усиливается усилителем А и выдаётся на выходе датчика в виде напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Датчики прямого усиления способны измерять постоянный, переменный синусоидальный и несинусоидальные токи величиной от нескольких ампер до нескольких сотен килоампер с общей точностью в несколько процентов от номинального значения тока. Они отличаются низкой потребляемой мощностью, малыми геометрическими размерами, а также относительно небольшим весом, особенно для диапазона больших токов. Эти датчики сравнительно недороги и в основном применяются в промышленности.

**В датчиках компенсационного типа** (также называемых датчиками с единичной обратной связью или датчиками с нулевым потоком) напряжение Холла  $U_H$  усиливается усилителем А (рис. 4), затем проходит через транзисторную сборку и преобразуется в выходной ток  $I_S$  (прямо пропорциональный ЭДС Холла), который как сигнал обратной связи подаётся на компенсационную обмотку, намотанную на сердечнике датчика, чтобы компенсировать магнитную индукцию  $B_p$  поля, создаваемого первичным током  $I_p$ , магнитной индукцией  $B_s$  поля, создаваемого выходным током  $I_s$ .

Выходной ток  $I_s$  намного меньше, чем  $I_p$ , потому что катушка с  $N_s$  витками предназначена для создания аналогичного магнитного потока (ампер-витков), как и измерительной катушки с одним витком

( $N_p = 1$ ). Измерительная катушка – это проводник (шина) с измеряемым током  $I_p$ , а виток всего один, потому что шина проходит сквозь сердечник один раз. Таким образом

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s. \quad (4)$$

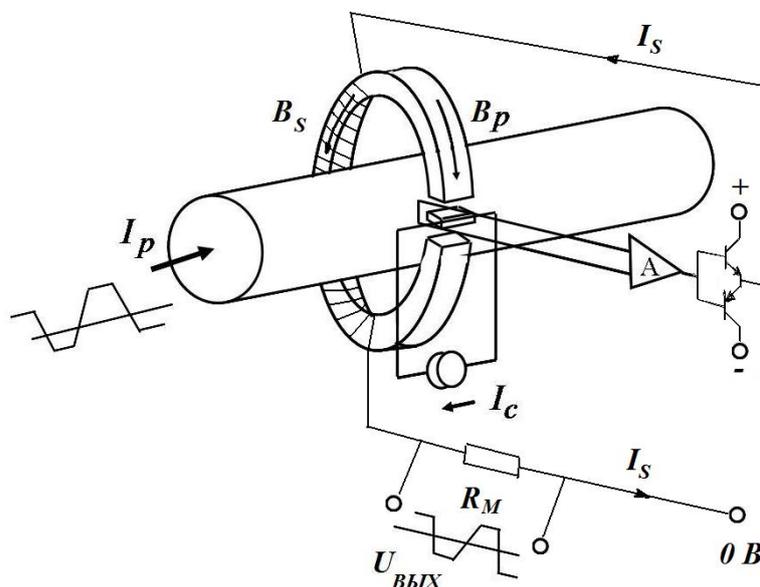


Рис. 4. Датчик компенсационного типа, основанный на эффекте Холла

Следовательно, индукция  $B_s$  эквивалентна  $B_p$ , и их магнитные потоки взаимно компенсируют друг друга. Таким образом, система действует при нулевом магнитном потоке в сердечнике.

В качестве примера разберём преобразование постоянного тока 100 А датчиком компенсационного типа. Количество витков в измерительной обмотке  $N_p = 1$ , а в компенсационной обмотке  $N_s = 1000$ . Следовательно, вторичный выходной ток будет определяться следующим образом:

$$I_s = \frac{N_p \cdot I_p}{N_s} = \frac{1 \cdot 100}{1000} = 0.1 \text{ (A)} = 100 \text{ (mA)}.$$

Ток  $I_s$  является точным отображением  $I_p$  по форме, но меньшим в 1000 раз ( $100 \text{ А} / 1000 = 0,1 \text{ А}$ ).

#### Датчики тока серии LTS

Датчики серии LTS являются датчиками компенсационного типа с применением технологии ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Все активные электронные компоненты, включая датчик Холла, размещены в микросхеме, блок-схема которой показана на рис. 5. Такая конструкция компенсирует разброс и температурный дрейф параметров компонентов. Более того, снижается чувствительность к внешним поме-

хам, а компоненты работают в оптимальном режиме. Использование микросхемы позволило существенно уменьшить размеры датчика.

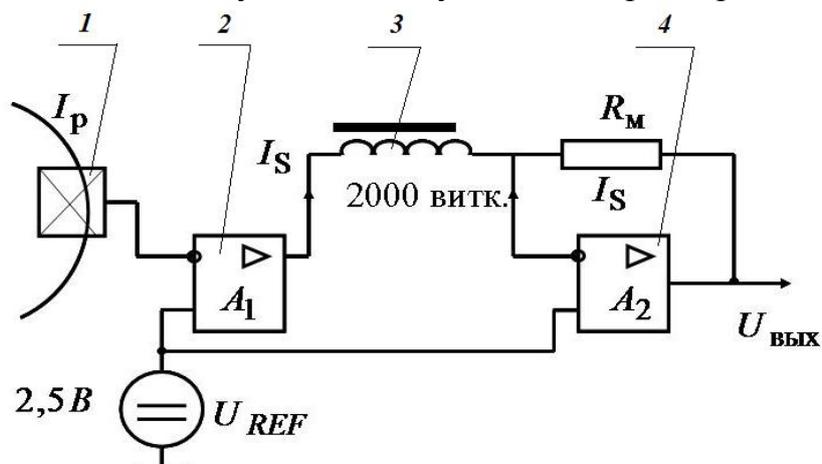


Рис. 5. Блок-схема датчика серии LTS:

1 – элемент Холла; 2 – предварительный усилитель;  
3 – вторичная обмотка; 4 – выходной усилитель

У датчиков серии LTS есть встроенный измерительный резистор  $R_M$ , который определяет выходное напряжение. Выходной сигнал совместим по уровню с входными цепями аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  датчика компенсационного типа вычисляется по выражению:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{REF}} + I_S \cdot R_M, \quad (5)$$

где  $U_{\text{REF}}$  – опорное напряжение (у датчиков серии LTS  $U_{\text{REF}} = 2,5 \text{ В}$ ).

Так как  $I_S = \frac{I_P}{N_S}$ , то

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{REF}} + \frac{I_P \cdot R_M}{N_S} = U_0 + K_I \cdot I_P, \quad (6)$$

где  $U_0 = U_{\text{REF}} = 2,5 \text{ В}$ ;

$K_I$  – коэффициент передачи датчика тока.

Датчики компенсационного типа способны измерять постоянный ток, переменный синусоидальный и несинусоидальные токи от нескольких ампер до нескольких десятков тысяч ампер с точностью около 1%. Эти датчики особенно подходят для применения в промышленности, где требуется высокая точность и широкий частотный диапазон. Основным недостатком этой технологии измерения тока является потребление мощности на компенсацию тока. Кроме того, для диапазона сильных токов эти датчики являются более дорогими и имеют большие габариты по сравнению с аналогичными датчиками прямого усиления.

## 1.5. Трансформатор тока

Трансформатор тока предназначен для уменьшения первичного тока до значений, наиболее удобных для измерительных приборов и реле, а также для гальванического разделения цепей измерения и защиты от первичных цепей высокого напряжения.

Трансформатор тока имеет замкнутый магнитопровод и две обмотки – первичную и вторичную (рис. 6). Первичная обмотка включается последовательно в цепь измеряемого тока  $I_1$ , ко вторичной обмотке присоединяются измерительные приборы, обтекаемые током  $I_2$ .

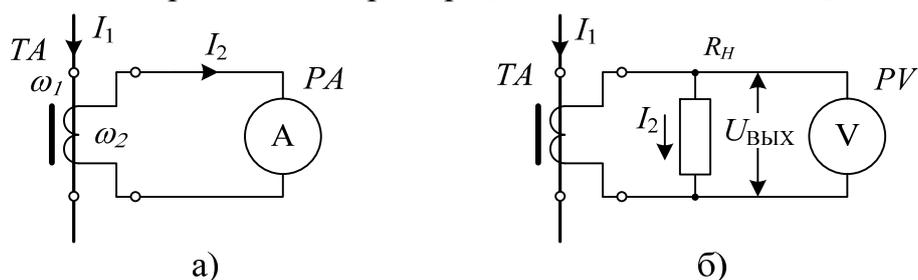


Рис. 6. Схемы подключения трансформатора тока

Трансформатор тока характеризуется номинальным коэффициентом трансформации:

$$K_I = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}}, \quad (7)$$

где  $I_{1\text{НОМ}}$  и  $I_{2\text{НОМ}}$  – номинальные значения первичного и вторичного тока соответственно.

В зависимости от предъявляемых требований, выпускаются трансформаторы тока с классами точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Указанные цифры представляют собой токовую погрешность в процентах от номинального тока при нагрузке первичной обмотки током 100...120 % для первых трех классов и 50...120 % для двух последних. Трансформаторы тока класса 0,2 применяются для присоединения точных лабораторных приборов, класса 0,5 – для присоединения счетчиков денежного расчета, класса 1 – для всех технических измерительных приборов, классов 3 и 10 – для релейной защиты.

Кроме рассмотренных классов выпускаются также трансформаторы тока со вторичными обмотками типов Д (для дифференциальной защиты), З (для земляной защиты), Р (для прочих релейных защит).

Токковые цепи измерительных приборов и реле имеют малое сопротивление, поэтому трансформатор тока нормально работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания. Если разомкнуть вторичную обмотку, то на ней появится высокое напряжение, достигающее в некоторых случаях десятков киловольт. Из-за указанных явлений не разре-

шается размыкать вторичную обмотку трансформатора тока при протекании тока в первичной обмотке.

### 1.6. Трансформатор напряжения

Трансформатор напряжения (ТН) – измерительный трансформатор, предназначенный для преобразования высокого напряжения в низкое в цепях измерения и контроля. Применение ТН позволяет изолировать цепи вольтметров, частотометров, электрических счётчиков, устройств автоматического управления и контроля и т. д. от цепи высокого напряжения.

Первичная обмотка трансформатора напряжения состоит из большого числа витков  $\omega_1$  и подключается к цепи с измеряемым (контролируемым) напряжением  $U_1$  параллельно. К зажимам вторичной обмотки с числом витков  $\omega_2$  ( $\omega_1 \gg \omega_2$ ) подсоединяют измерительные приборы (или контрольные устройства). Так как внутреннее сопротивление последних относительно велико, ТН работает в условиях, близких к режиму холостого хода, что позволяет (пренебрегая потерями напряжения в обмотках) считать  $U_1$  и  $U_2$  приблизительно равными соответствующим ЭДС и пропорциональными  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то есть  $U_1 \cdot \omega_2 = U_2 \cdot \omega_1$ .

Коэффициент трансформации ТН можно определить по формуле:

$$K_U = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}. \quad (8)$$

Зная коэффициент трансформации, можно по результатам измерения низкого напряжения во вторичной обмотке определять высокое первичное напряжение. Приблизжённый характер соотношения между  $U_1$  и  $U_2$  обуславливает наличие погрешности по напряжению и угловой погрешности найденной величины  $U_1$ . В компенсированных ТН производится компенсация этих погрешностей.

Типичное применение ТН – преобразование высокого напряжения в низкое в измерительных цепях и гальваническая развязка. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. При выполнении работы используются следующие блоки и оборудование:

- однофазный источник питания G1 (218.1);
- источник питания A1 (216.1);
- соединительные провода;

- блок мультиметров АЗ (509.3);
- блок датчиков тока и напряжения А8 (402.4).

2.2. Внешний вид блока А8 (402.4) показан на рис. 7. В блок встроены испытываемые датчики с необходимыми шунтами или делителями напряжения и источниками питания.

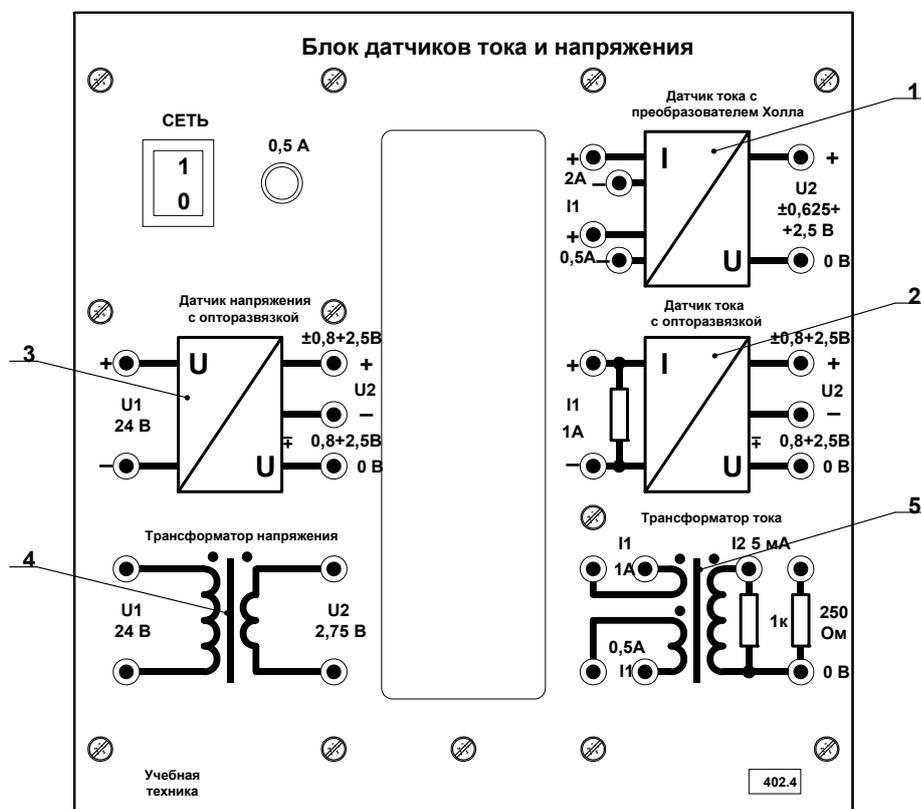


Рис. 7. Блок датчиков тока и напряжения А8:

1 – датчик тока с преобразователем Холла LTS 6-NP; 2 – датчик тока с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840; 3 – датчик напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840; 4 – трансформатор напряжения; 5 – трансформатор тока AC1005

В блоке установлены следующие аналоговые датчики напряжения и тока с гальванической развязкой между цепями входа и выхода:

- датчик тока с преобразователем Холла LTS 6-NP;
- датчик тока с шунтом и опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840;
- датчик напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840;
- трансформатор напряжения;
- трансформатор тока.

На вход испытываемого датчика подается постоянное или переменное напряжение или ток от источника питания А1 (216.1). Выходной сигнал датчиков измеряется мультиметром (блок А3, 509.3).

Датчики 1, 2 и 3 (рис. 7) питаются от встроенных в блок А7 источников питания +5 В. При испытании этих датчиков необходимо включить выключатель «Сеть» блока датчиков тока и напряжения.

Трансформаторы не требуют питания и испытываются только на переменном напряжении или токе.

**2.3. Компенсационный датчик тока с преобразователем Холла LTS 6-NP** выполнен на магнитопроводе с 3 обмотками: две измерительных (3 витка на пределе 2 А, 12 витков на пределе 0,5 А) и компенсирующая. Датчик Холла установлен в зазоре магнитопровода и измеряет его магнитный поток.

На основе сигнала датчика Холла система автоматического регулирования задает ток компенсирующей обмотки так, чтобы магнитный поток в магнитопроводе был равен 0. Датчик работает как на постоянном, так и на переменном токе. Выходной сигнал датчика – напряжение, изменяющееся в диапазоне  $2,5 \pm 0,625$  В. Частотный диапазон датчика 0...100 кГц (погрешность 6 %).

Измерительные обмотки датчика можно использовать одновременно для вычисления суммы или разности двух токов. Подробное описание датчика приведено в документе [6].

**2.4. На основе микросхемы с опторазвязкой HCPL-7840** (описание в документе [7]) выполнены **датчики тока и напряжения**. На вход микросхемы подается напряжение с шунта (датчик тока) или с делителя напряжения (датчик напряжения).

Микросхема имеет дифференциальный вход с номинальным диапазоном входных сигналов  $\pm 200$  мВ и выходы: неинвертирующий  $\pm 0,8 + 2,5$  В и инвертирующий  $\mp 0,8 + 2,5$  В. При измерении разности напряжений на выходах микросхемы постоянные составляющие вычитаются и выходной сигнал меняется в диапазоне  $\pm 1,6$  В, т. е. номинальный коэффициент усиления микросхемы равен 8. Частотный диапазон микросхемы при погрешности не более 5 % равен 0...20 кГц.

**2.5. Трансформатор тока AC1005** (описание в документе [8]) имеет номинальный ток первичной обмотки 5 А и соотношение витков встроенных вторичной обмотки к первичной 1000:1.

### 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

#### 3.1. Исследование датчика тока с преобразователем Холла LTS 6-NP на постоянном токе.

3.1.1. Проверьте схему электропитания блоков А1, А3, А8 и G1. Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.

3.1.2. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

3.1.3. Установите переключатель рода тока на блоке А1 в положение «Постоянный ток». Для испытаний на постоянном токе установите выходное напряжение источника питания близким к нулю (по мультиметру или поворотом ручки в среднее положение).

3.1.4. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 8, б).

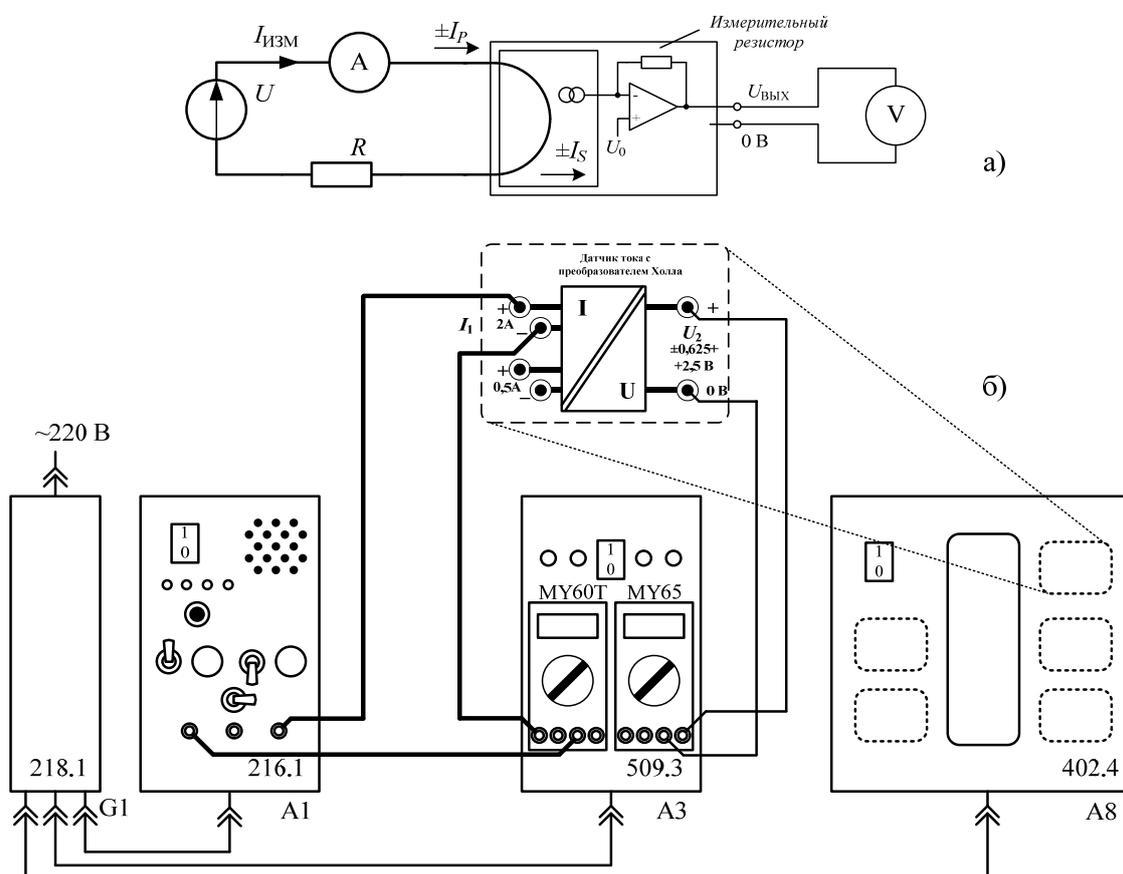


Рис. 8. Схема испытания датчика тока с преобразователем Холла (LTS 6-NP)

Мультиметр МУ60Т блока А3 измеряет ток на входе датчика на пределе измерения «10 А», а мультиметр МУ65 – напряжение на выходе датчика на пределе измерения «20 В». Источник питания А1 задает постоянный ток в цепи из последовательно соединенных резистора номи-

налом 2 Ома (установлен в блоке А1), обмотки датчика тока (блок А8), входа измерения тока мультиметра МУ60Т (гнезда «10 А» и «СОМ», блок А3).

3.1.5. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.1.6. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.1.7. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 1 как  $U_{\text{ВЫХ1}}$ .

**Внимание! Не допускается превышать указанные для выбранного предела («5 В/1,5 А») напряжения и токи нагрузки источника.**

Таблица 1

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{А}$	-1,5	-1,2	-0,9	...	1,5
$U_{\text{ВЫХ1}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ1Т}}, \text{В}$					
$\Delta U_{\text{ВЫХ1Т}}, \text{В}$					
$\delta_1, \%$					

3.1.8. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.2. Исследование датчика тока с опторазвязкой на основе микросхемы **НСРL7840** на постоянном токе.

3.2.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.1.1...3.1.3.

3.2.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 9, б.

Мультиметр МУ60Т блока А3 измеряет ток на входе датчика на пределе измерения «10 А», а мультиметр МУ65 – напряжение на выходе датчика на пределе измерения «20 В». Источник питания А1 задает постоянный ток в цепи из последовательно соединенных резистора номиналом 2 Ома (установлен в блоке А1), обмотки датчика тока (блок А8), входа измерения тока мультиметра МУ60Т (гнезда «10 А» и «СОМ», блок А3).

3.2.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.2.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

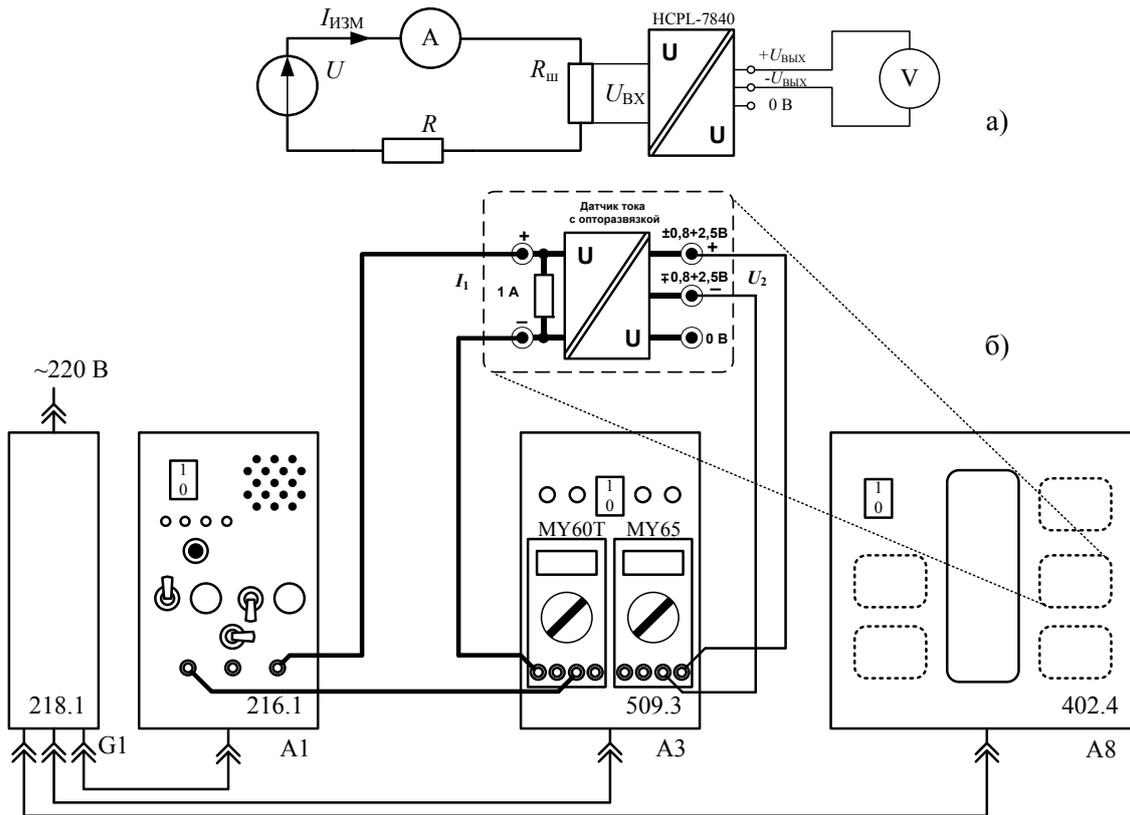


Рис. 9. Схема испытания датчика тока с опторазвязкой на основе микросхемы HСPL7840

3.2.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 2 как  $U_{\text{ВЫХ2}}$ .

Таблица 2

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{A}$	-1,5	-1,2	-0,9	...	1,5
$U_{\text{ВЫХ2}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ2Т}}, \text{В}$					
$\Delta U_{\text{ВЫХ2Т}}, \text{В}$					
$\delta_2, \%$					

3.2.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.3. Исследование датчика тока с преобразователем Холла LTS 6-NP на переменном токе.

3.3.1. Проверьте схему электропитания блоков А1, А3, А8 и G1. Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.

3.3.2. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

3.3.3. Для испытаний на переменном токе установите частоту выходного сигнала источника А1 по указанию преподавателя (например, 50 Гц):

- подключите к выходу источника питания А1 мультиметр МУ65 блока А3 в положении измерения частоты. Установите переменное выходное напряжения источника А1;
- включите выключатель «СЕТЬ» блоков А1 (216.1) и А3 (509.3);
- ручкой «Ампл.» увеличьте выходное напряжение источника А1 для получения устойчивых показаний частоты. Тумблером выберите диапазон частоты источника, а ручкой «Частота» установите значение частоты, при которой будет проводиться испытание датчика;
- отключите питание блоков А1 (216.1) и А3 (509.3) выключателями «СЕТЬ» этих блоков.

3.3.4. Установите минимальное выходное напряжение источника поворотом ручки «Ампл.» источника А1 против часовой стрелки до упора.

3.3.5. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 8, б.

3.3.6. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.3.7. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.3.8. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 3 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИНЗ}}$ .

Таблица 3

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{А}$	0	0,15	0,3	...	1,5
$U_{\text{ВЫХ\_СИНЗ}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИНЗТ}}, \text{В}$					
$\Delta U_{\text{ВЫХ\_СИНЗ}}, \text{В}$					
$\delta_3, \%$					

3.3.9. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

#### 3.4. Исследование датчика тока с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840 на переменном токе.

3.4.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.3.1...3.3.4.

3.4.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 9, б.

3.4.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.4.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.4.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 4 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИН4}}$ .

Таблица 4

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{A}$	0	0,15	0,3	...	1,5
$U_{\text{ВЫХ\_СИН4}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН4Т}}, \text{В}$					
$\delta_4, \%$					

3.4.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.5. Исследование трансформатора тока АС1005.

3.5.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.3.1...3.3.4.

3.5.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 10, б.

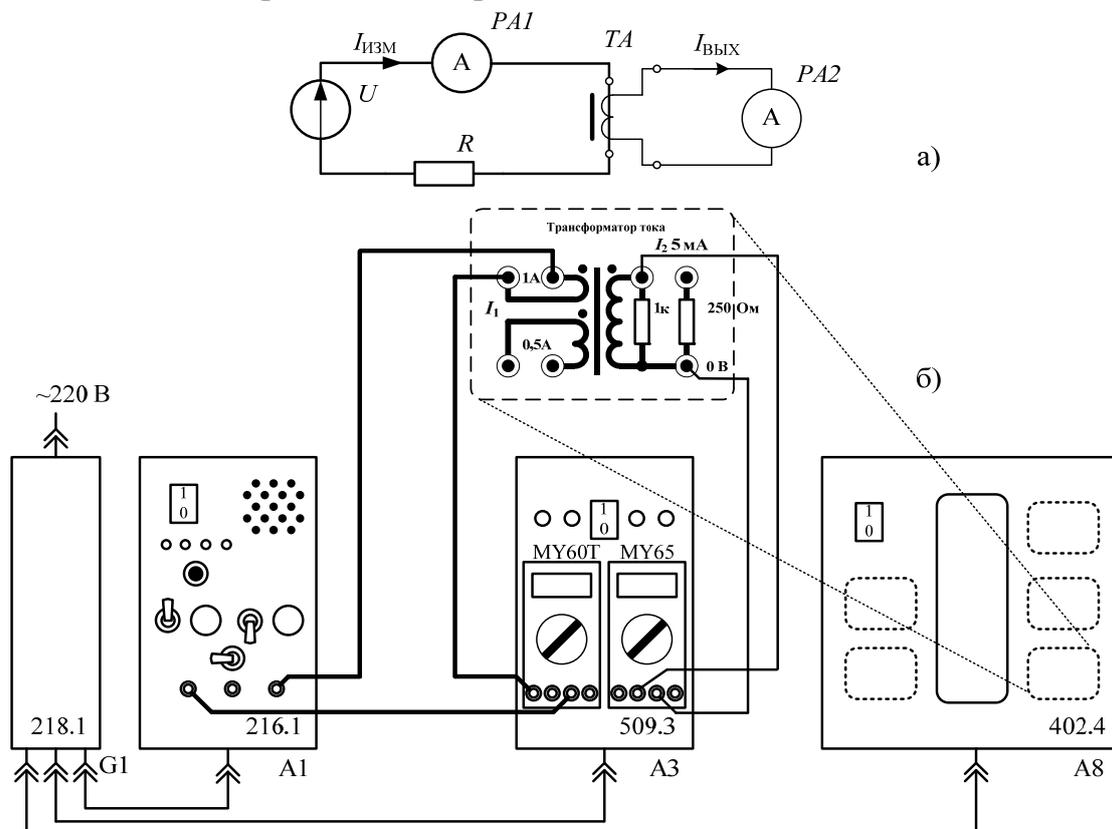


Рис. 10. Схема испытания трансформатора тока при подключении его вторичной обмотки ко входу измерения тока мультиметра МУ65

3.5.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.5.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.5.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 5 как  $I_{\text{ТТ\_СИН5}}$ .

3.5.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

3.5.7. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений ТТ, изображённой на рис. 11, б, при подключении его вторичной обмотки к нагрузке 200 Ом.

3.5.8. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.5.9. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1, установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 5 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИН6}}$ .

3.5.10. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

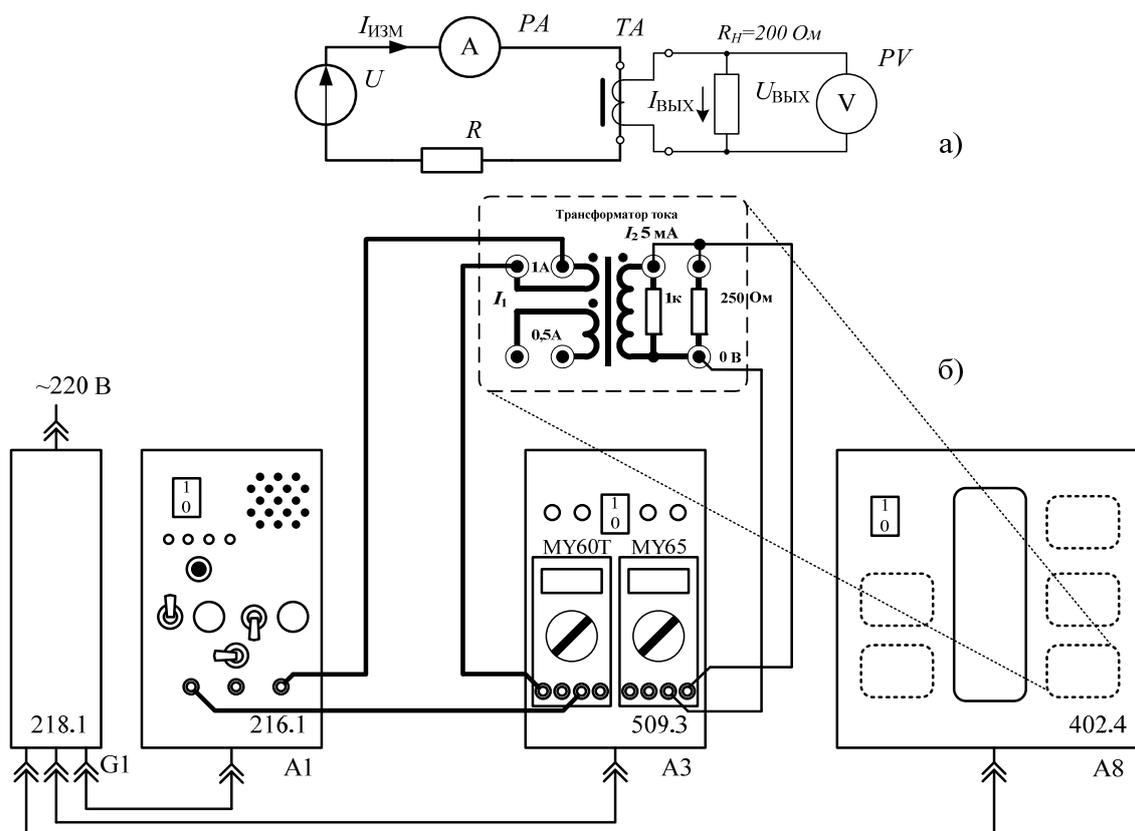


Рис. 11. Схема испытания трансформатора тока при подключении его вторичной обмотки к нагрузке 200 Ом

Таблица 5

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{A}$	0	0,15	0,3	...	1
$I_{\text{ТТ\_СИН5}}, \text{мА}$					
$I_{\text{ТТ\_СИН5Т}}, \text{мА}$					
$\delta_5, \%$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН6}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН6Т}}, \text{В}$					
$\delta_6, \%$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН7}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН7Т}}, \text{В}$					
$\delta_7, \%$					

3.5.11. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений ТТ, изображённой на рис. 12, б, при подключении его вторичной обмотки к нагрузке 1 кОм.

3.5.12. Включите питание блоков А8, А3, А1.

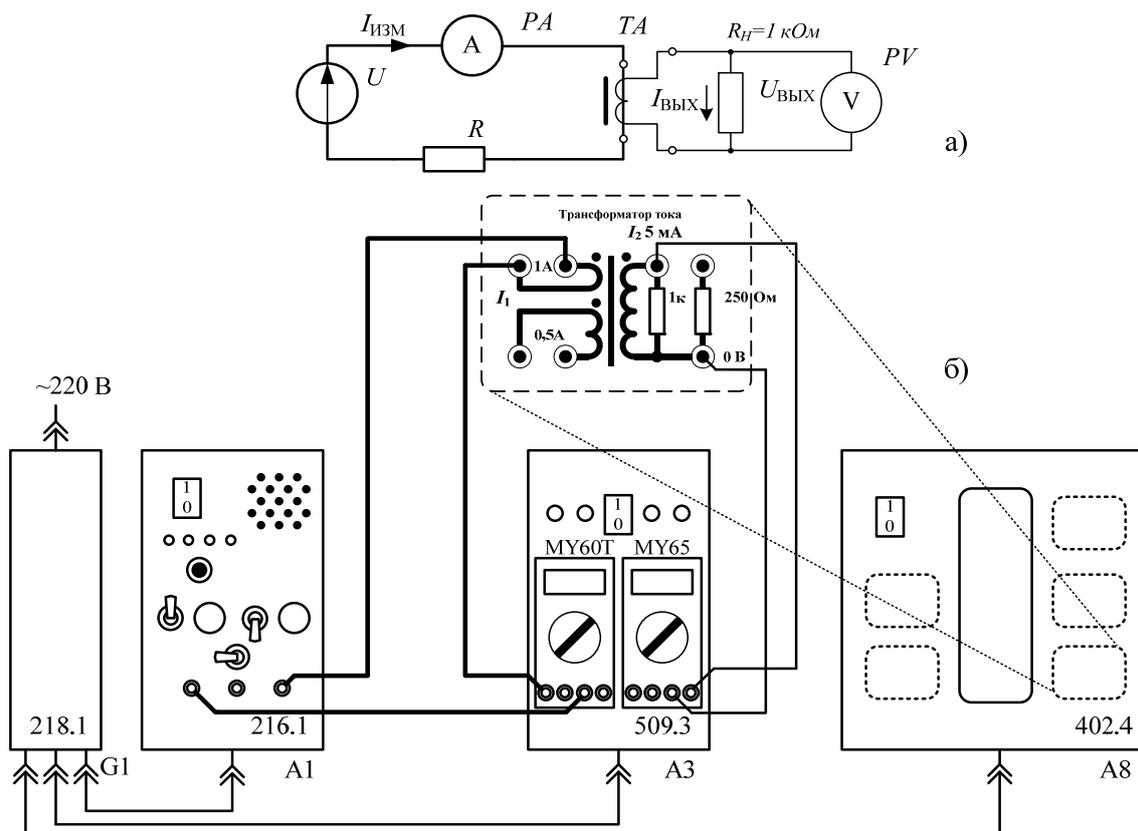


Рис. 12. Схема испытания трансформатора тока при подключении его вторичной обмотки к нагрузке 1 кОм

3.5.13. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1, установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 5 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИН7}}$ .

3.5.14. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.6. Исследование трансформатора напряжения (ТН).

3.6.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.3.1...3.3.4.

3.6.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 13, б).

3.6.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «20 В/0,5 А».

3.6.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.6.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений входного напряжения  $U_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика. Измерьте при этих напряжениях выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 6 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИН8}}$ .

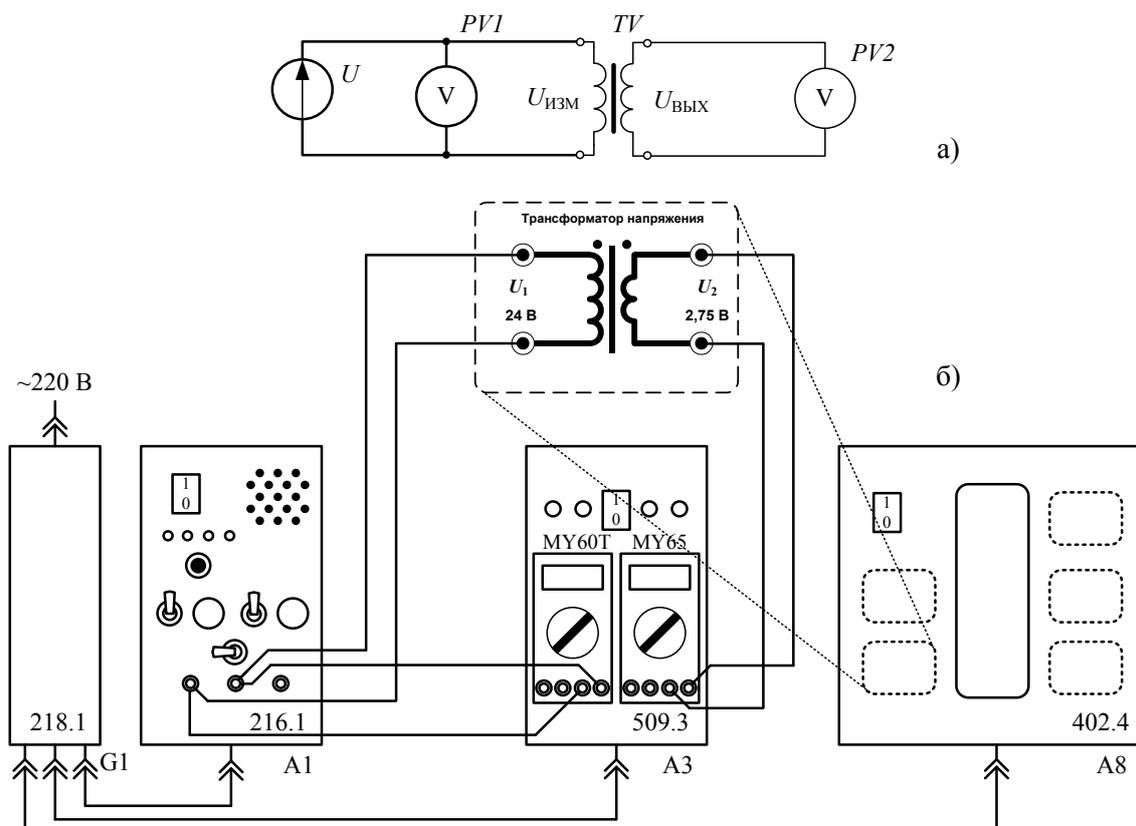


Рис. 13. Схема испытания трансформатора напряжения

Таблица 6

$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$	0	2	4	...	14
$U_{\text{ВЫХ\_СИН8}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН8Т}}, \text{В}$					
$\delta_8, \%$					

**Примечание.** При испытании датчиков на переменном токе (синусоидальном и несинусоидальном) амплитуда переменного напряжения на выходе источника питания А1 не может превышать максимального значения 20 В. Соответственно, максимальное действующее значение выходного напряжения источника по показаниям мультиметров составит для синусоидального напряжения  $U_m/\sqrt{2} = 20/\sqrt{2} \approx 14,1 \text{ В}$ .

3.6.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.7. Исследование датчика напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840 на переменном токе.

3.7.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.3.1...3.3.4.

3.7.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 14, б.

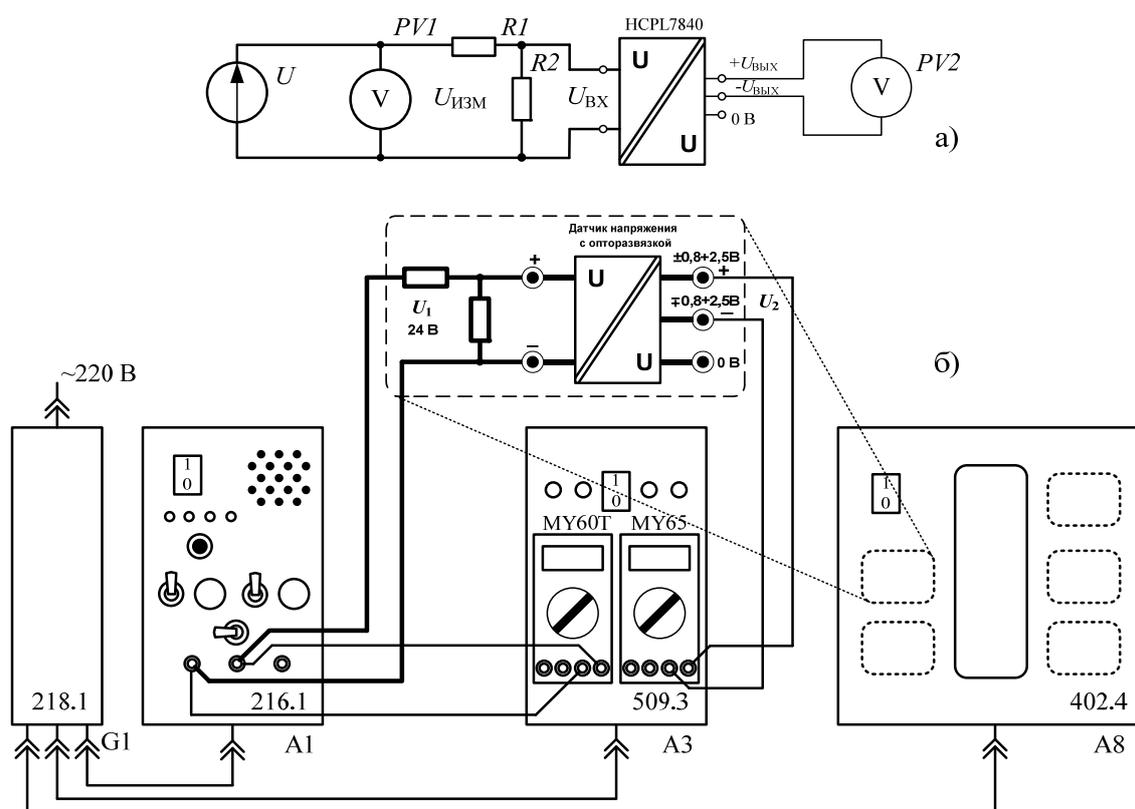


Рис. 14. Схема испытания датчика напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL7840

3.7.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «20 В/0,5 А».

3.7.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.7.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений входного напряжения  $U_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика. Измерьте при этих напряжениях выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 7 как  $U_{\text{ВЫХ\_СИН9}}$ .

Таблица 7

$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$	0	2	4	...	14
$U_{\text{ВЫХ\_СИН9}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_СИН9Т}}, \text{В}$					
$\delta_9, \%$					

3.7.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.8. Исследование датчика напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы NSPL7840 на постоянном токе.

3.8.1. Повторите действия в соответствии с пп. 3.1.1...3.1.3.

3.8.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений, изображённой на рис. 14, б.

3.8.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «20 В/0,5 А».

3.8.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.8.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений входного напряжения  $U_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика. Измерьте при этих напряжениях выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 8 как  $U_{\text{ВЫХ\_10}}$ .

Таблица 8

$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$	-20	-16	-12	...	20
$U_{\text{ВЫХ\_10}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_10Т}}, \text{В}$					
$\delta_{10}, \%$					

3.8.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.9. Исследование датчика тока при несинусоидальной форме тока.

3.9.1. Соберите схему для одного из датчиков тока по указанию преподавателя на переменном токе.

3.9.2. Переключите тумблер блока А1 в положение, соответствующее треугольной, пилообразной или прямоугольной форме тока по указанию преподавателя.

3.9.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «5 В/1,5 А».

3.9.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.9.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений тока  $I_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика, измерьте выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 9 как  $U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН11}}$  (или  $I_{\text{ТТ\_НЕСИН11}}$ ).

Таблица 9

$I_{\text{ИЗМ}}, \text{А}$	0	0,15	0,3	...	1,5
$U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН11}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН11Т}}, \text{В}$					
$\delta_4, \%$					

3.9.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.10. Исследование датчика напряжения при несинусоидальной форме напряжения.

3.10.1. Соберите схему для одного из датчиков напряжения по указанию преподавателя на переменном токе.

3.10.2. Переключите тумблер блока А1 в положение, соответствующее треугольной, пилообразной или прямоугольной форме напряжения по указанию преподавателя.

3.10.3. Установите переключатель диапазонов выходного напряжения источника питания А1 в положение «20 В/0,5 А».

3.10.4. Включите питание блоков А8, А3, А1.

3.10.5. Вращая регулятор выходного напряжения «Ампл.» источника питания А1 установите несколько значений входного напряжения  $U_{\text{ИЗМ}}$  испытываемого датчика. Измерьте при этих напряжениях выходной сигнал датчика и занесите результаты измерений в табл. 10 как  $U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН12}}$ .

Таблица 10

$U_{\text{ИЗМ}}, \text{В}$	0	2	4	...	20
$U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН12}}, \text{В}$					
$U_{\text{ВЫХ\_НЕСИН12Т}}, \text{В}$					
$\delta_{10}, \%$					

3.10.6. После завершения опыта отключите питание всех блоков.

### 3.11. Исследование частотных характеристик датчика тока (напряжения).

3.11.1. Соберите схему для одного из датчиков тока (напряжения) по указанию преподавателя на переменном токе. Подключите двулучевой осциллограф: один канал к источнику питания, второй канал – к выходу датчика.

3.11.2. Выберите прямоугольную форму напряжения источника питания. Сравните форму импульсов напряжения на источнике и выходе датчика при разных частотах и напряжениях подаваемых импульсов. Оцените время отклика датчика на изменение измеряемого сигнала и время переходного процесса на выходе датчика.

3.11.3. Проведите другие исследования частотных характеристик датчиков по указанию преподавателя.

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Зарисовать исследуемые схемы испытания датчиков тока и напряжения и привести таблицы результатов 1...10.

4.2. Построить характеристики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ИЗМ}})$  и  $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ИЗМ}})$  для схем датчиков тока и  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ИЗМ}})$  для схем датчиков напряжения.

4.3. Построить характеристики  $U_{\text{ВЫХ\_ХТ}} = f(I_{\text{ИЗМ}})$  и  $I_{\text{ВЫХ\_ХТ}} = f(I_{\text{ИЗМ}})$  для схем датчиков тока и  $U_{\text{ВЫХ\_ХТ}} = f(U_{\text{ИЗМ}})$  для схем датчиков напряжения.

4.4. Определить чувствительность каждого датчика каждой схемы по формулам:  $S_{\text{ДТ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ИЗМ}}}$  ( $S_{\text{ДТ}} = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ИЗМ}}}$ ) для датчиков тока

$$\text{и } S_{\text{ДН}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ИЗМ}}} \text{ для датчиков напряжения,}$$

где  $\Delta I_{\text{ИЗМ}}$ ,  $\Delta U_{\text{ИЗМ}}$  – приращение входного сигнала датчика;

$\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$  – соответствующее приращение выходного сигнала.

4.5. Рассчитать теоретические значения выходных сигналов  $U_{\text{ВЫХ\_ХТ}}$  по формулам:

$$U_{\text{ВЫХ\_ХТ}} = 2,5 + (0,625 \cdot I_{\text{ИЗМ}} / I_{\text{НОМ}}) - \text{для датчика тока с преобразователем Холла LTS 6-NP при измерении постоянного тока;}$$

$U_{\text{ВЫХ2Т}} = 1,6 \cdot I_{\text{ИЗМ}}$  – для датчика тока с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL-7840 при измерении постоянного тока;

$U_{\text{ВЫХ_СИН3Т}} = 0,625 \cdot I_{\text{ИЗМ}} / I_{\text{НОМ}}$  – для датчика тока с преобразователем Холла LTS 6-NP при измерении переменного тока;

$U_{\text{ВЫХ_СИН4Т}} = 1,6 \cdot I_{\text{ИЗМ}}$  – для датчика тока с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL-7840 при измерении переменного тока;

$I_{\text{ТТ_СИН5Т}} = 0,01 \cdot I_{\text{ИЗМ}}$  – для трансформатора тока в режиме короткого замыкания;

$U_{\text{ВЫХ_СИН6Т}} = 1 \cdot I_{\text{ИЗМ}}$  – для трансформатора тока с нагрузкой  $R_{\text{Н}} = 200 \text{ Ом}$  при подключении обмотки в 1 А;

$U_{\text{ВЫХ_СИН7Т}} = 5 \cdot I_{\text{ИЗМ}}$  – для трансформатора тока с нагрузкой  $R_{\text{Н}} = 1 \text{ кОм}$ ; при подключении обмотки в 1 А;

$U_{\text{ВЫХ_СИН8Т}} = 0,1146 \cdot U_{\text{ИЗМ}}$  – для трансформатора напряжения;

$U_{\text{ВЫХ_СИН9Т}} = 0,0667 \cdot U_{\text{ИЗМ}}$  – для датчика напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL-7840 при измерении переменного тока;

$U_{\text{ВЫХ_10Т}} = 0,0667 \cdot U_{\text{ИЗМ}}$  – для датчика напряжения с опторазвязкой на основе микросхемы HCPL-7840 при измерении постоянного тока.

4.6. Рассчитать абсолютную  $\Delta U_{\text{ВЫХ}_X}$  и относительную  $\delta_X$  ошибки (погрешности измерений) по формулам:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}_X} = U_{\text{ВЫХ_ХТ}} - U_{\text{ВЫХ}_X}, \quad (9)$$

$$\delta_X = \frac{U_{\text{ВЫХ_ХТ}} - U_{\text{ВЫХ}_X}}{U_{\text{ВЫХ_ХТ}}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\Delta U_{\text{ВЫХ}_X}$  – абсолютная ошибка измерения х-ого датчика;

$\delta_X$  – относительная погрешность измерения х-ого датчика;

$U_{\text{ВЫХ_ХТ}}$  – теоретически рассчитанное значение выходного сигнала х-ого датчика;

$U_{\text{ВЫХ}_X}$  – экспериментально измеренное значение выходного сигнала х-ого датчика;

и занести эти величины в табл. 1...10.

4.7. Ответить на контрольные вопросы.

4.8. Сделать выводы по работе, в частности, сравнить различные схемы включения датчиков тока и напряжения по погрешности измерения, чувствительности, линейности характеристики, диапазону работы, выходному сопротивлению, быстродействию и т. п., т. е. выделить основные достоинства и недостатки каждой из схем, и предложить в связи с этим варианты использования исследованных схем.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Как осуществляется измерение тока с помощью эффекта Холла?

5.2. Проанализируйте достоинства и недостатки двух основных видов датчиков, основанных на эффекте Холла, укажите особенности их применения.

5.3. Зачем в некоторых датчиках используется развязка? Каковы два основных вида развязок вы знаете? Каков их принцип действия? В каких датчиках они используются?

5.4. От каких факторов зависит использование того или иного датчика тока/напряжения?

5.5. Какие еще датчики пригодны для измерения тока и напряжения? Дать краткую характеристику.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Зайцев А.П., Шадрин Г.А. Элементная база систем автоматического управления. Часть I. Датчики тока и напряжения. Учебное пособие. – Томск: СТУ, 2002. – 164 с.
3. ГОСТ 7746-2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (01.01.2003).
4. ГОСТ 18685-73. Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (01.07.1974).
5. William M. Flanagan Handbook of Transformer Design and Applications. – McGraw-Hill Professional. – P. Chap. 1, p. 1–2. – ISBN 0070212910.

6. Датчик тока LTS 6-НР. Техническое описание. ООО “ТВЕЛЕМ”. *Файл lts6-np.pdf.*
7. Analog Isolation Amplifier HCPL-7840. Technical data. HEWLETT PACKARD. *Файл HCPL-7840.pdf.*
8. Current Transformer Quick Reference Guide. AC Series. Technical data. THE TALEMA GROUP. *Файл AC\_1005.pdf.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение принципов работы основных видов датчиков угловой скорости, исследование характеристик аналогового и цифрового датчиков угловой скорости – тахогенератора и оптического энкодера со счётчиком импульсов.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. Тахогенераторы

Тахогенераторами (ТГ) называют электрические микромашины, предназначенные для преобразования угловой скорости контролируемого вала в электрический сигнал. Таким образом, ТГ является датчиком генераторного типа. Поскольку в электрических машинах электродвижущая сила (ЭДС) пропорциональна угловой скорости вращения ротора, то в качестве ТГ могут быть использованы различные типы электрических генераторов: асинхронные, постоянного тока, синхронные и т. д.

**Асинхронный тахогенератор (АТГ)** имеет на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве на электрический угол  $90^\circ$  (рис. 1). Одна из них – обмотка возбуждения  $O_1$  – подключается к сети, с другой – генераторной обмотки  $O_2$  – снимается выходное напряжение ТГ. Ротор АТГ представляет собой полый немагнитный цилиндр с большим активным сопротивлением. Для уменьшения влияния неравномерности воздушного зазора и несимметрии ротора на выходную характеристику прецизионный АТГ обычно выполняют с количеством пар полюсов  $p \geq 2$ .

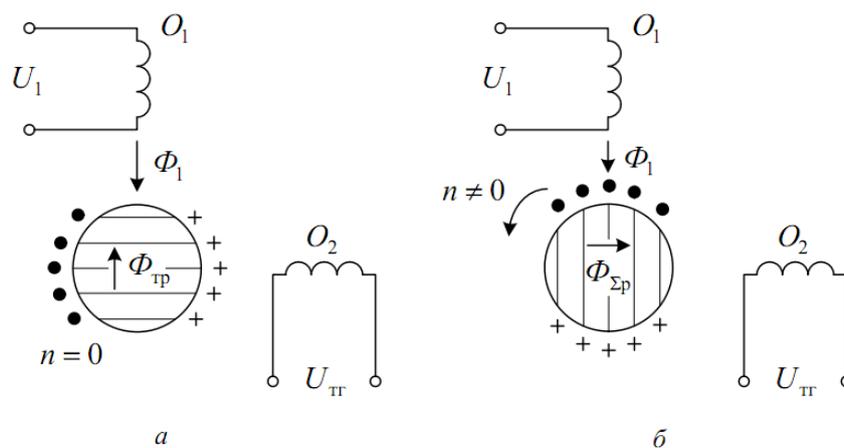


Рис. 1. К принципу действия АТГ

При неподвижном роторе (рис. 1, а) пульсирующий по постоянной оси поток  $\Phi_1$  наводит в роторе ЭДС трансформации. Контур токов ротора, расположенные в плоскостях, перпендикулярных оси  $\Phi_1$ , создают поток  $\Phi_{ТГ}$ . Теоретически при неподвижном роторе  $U_{ТГ}=0$ , т. к. поток по оси обмотки  $O_2$  равен нулю. Однако за счет, например, возможной неперпендикулярности обмоток  $O_1$  и  $O_2$ , наличия короткозамкнутых контуров, потоков рассеяния, емкостных связей обмоток появляется поперечная составляющая магнитного потока, приводящая к остаточному напряжению на обмотке.

При вращении ротора (рис. 1, б) в его элементарных проводниках наводится помимо трансформаторной ЭДС и ЭДС вращения. Под действием ЭДС вращения по ротору текут токи, контуры которых практически совпадают с осью потока  $\Phi_1$ . Такая ориентация контуров с током объясняется большим активным сопротивлением материала ротора. Токи, наведенные в роторе, создают поток  $\Phi_{\Sigma P}$ , ось которого совпадает с осью генераторной обмотки и наводит в ней ЭДС с частотой сети.

Основные достоинства АТГ заключаются в их бесконтактности, высокой надежности, малой инерционности. Недостатки АТГ, ограничивающие область их применения, связаны с нелинейностью выходной характеристики, наличия остаточного напряжения, низкими массогабаритными показателями.

**Тахогенераторы постоянного тока (ТГПТ).** По принципу действия и конструкции не отличаются от обычных генераторов постоянного тока малой мощности с возбуждением от соответствующей обмотки (рис. 2, а) или от постоянных магнитов (рис. 2, б). Стабилизация тока в обмотке возбуждения достигается посредством ее питания от источника стабилизированного напряжения и применения температурной компенсации изменения сопротивления обмотки. Особенность работы тахогенератора состоит в том, что якорь обычно включен на постоянное сопротивление нагрузки  $R_H$ .

Ток в цепи якоря можно определить следующим образом:

$$I = \frac{E}{R_B + R_H} = \frac{c \cdot n \cdot \Phi_B}{R_B + R_H}, \quad (1)$$

где  $R_B$  – внутреннее сопротивление тахогенератора;

$c$  – конструктивная постоянная генератора;

$n$  – скорость вращения якоря;

$\Phi_B$  – поток возбуждения.

Выходное напряжение тахогенератора определяется следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot R_{\text{H}} = \frac{c \cdot \Phi_{\text{В}} \cdot R_{\text{H}}}{R_{\text{В}} + R_{\text{H}}} \cdot n = \frac{c \cdot \Phi_{\text{В}} \cdot R_{\text{H}} \cdot 30}{(R_{\text{В}} + R_{\text{H}}) \cdot \pi} \cdot \omega. \quad (2)$$

Величины, входящие в числитель и знаменатель дроби выражения (2), постоянны. Поэтому можно записать так:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot \omega, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения якоря,  $\text{с}^{-1}$ ;

$k$  – коэффициент преобразования тахогенератора, который определяется следующим образом:

$$k = \frac{30 \cdot c \cdot \Phi_{\text{В}}}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{В}}}{R_{\text{H}}}} \quad (4)$$

Уравнение (3), представляющее собой статическую характеристику тахогенератора, показывает, что напряжение на выходе тахогенератора пропорционально частоте вращения  $\omega$  (рис. 2, в). Условие пропорциональности выполняется, если  $\Phi_{\text{В}} = \text{const}$ . Однако магнитный поток возбуждения может изменяться под действием реакции якоря.

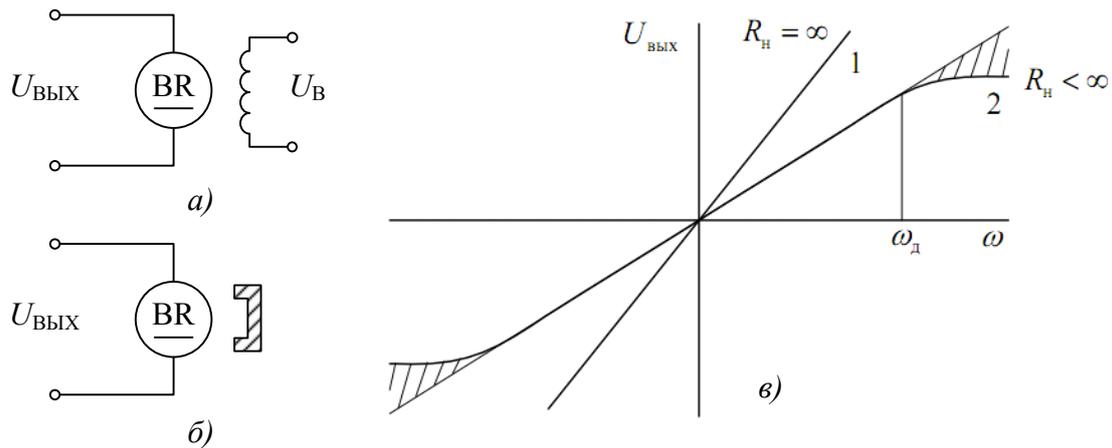


Рис. 2. Схемы включения (а, б) и выходная характеристика (в) ТГПТ

Если щетки расположены на нейтрали (рис. 3), то продольная составляющая реакции якоря (намагничивающая и размагничивающая) равна нулю. Поперечная же составляющая реакции якоря, искажая распределение индукции на поверхности якоря, изменяет величину магнитного потока лишь в том случае, если полюса и якорь находятся в стадии некоторого насыщения. Напряжение на выходе тахогенератора будет линейной функцией от скорости вращения, если щетки тахогенератора будут находиться на нейтрали; полюса и якорь не будут насыщены; ток нагрузки не превысит значений, при которых под сбегющим краем полюса возникло бы насыщение из-за действия поперечной составляющей реакции якоря.

На рис. 2, в приведена зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\omega)$  при холостом ходе  $R_{\text{H}} = \infty$  (1) и при некоторой нагрузке  $R_{\text{H}} < \infty$  (2). Отклонение характеристики 2 от линейного закона вызывается тем, что с увеличением скорости вращения возрастает ток якоря, поперечные ампер-витки якоря под сбегающим краем полюса все больше увеличивают индукцию, которая при  $\omega > \omega_{\text{д}}$  достигает стадии насыщения, т. е. в дальнейшем изменяется не пропорционально ампер-виткам. Под набегающим же краем полюса происходит уменьшение индукции пропорционально ампер-виткам. В результате магнитный поток уменьшается, и характеристика 2 отклоняется от линейного закона. Таким образом, каждому заданному значению  $R_{\text{H}}$  соответствует определенный диапазон скорости от нуля до  $\omega_{\text{д}}$ , в пределах которого напряжение является линейной функцией скорости вращения. Причем этот диапазон возрастает с увеличением сопротивления нагрузки, коэффициент преобразования тахогенератора (4) также при этом увеличивается.

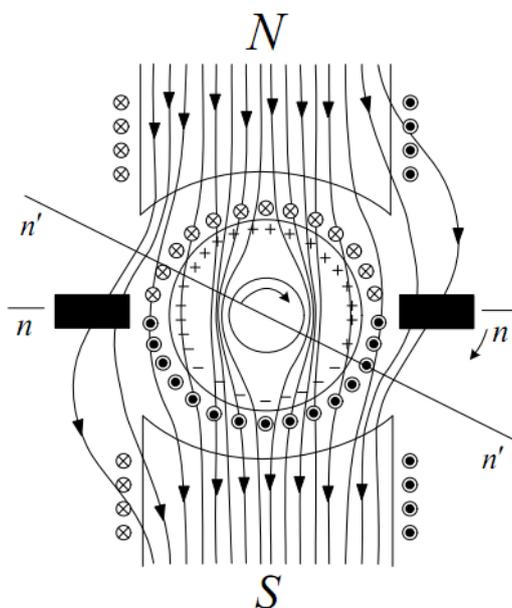


Рис. 3. К принципу действия ТГПТ

Тахогенераторы постоянного тока имеют по сравнению с АТГ ряд преимуществ: выходной сигнал на постоянном токе позволяет создавать простую схему управления; при изменении направления вращения меняется полярность сигнала, что является дополнительной информацией для схемы управления; меньше габариты и масса, проще схема компенсации температурной погрешности.

ТГПТ бывают коллекторными и бесконтактными с полупроводниковым коммутатором. Основным недостатком коллекторных машин нестабильность параметров, связанная с изменением переходного сопротивления скользящей контактной пары при внешних воздействиях. Бес-

контактные ТГ имеют зону нечувствительности, повышенный уровень пульсаций и нелинейности выходного напряжения. Это связано с нелинейностью вольтамперной характеристики элементов коммутатора при микротоках.

Кроме ТГ перечисленных типов применяются синхронные и индукторные ТГ.

## 1.2. Оптические датчики скорости

Функциональная схема оптического датчика скорости приведена на рис. 4.

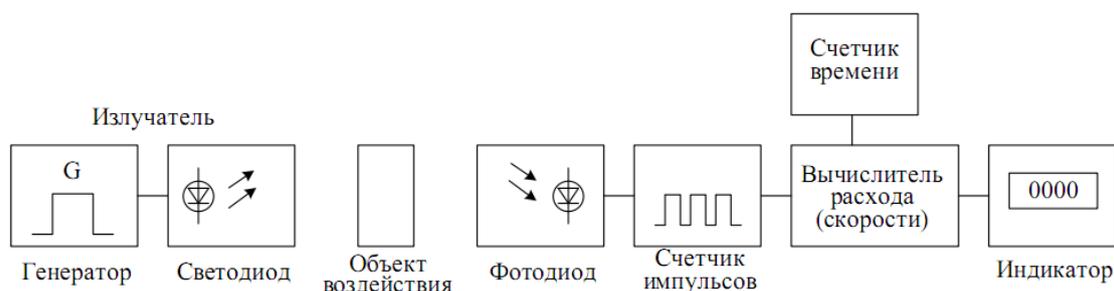


Рис. 4. Функциональная схема оптического датчика скорости

При подаче напряжения на излучатель начинается вырабатываться оптическое излучение, которое при отсутствии препятствий попадает на фототранзистор (фотодиод, фотосимистор и т. д.), и он открывается при периодическом прерывании луча оптического излучения. На выходе фототранзистора появляются электрические импульсы, которые поступают на счетчик импульсов. Счетчик импульсов во взаимодействии с вычислителем производит преобразование импульсов в выходной сигнал, пропорциональный скорости вращения производственного механизма.

В соответствии с ГОСТ Р 50030.5.2 оптические датчики классифицируются на три группы:

- **тип T** – с приемом прямого луча от излучателя;
- **тип R** – с приемом луча, возвращенного от отражателя;
- **тип D** – с приемом луча, рассеянно отраженного от объекта.

**Тип T** (рис. 5, а) характеризуется тем, что излучатель и приемник размещены в отдельных корпусах. Прямой оптический луч идет от излучателя к приемнику и может быть перекрыт объектом воздействия.

**Тип R** (рис. 5, б) характеризуется тем, что излучатель и приемник размещены в одном корпусе. Приемник принимает луч излучателя, отраженный от специального отражателя. При этом возможны два варианта использования этих изделий:

- объект воздействия прерывает луч при неподвижно закрепленном отражателе;
- отражатель закрепляется на подвижном объекте.

**Тип D** (рис. 5, в) характеризуется тем, что излучатель и приемник размещены в одном корпусе. Приемник принимает луч излучателя, рассеянно отраженный от объекта воздействия. Контролируемый объект может перемещаться как вдоль относительной оси, так и под углом к ней.

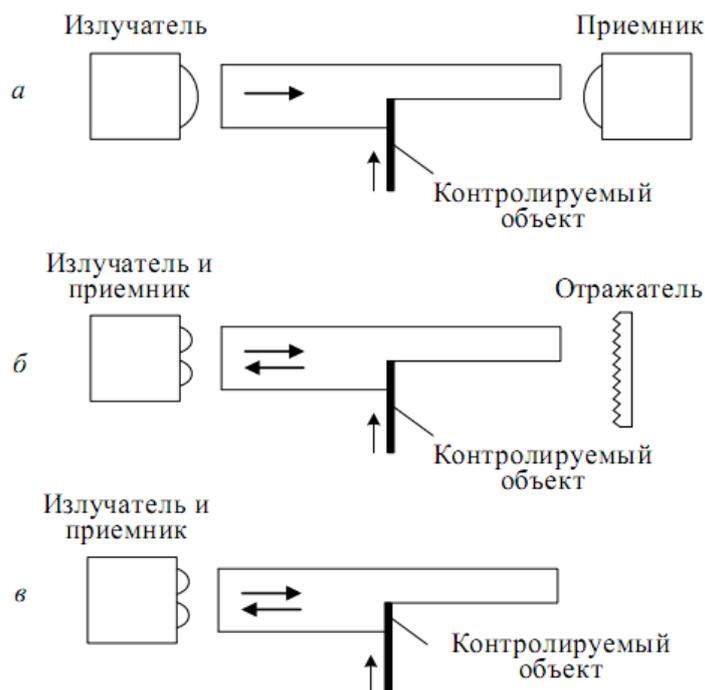


Рис. 5. Оптические датчики скорости: а – тип Т, б – тип R, в – тип D

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. При выполнении работы используется блок испытания датчика скорости вращения А5 (408), показанный на рис. 6.

2.2. В блоке А5 установлен **электродвигатель постоянного тока** (1) с номинальным напряжением 24 В и номинальной скоростью 8000 об/мин в одном корпусе с тахогенератором.

2.3. На валу двигателя закреплен кодирующий **диск оптического энкодера** (2) с 12 зубцами. Зубцы перекрывают световой поток (2) оптрона (3). Так как оптроны расположены на некотором расстоянии, сигналы на их выходах (6) появляются не одновременно, и очередность их появления зависит от направления вращения вала двигателя. Это позволяет определять не только скорость, но и направление вращения двигателя.

2.4. Схема электрическая соединений при исследовании датчиков скорости вращения показана на рис. 7, б. На гнезда питания двигателя (4, рис. 6) подается регулируемое постоянное напряжение с выхода источника питания А1 (216.1). Напряжение на выходе тахогенератора (5) измеряется одним из мультиметров блока А3.

2.5. Оптроны энкодера питаются от источника +5 В блока А2 (соединены гнезда «+5 В» и «0 В» блоков А5 и А2). Частота импульсов на выходе оптрона А измеряется счетчиком импульсов (вход 1, блок А2), работающим в режиме измерения частоты. Так как кодирующий диск имеет 12 зубцов, частота сигнала на выходах оптронов превышает число оборотов вала двигателя в секунду в 12 раз.

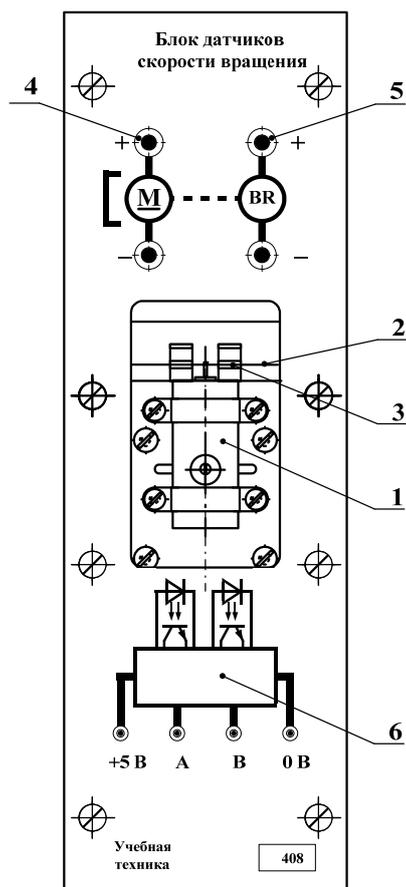


Рис. 6. Блок испытания датчиков скорости вращения

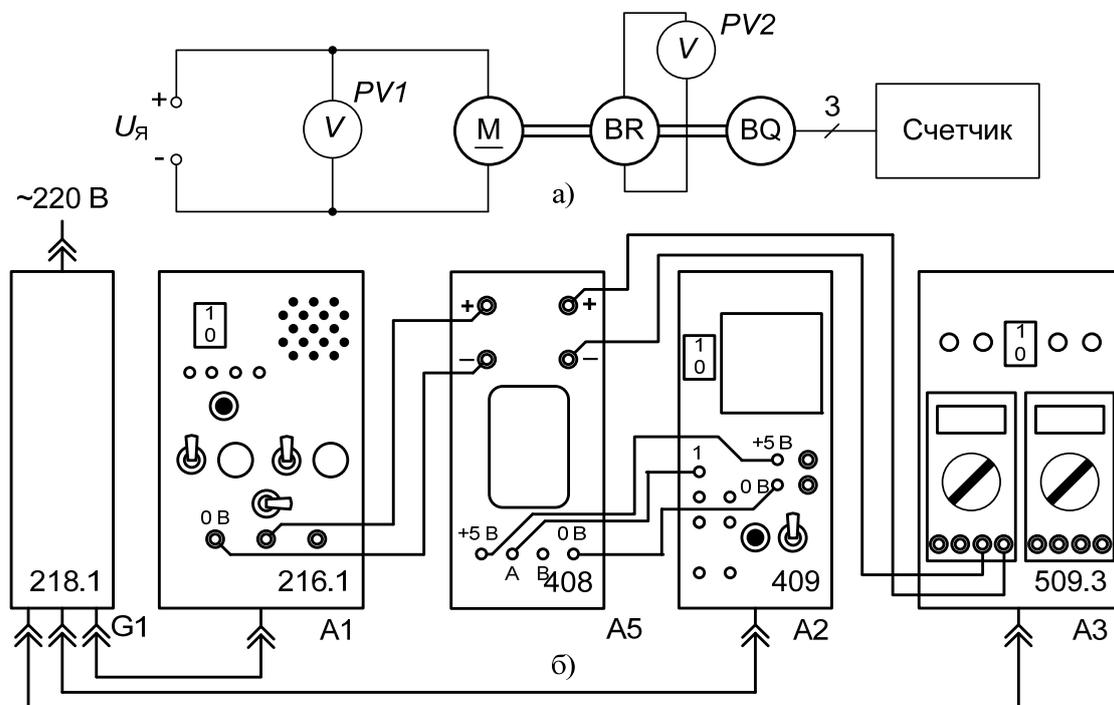


Рис. 7. Схема соединений при исследовании датчиков скорости

2.6. Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блоков А1, А2, А3.

## 2.7. Описание счетчика импульсов СИ8

Универсальный программируемый восьмиразрядный счетчик импульсов СИ8 предназначен для подсчета:

- количества поступающих на его входы импульсов и перевода результата в физическую величину (путем умножения на заданный множитель);
- частоты и длительности поступающих на его входы импульсов;
- среднего и суммарного расхода (скорости) совместно с импульсным датчиком.

Функциональная схема прибора приведена на рис. 8. Прибор имеет три входа для подключения внешних управляющих устройств, которые через селектор входов подаются на входы блока обработки данных.

Блок обработки данных содержит реверсивный счетчик импульсов с предделителем на входе и умножителем на выходе, счетчик времени и вычислитель среднего расхода, а также два логических устройства, которые по заданному пользователем алгоритму формируют сигналы управления выходными устройствами.

Прибор имеет три входа для подключения внешних управляющих сигналов. К входам могут быть подключены:

- контакты кнопок, выключателей, герконов, реле и т. п.;
- активные датчики, имеющие на выходе транзистор n-p-n-типа с открытым коллекторным выходом;
- другие типы датчиков с выходным напряжением высокого уровня +2,4...+30 В и низкого уровня 0...0,8 В. Выходной ток при напряжении низкого уровня не превышает 15 мА.

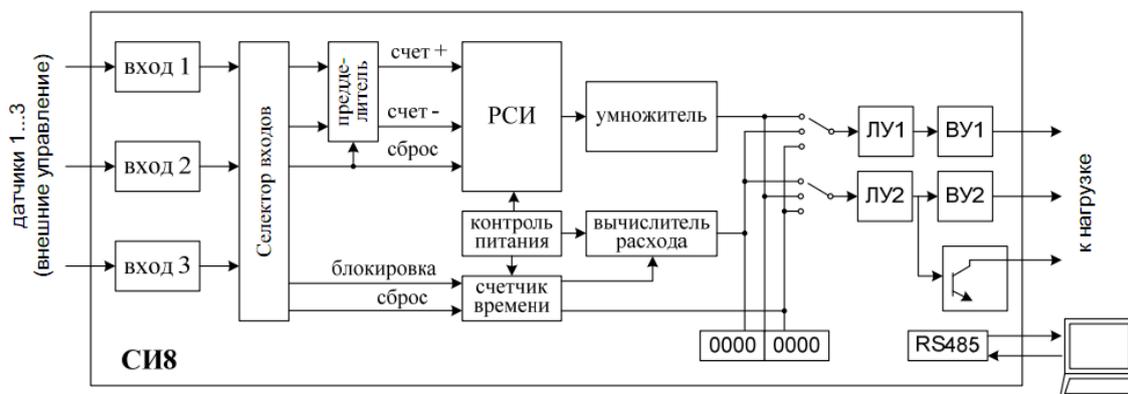


Рис. 8. Функциональная схема счетчика СИ8

## Программирование прибора СИ8

Режим ПРОГРАММИРОВАНИЕ предназначен для записи в энергонезависимую память прибора, требуемых при эксплуатации рабочих параметров и их изменения.

В каждой группе параметров имеется параметр out, служащий для выхода из группы в меню верхнего уровня. Выбор нужного параметра внутри группы осуществляется кнопкой , переход к параметру out осуществляется кнопкой .

Вывод на индикаторы текущего значения выбранного параметра производится нажатием кнопки .

Меню верхнего уровня содержит список названий групп параметров: «GrouP\_A», «GrouP\_b», «GrouP\_C», «GrouP\_d», «GrouP\_E», а также название операций:

- сброса счетчика импульсов c.rES;
- обнуления счетчика времени t.rES.

Последовательность процедуры программирования приведена на рис. 9.

В табл. 1 приведены программируемые параметры прибора СИ8.

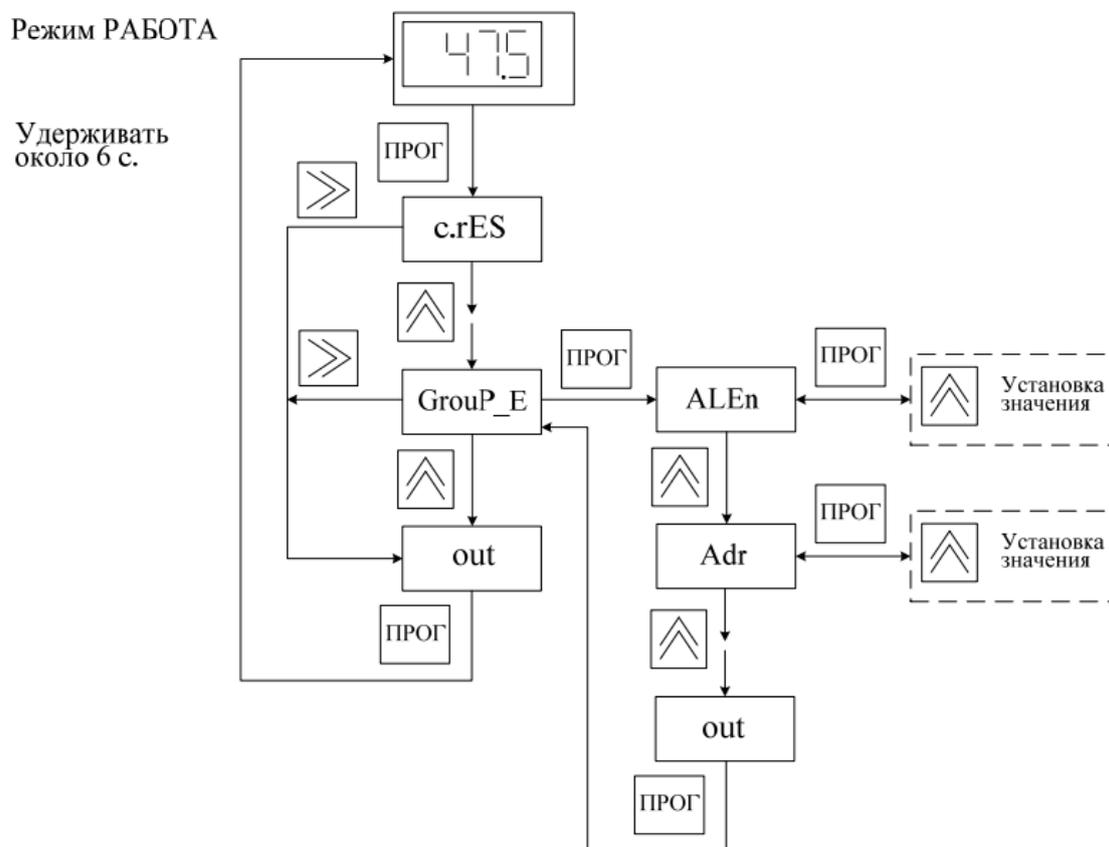


Рис. 9. Процедура программирования прибора СИ8

Таблица 1

Параметр		Допустимые значения	Заводская уставка
Обозн.	Название		
<b>Общие параметры(имеются в каждой группе)</b>			
<b>out</b>	Выход из группы параметров в главное меню в режиме программирования	Кнопка ПРОГ. [команда!]	-
<b>rESEt</b>	Сброс счетчика импульсов	Кнопка ПРОГ. [команда!]	
<b>CLEAR</b>	Сброс счетчика времени	Кнопка ПРОГ. [команда!]	
<b>Group_A. Уставки ЛУ</b>			
<b>U1</b>	Первая уставка ЛУ1	<b>-9999999...+9999999</b>	0
<b>U2</b>	Вторая уставка ЛУ1	<b>-9999999...+9999999</b>	-
<b>U3</b>	Первая уставка ЛУ2	<b>-9999999...+9999999</b>	0
<b>U4</b>	Вторая уставка ЛУ2	<b>-9999999...+9999999</b>	-
<b>t1</b>	Время включенного состояния первого выходного устройства	<b>1...99С</b>	-
<b>t2</b>	Время включенного состояния второго выходного устройства	<b>1...99С</b>	-
<b>Group_b. Параметры перезагрузки счётчика импульсов</b>			
<b>Strt</b>	Начальное значение счетчика импульсов	<b>-9999999...+9999999</b>	0
<b>FinL</b>	Нижняя граница счета, при котором происходит перезагрузка счетчика импульсов	<b>-9999999... Strt-1</b>	-10
<b>FinH</b>	Верхняя граница счета, при котором происходит перезагрузка счетчика импульсов	<b>Strt+1...+9999999</b>	10
<b>Group_C. Дополнительные параметры</b>			
<b>P</b>	Делитель	<b>1...9999</b>	1
<b>F</b>	Множитель	<b>0.0000001...9999999</b>	1
<b>ti</b>	Время измерения расхода	<b>1...99С</b>	0.75
<b>di</b>	Смещение показаний расходомера	<b>0.0000001...9999999</b>	0
<b>inp</b>	Назначение входов прибора	<b>1...6</b>	<b>4</b>
<b>tc</b>	Постоянная времени входного фильтра	<b>0,1...999,9 мс</b>	20,0
<b>ind</b>	Выводимый на индикатор параметр	1 - счетчик импульсов 2 - расходомер 3 - счетчик времени	1
<b>Ftt</b>	Формат времени, выводимого на индикатор	0 или 1	1
<b>init</b>	Перезагрузка счетчика импульсов значения параметра <b>Strt</b> при включении питания прибора	0- нет 1 - есть	0

### 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

3.1. При отключенном питании соберите схему рис. 7.

3.2. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

Установите переключатели источника питания A1 в положение «Постоянное напряжение», диапазон «20 В/0,5 А».

Подключите блоки A1, A2, A3, A5 к сети.

#### 3.3. Измерение частоты импульсов на выходе оптрона с интервалом счета 1 с.

3.3.1. Сконфигурируйте блок счетчика импульсов A2 (409) следующим образом:

В группе **Group\_b** проверить необходимые установки:

начальное состояние счетчика Strt=0,  
нижняя граница счета FinL =-9999999,  
верхняя граница счета FinH =9999999.

В группе **Group\_C** установить:

делитель P =1; множитель F =1; время счета ti =1;  
inp =2 (суммирующий счетчик импульсов);  
ind =2 (вывод на индикатор частоты импульсов);

Проверить установки смещение di =0, фильтр tc =0, Ftt =0, init =1.

3.3.2. Снять зависимости  $U_{BR}=f(U_{BX})$ ,  $N_{ИМП}=f(U_{BX})$  при изменении напряжения питания двигателя в интервале -20...+20 В.

Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

$U_{Я}$ , В	-20	-15	-10	-5	-1	0	1	5	10	15	20
$U_{BR}$ , В											
$U_{BRг}$ , В											
$\delta$ , %											
$N$ , имп/с											
$n$ , об/мин											

#### 3.4. Измерение числа оборотов двигателя в секунду с интервалом счета 1 с.

3.4.1. Сконфигурируйте блок счетчика импульсов A2 (409) следующим образом:

В группе **Group\_b** проверить необходимые установки:

начальное состояние счетчика Strt=0,  
нижняя граница счета FinL =-9999999,  
верхняя граница счета FinH =9999999.

В группе **Group\_C** установить:

делитель  $P = 12$  (на вход счетчика поступает лишь каждый 12 импульс);  
множитель  $F = 1$ ; время счета  $t_i = 1$ ;

$inp = 2$  (суммирующий счетчик импульсов);

$ind = 2$  (вывод на индикатор частоты импульсов);

Проверить установки смещение  $di = 0$ , фильтр  $tc = 0$ ,  $Ftt = 0$ ,  $init = 1$ .

3.4.2. Снять зависимости  $U_{BR} = f(U_{BX})$ ,  $n = f(U_{BX})$  при изменении напряжения питания двигателя в интервале  $-20 \dots +20$  В.

Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3

$U_{Я}, В$	-20	-15	-10	-5	-1	0	1	5	10	15	20
$U_{BR}, В$											
$U_{BRт}, В$											
$\delta, \%$											
$n, об/с$											
$n, об/мин$											

### 3.5. Измерение числа оборотов двигателя в минуту с интервалом счета 1 с.

После измерения частота сигнала с выхода оптрона умножается на 5. Таким образом, полученная величина превышает число оборотов вала двигателя за секунду в  $12 \times 5 = 60$  раз и равна числу оборотов вала за минуту. Значения на индикаторе меняются с шагом в 5 единиц.

3.5.1. Сконфигурируйте блок счетчика импульсов А2 (409) следующим образом:

В группе **GrouP\_b** проверить необходимые установки:

начальное состояние счетчика  $Strt = 0$ ,

нижняя граница счета  $FinL = -9999999$ ,

верхняя граница счета  $FinH = 9999999$ .

В группе **GrouP\_C** установить:

делитель  $P = 1$  (на вход счетчика поступает лишь каждый импульс);

множитель  $F = 5$  (измеренное значение частоты умножается на этот коэффициент перед выводом на индикатор);

время счета  $t_i = 1$ ;

$inp = 2$  (суммирующий счетчик импульсов);

$ind = 2$  (вывод на индикатор частоты импульсов);

Проверить установки смещение  $di = 0$ , фильтр  $tc = 0$ ,  $Ftt = 0$ ,  $init = 1$ .

3.5.2. Снять зависимости  $U_{BR} = f(U_{BX})$ ,  $n = f(U_{BX})$  при изменении напряжения питания двигателя в интервале  $-20 \dots +20$  В.

Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

$U_{Я}, В$	-20	-15	-10	-5	-1	0	1	5	10	15	20
$U_{BR}, В$											
$U_{BRт}, В$											
$\delta, \%$											
$n, об/мин$											

### 3.6. Измерение числа оборотов двигателя в минуту с интервалом счета 5 с.

Частота сигнала с выхода оптрона умножается на 5 за счет увеличения периода измерения частоты до 5 с. Таким образом, полученная величина превышает число оборотов вала двигателя за секунду в  $12 \times 5 = 60$  раз и равна числу оборотов вала за минуту. За счет увеличения периода улучшилась точность измерения числа оборотов вала за минуту, т. к. значения на индикаторе меняются с шагом в 1 единицу.

3.6.1. Сконфигурируйте блок счетчика импульсов А2 (409) следующим образом:

В группе **GrouP\_b** проверить необходимые установки:  
 начальное состояние счетчика  $Strt=0$ ,  
 нижняя граница счета  $FinL = -9999999$ ,  
 верхняя граница счета  $FinH = 9999999$ .

В группе **GrouP\_C** установить:  
 делитель  $P = 1$  (на вход счетчика поступает лишь каждый импульс);  
 множитель  $F = 1$  (измеренное значение частоты не умножается);  
 время счета  $ti = 5$  (период измерения частоты увеличен до 5 с);  
 $inp = 2$  (суммирующий счетчик импульсов);  
 $ind = 2$  (вывод на индикатор частоты импульсов);

Проверить установки смещение  $di = 0$ , фильтр  $tc = 0$ ,  $Ftt = 0$ ,  $init = 1$ .

3.6.2. Снять зависимости  $U_{BR} = f(U_{BX})$ ,  $n = f(U_{BX})$  при изменении напряжения питания двигателя в интервале  $-20 \dots +20 В$ .

Результаты измерений занести в табл. 5.

Таблица 5

$U_{Я}, В$	-20	-15	-10	-5	-1	0	1	5	10	15	20
$U_{BR}, В$											
$U_{BRт}, В$											
$\delta, \%$											
$n, об/мин$											

3.7. Определите крутизну выходной характеристики тахогенератора по формуле

$$C_U = \frac{U}{n},$$

где  $n$  – скорость вращения по показаниям счетчика импульсов в п. 3.6,  
 $U$  – напряжение на выходе тахогенератора.

Паспортное значение крутизны выходной характеристики тахогенератора  $C_{ТГ} = 1,5 \frac{мВ}{об / мин}$ . Сравните полученное экспериментальное значение с паспортным и объясните сходство/различия значений.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Описание лабораторной установки, схемы снятия характеристик.
- 4.3. Таблицы данных.
- 4.4. Расчёты и графики экспериментально снятых и рассчитанных характеристик  $U_{BR} = f(U_{ВХ})$ ,  $U_{BRT} = f(U_{ВХ})$ ,  $N = f(U_{ВХ})$ ,  $n = f(U_{ВХ})$ ,  $\delta = f(U_{ВХ})$ .
- 4.5. Выводы по работе.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. К какому типу датчиков относятся тахогенераторы?
- 5.2. Объясните принцип работы АТГ.
- 5.3. Объясните принцип работы ТГПТ.
- 5.4. Сравните АТГ и ТГПТ и перечислите их преимущества и недостатки.
- 5.5. В каком случае регулировочная характеристика тахогенератора постоянного тока будет линейной функцией и почему?
- 5.6. Перечислите основные типы оптических датчиков скорости и поясните их работу.
- 5.7. Перечислите причины возникновения погрешности измерения оптических датчиков скорости и способы её устранения.
- 5.8. Сравните преимущества и недостатки генераторных и оптических датчиков скорости и назовите возможные области их применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под ред. Е.О. Полищука. – Киев: Высшая школа, 1984. С. 284–288.
2. Расчет и конструирование деталей аппаратуры САУ / В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов. – М.: Машиностроение, 1982.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение принципов работы основных видов датчиков углового положения, а также экспериментальное исследование характеристик механического и оптического инкрементных датчиков углового положения.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 1.1. Общие сведения о датчиках углового положения

Датчики углового положения выполняют функцию измерения угла поворота вала исполнительного механизма, то есть преобразуют механический угол поворота в какую-либо электрическую величину.

В современных системах управления в качестве датчика обратной связи по угловому положению часто используются датчики с выходным сигналом в виде цифрового кода, так называемые **энкодеры** (encoder (англ.) – кодировщик, шифратор).

Простейшим энкодером является **инкрементный (инкрементальный, импульсный)**, представляющий собой диск с  $N$  метками на оборот, нанесёнными по окружности через равные промежутки, чувствительный элемент ЧЭ и счётчик СЧ (рис. 1). При повороте диска с  $N$  метками на оборот на угол  $\alpha$  чувствительный элемент ЧЭ вырабатывает последовательность из  $q$  импульсов, которые подсчитывает счётчик СЧ:

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot q}{N}. \quad (1)$$

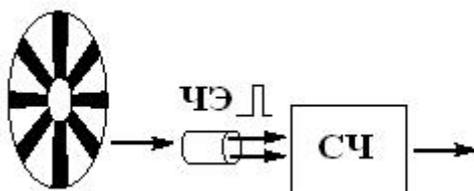


Рис. 1. Схема инкрементного энкодера

Разрешающая способность инкрементного энкодера  $\Delta_l$  равна одному шагу и определяется по формуле  $\Delta_l = \frac{360^\circ}{N}$ .

По принципу работы энкодеры бывают оптическими, магнитными и механическими. **Оптические энкодеры** имеют жёстко закреплённый на валу прозрачный диск с прецизионной оптической шкалой. При вращении объекта оптопара (ЧЭ) считывает информацию, а электроника

преобразовывает её в последовательность дискретных электрических импульсов. **Магнитные энкодеры** с высокой точностью регистрируют прохождение магнитных полюсов вращающегося магнитного элемента непосредственно вблизи ЧЭ (например, датчика Холла), преобразуя эти данные в соответствующий электрический сигнал. В **механических энкодерах** диск из диэлектрика с нанесёнными выпуклыми, проводящими участками вращается и замыкает механические контакты, которые вырабатывают последовательность электрических импульсов.

Для определения направления вращения **инкрементный** энкодер должен иметь два выходных канала *A* и *B*, сдвинутых на четверть периода расположения меток. В этом случае при вращении в одну сторону один из каналов будет ведущим, а при вращении в другую сторону – ведомым (рис. 2). Кроме того, на диск наносят одну метку на оборот – так называемую **нулевую метку Z** (или метку *N*), которая дает точку отсчёта и позволяет рассчитать абсолютное положение вала относительно этой нулевой метки.

У **абсолютных** энкодеров на диске есть несколько concentрических дорожек с различным размером меток. Обычно первая дорожка, расположенная ближе к центру диска, с самыми большими метками в пол-оборота диска, вторая – в четверть оборота, и так далее, а самая последняя с самыми маленькими метками расположена на краю диска. Соответственно, информацию о положении дают столько чувствительных элементов, сколько дорожек с метками имеется на диске. Например, для абсолютного энкодера с *W* дорожками каждому углу поворота соответствует уникальный код положения, состоящий из *W* разрядов (содержащих последовательность из *W* нулей или единиц). Основной характеристикой абсолютных энкодеров является число шагов, т. е. уникальных кодов на оборот *G*, которое определяется по формуле  $G = 2^W$ .

Разрешающая способность абсолютного энкодера  $\Delta_A$  равна одному шагу и определяется по формуле:  $\Delta_A = \frac{360^\circ}{G} = \frac{360^\circ}{2^W}$ .

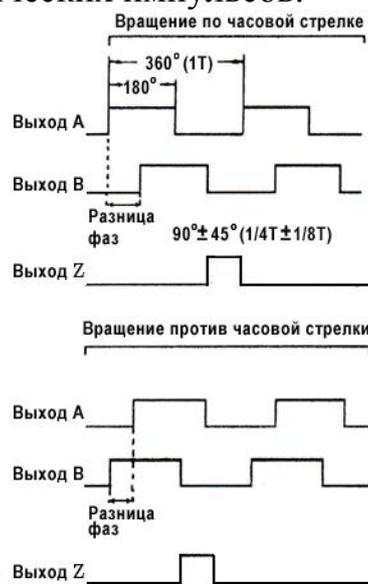


Рис. 2. Определение направления вращения по сигналам каналов *A*, *B* и *Z* инкрементного энкодера

## 1.2. Конструкция и принцип действия инкрементного оптического датчика углового положения

Оптические энкодеры выполняют самые различные производственные задачи: контроль углового положения, измерение скорости вала, его положения или смещения, контроль позиционирования. Благодаря высокоточной фотоэлектрической технологии измерений, энкодеры при измерении линейных перемещений объектов имеют разрешение, измеряемое в микрометрах, а точность измерения угла составляет несколько тысячных долей градуса.

Принцип работы инкрементного оптического энкодера проиллюстрирован на рис. 3, а.

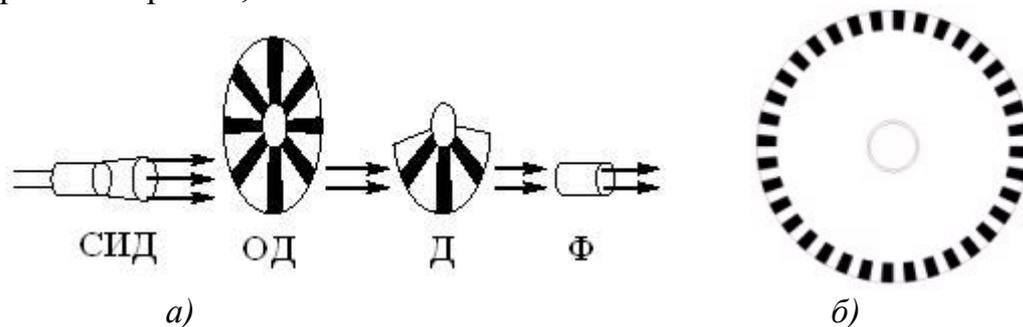


Рис. 3. Принцип работы (а) и диск (б) инкрементного оптического энкодера

В конструкции оптических энкодеров используется светоизлучающий диод СИД, свет которого проходит через вращающийся оптический диск ОД со специально нанесенными метками, неподвижную диафрагму Д и фиксируется фотоприемником Ф. Диск инкрементного энкодера содержит равномерно нанесенные одинаковые метки (рис. 3, б). Диафрагма нужна для получения эффекта затвора, то есть, чтобы свет проходил от источника СИД к фотоприемнику Ф только при совпадении прорезей на диске ОД и диафрагме Д. Прохождение меток диска через пару излучатель-приемник формирует последовательность импульсов, которые подаются в схему обработки сигналов. Фотоприемник генерирует сигнал частотой, равной частоте следования кодовых элементов, в цифровой форме или аналоговый импульсный сигнал, который также может быть усилен и оцифрован.

При добавлении второй пары излучатель-приемник с угловым смещением относительно первой, соответствующим четверти периода сигнала, может быть получена вторая последовательность импульсов — канал В с фазовым смещением относительно канала А на  $90^\circ$ , которая используется для определения направления вращения датчика.

### 1.3. Принцип действия абсолютного оптического углового датчика

Диск абсолютного энкодера содержит несколько дорожек с неодинаковыми размерами прорезей (рис. 4), что обеспечивает уникальную комбинацию меток для каждого углового положения, в отличие от диска инкрементного энкодера, содержащего лишь одну дорожку. На каждой дорожке расположена оптопара, которая считывает информацию о положении, формируя уникальный код. Этот код не зависит от предыдущих состояний, в отличие от инкрементального датчика, где для определения углового положения необходим отсчёт от нулевой метки.

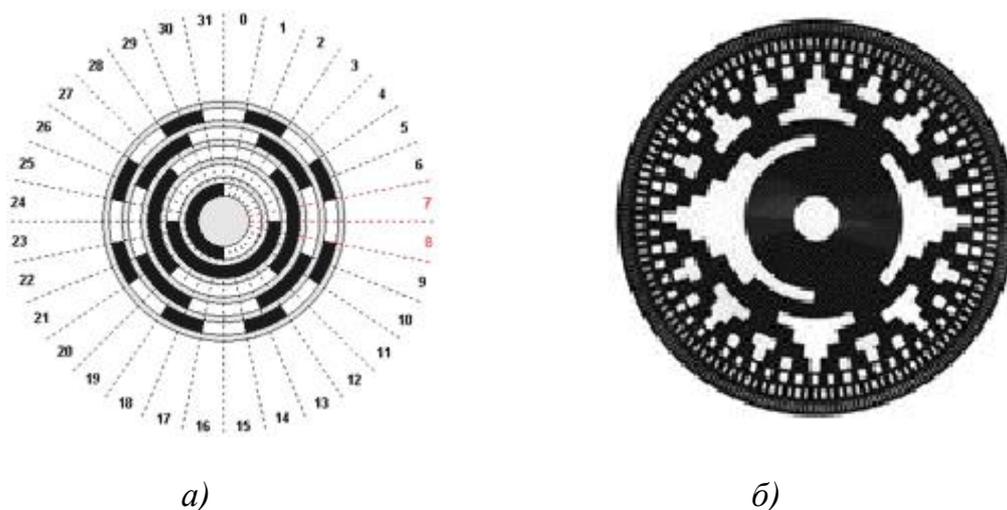


Рис. 4. Диски абсолютных оптических датчиков

Например, на рис. 5, а показан выходной двоичный код 5-разрядного абсолютного энкодера. Текущее положение даёт двоичный код 10011, соответствующий десятичному числу 19 ( $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 19_{10}$ ). При перемещении из текущего положения на один шаг вправо следующим десятичным кодом будет 18 (соответствует двоичному коду 10010), а при перемещении на один шаг влево – 20 (двоичный код 10100).

Двоичный код является многошаговым кодом. Это означает, что при переходе с одного положения (значения) в другое могут изменяться значения нескольких разрядов одновременно. Соответственно в вышеприведённом примере при переходе от 19 (код 10011) к 20 (код 10100) меняют свое состояние на противоположное все 3 младших разряда одновременно. Считывание такого кода с кодового диска привело бы к тому, что из-за неизбежных отклонений при производстве кодового диска изменение информации от каждой из дорожек в отдельности никогда не произойдет одновременно, а, значит, при переходе от одного

числа к другому кратковременно будет выдана неверная информация. Так при вышеупомянутом переходе от числа 19 к числу 20 очень вероятно кратковременная выдача числа 23 (код 10111) когда, например, старший из изменяющихся разрядов во время перехода поменял свое значение немного раньше, чем остальные. Чтобы избежать этого, применяется так называемый одношаговый код, например, код Грея.

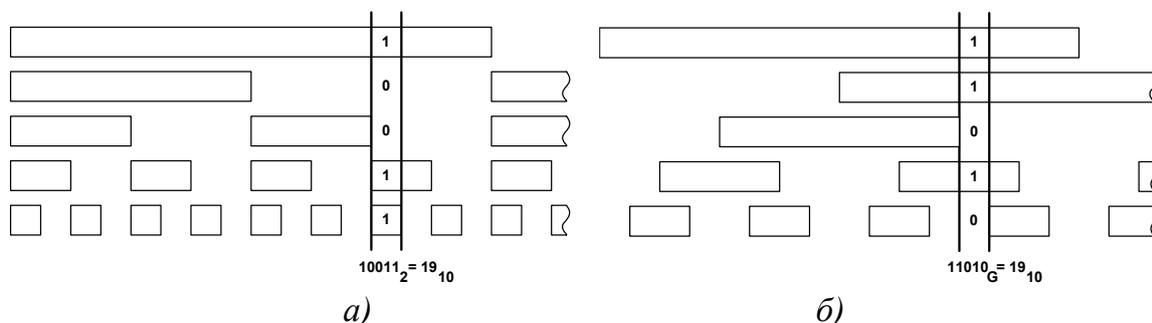


Рис. 5. Выходной код абсолютного датчика (а – двоичный код, б – код Грея)

На рис. 5, б показаны сигналы с выходов такого же 5-разрядного датчика, но его выходным сигналом будет **код Грея**. В коде Грея при переходе от одного числа к другому всегда меняется лишь какой-то один из разрядов информации. Погрешность при считывании информации с кодового диска при переходе от одного числа к другому приведет лишь к тому, что переход от одного положения к другому будет несколько смещен по времени, однако выдача совершенно неверного значения углового положения при переходе полностью исключается.

Информация, выраженная в коде Грея перед дальнейшей обработкой должна быть преобразована в стандартный двоичный код. Осуществляется это при помощи преобразователя кода (декодера Грей-двоичный), который легко реализуется, как показано на рис. 6, использованием простой схемы из логических элементов «НЕ» (NOT) и «исключающее ИЛИ» (XOR) как программным, так и аппаратным способом.

Соответствие десятичных чисел в диапазоне от 0 до 32 двоичному коду и коду Грея представлено в табл. 1.

При исчезновении напряжения питания инкрементный датчик теряет информацию о положении, поэтому он вынужден возвращаться в нулевое положение и начинать отсчёт заново, а абсолютный датчик сразу считывает информацию о своём положении. Таким образом, абсолютные энкодеры имеют одно важное преимущество: они сохраняют текущее значение углового положения вне зависимости от наличия напряжения питания.

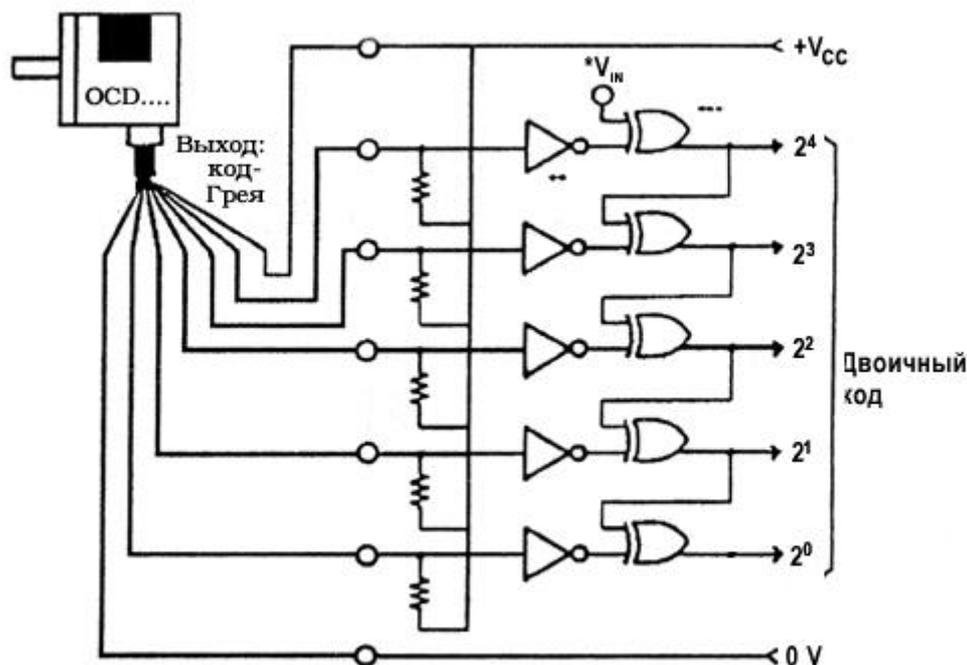


Рис. 6. Схема преобразования кода Грея в двоичный код  
(Примечание: клемма  $V_{in}$  подключается к клемме 0 V)

Таблица 1

Таблица соответствия десятичных и двоичных чисел коду Грея

Десятичное число	Двоичный код	Код Грея	Десятичное число	Двоичный код	Код Грея
0	00000	00000	16	10000	11000
1	00001	00001	17	10001	11001
2	00010	00011	18	10010	11011
3	00011	00010	19	10011	11010
4	00100	00110	20	10100	11110
5	00101	00111	21	10101	11111
6	00110	00101	22	10110	11101
7	00111	00100	23	10111	11100
8	01000	01100	24	11000	10100
9	01001	01101	25	11001	10101
10	01010	01111	26	11010	10111
11	01011	01110	27	11011	10110
12	01100	01010	28	11100	10010
13	01101	01011	29	11101	10011
14	01110	01001	30	11110	10001
15	01111	01000	31	11111	10000

## Однооборотный энкодер

Однооборотными (Single-Turn) датчиками (рис. 7) называются абсолютные датчики, которые выдают абсолютное значения в пределах одного оборота, т. е. в диапазоне  $360^\circ$ . После одного оборота код является полностью пройденным и начинается опять с его начального значения. Эти датчики служат, преимущественно, для измерения угла поворота и применяются, например, в антенных системах, эксцентричных коленчатых пресах и т. д.



Рис. 7. Устройство однооборотного энкодера

## Многооборотный энкодер

При линейных перемещениях и при протяженной кинематической цепи может появиться необходимость применение измерительной системы с количеством оборотов больше  $n > 1$ . Например, при линейных приводах или при задачах измерения с помощью зубчатой измерительной штанги, применение однооборотных датчиков является неприемлемым. В этом случае приходят на помощь датчики, где дополнительно к измерению угла поворота в пределах одного оборота происходит регистрация количества оборотов с помощью дополнительно встроенного передаточного механизма, т. е. своего рода редуктора из нескольких кодовых оптических дисков, образуя, таким образом, многооборотный энкодер (Multi-Turn). Принцип действия и устройство многооборотного энкодера пояснены на рис. 8.

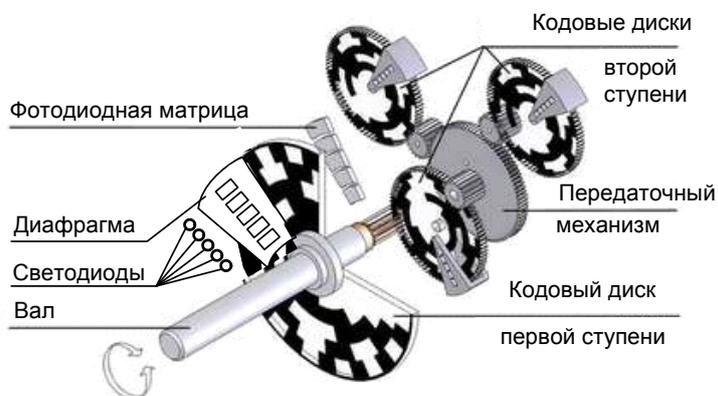


Рис. 8. Устройство многооборотного энкодера

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**2.1.** При выполнении работы используются следующие блоки и оборудование:

- блок испытания механического датчика углового положения А4 (396);
- блоки исследования оптического датчика углового положения А3 (375.2);
- соединительные провода;
- блок счётчика импульсов СИ8 А2 (409);
- цифровой осциллограф.

### 2.2. Блок испытания механического энкодера А4 (396)

В блоке А4 (рис. 9) установлен механический инкрементный энкодер ЕСW1J-B24-BC0024 [5], имеющий 24 фиксированных положения на оборот, т. е. измерение угла производится с разрешением  $360/24=15$  градусов.

Если вал энкодера находится в одном из фиксированных положений, то оба выходных контакта разомкнуты. При повороте вала энкодера на один шаг контакты *A* и *B* последовательно замыкаются: при повороте по часовой стрелке контакт *A* замыкается раньше *B*, при повороте против часовой стрелки *B* замыкается раньше *A*.

Импульсы напряжения с замкнутых контактов подсчитываются счетчиком, содержимое которого соответствует полному углу поворота вала энкодера. Поскольку вал энкодера может вращаться в обоих направлениях, для определения угла необходимо использовать реверсивный счетчик, увеличивающий или уменьшающий свое содержимое в зависимости от направления вращения вала.

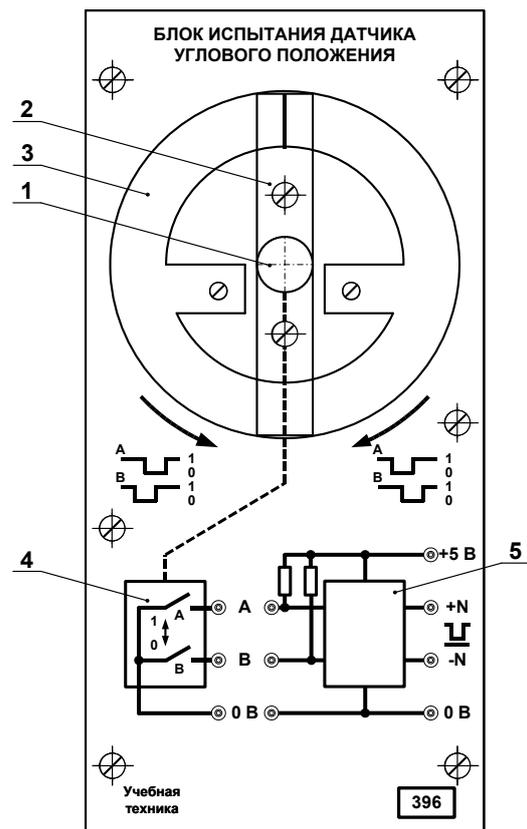


Рис. 9. Блок испытания механического датчика углового положения

В блоке испытания датчика углового положения А4 (396) на оси с ручкой поворота 1 испытываемого энкодера закреплен указатель 2 для измерения угла поворота вала энкодера по шкале угломера 3. На гнезда лицевой панели блока выведены контакты энкодера А, В и их общая точка 4 и выходы логической схемы устранения дребезга контактов и разделения импульсов между двумя выходами в зависимости от направления вращения вала 5.

### 2.3. Блок испытания оптического энкодера А3 (375.2)

В блоке А3 (рис. 10) установлен оптический энкодер (Kübler 8.5820) с разрешением 1000 меток на оборот, т. е. измерение угла производится с шагом  $360/1000=0,36$  градуса. При повороте вала энкодера свет от светоизлучающего диода проходит через диск со специально нанесенными метками и фиксируется фотоприемником. Прохождение меток диска через пару излучатель-приемник формирует поток импульсов, которые попадают в схему обработки сигналов.

В блоке испытания датчика углового положения А3 (375.2) на оси испытуемого энкодера закреплен указатель, для измерения угла поворота вала энкодера по шкале угломера. На гнезда лицевой панели блока выведены контакты энкодера А, В, Z, а также инверсные выходы.

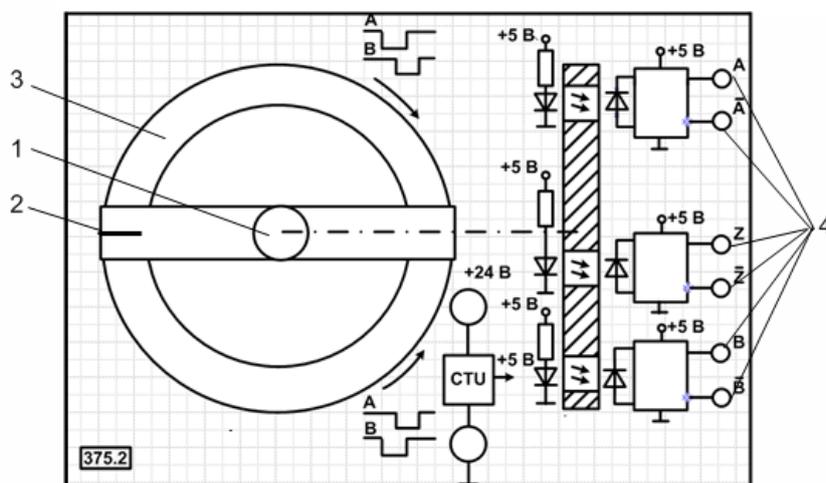


Рис. 10. Блок исследования оптического датчика углового положения:

- 1 – ручка поворота вала энкодера; 2 – указатель;  
3 – шкала угломера; 4 – выходы энкодера

### 2.3. Описание счетчика импульсов СИ8

Универсальный программируемый восьмиразрядный счетчик импульсов СИ8 предназначен для подсчета:

- количества поступающих на его входы импульсов и перевода результата в физическую величину (путем умножения на заданный множитель);
- частоты и длительности поступающих на его входы импульсов;
- среднего и суммарного расхода (скорости) совместно с импульсным датчиком.

Функциональная схема прибора приведена на рис. 11. Прибор имеет три входа для подключения внешних управляющих устройств, которые через селектор входов подаются на входы блока обработки данных.

Блок обработки данных содержит реверсивный счетчик импульсов с предделителем на входе и умножителем на выходе, счетчик времени и вычислитель среднего расхода, а также два логических устройства, которые по заданному пользователем алгоритму формируют сигналы управления выходными устройствами.

Прибор имеет три входа для подключения внешних управляющих сигналов. К входам могут быть подключены:

- контакты кнопок, выключателей, герконов, реле и т. п.;
- активные датчики, имеющие на выходе транзистор n-p-n-типа с открытым коллекторным выходом;
- другие типы датчиков с выходным напряжением высокого уровня +2,4...+30 В и низкого уровня 0...0,8 В. Выходной ток при напряжении низкого уровня не превышает 15 мА.

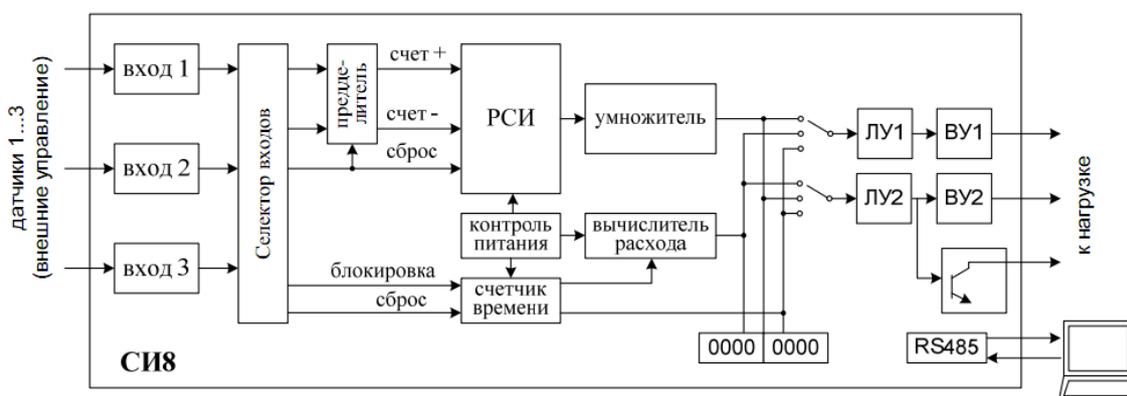


Рис. 11. Функциональная схема счетчика СИ8

## Программирование прибора СИ8

Режим ПРОГРАММИРОВАНИЕ предназначен для записи в энергонезависимую память прибора, требуемых при эксплуатации рабочих параметров и их изменения.

В каждой группе параметров имеется параметр out, служащий для выхода из группы в меню верхнего уровня. Выбор нужного параметра внутри группы осуществляется кнопкой , переход к параметру out осуществляется кнопкой .

Вывод на индикаторы текущего значения выбранного параметра производится нажатием кнопки .

Меню верхнего уровня содержит список названий групп параметров: «GrouP\_A», «GrouP\_b», «GrouP\_C», «GrouP\_d», «GrouP\_E», а также название операций:

- сброса счетчика импульсов c.rES;
- обнуления счетчика времени t.rES.

Последовательность процедуры программирования приведена на рис. 12.

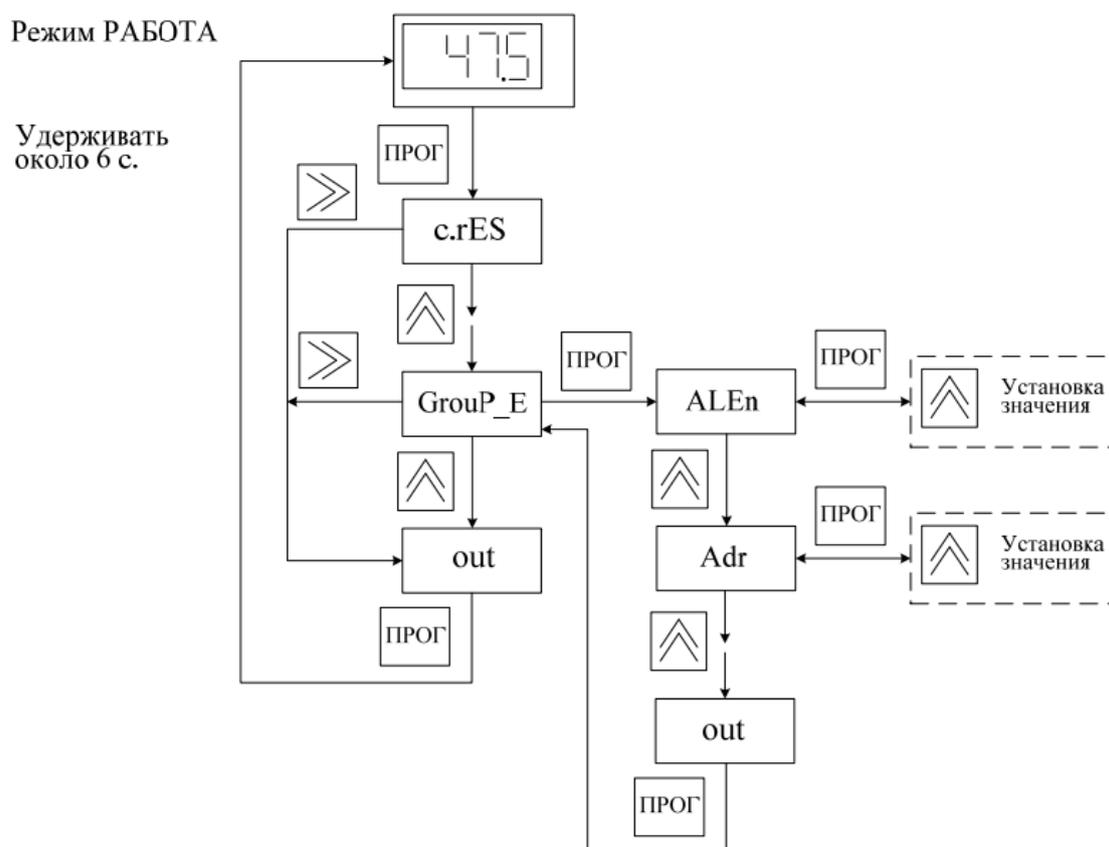


Рис. 12. Процедура программирования прибора СИ8

### 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

#### 3.1. Исследование характеристик нереверсивного механического-инкрементного энкодера

- 3.1.1. Проверьте схему электропитания блоков A2 и G1. Убедитесь, что выключатель «СЕТЬ» блока A2 отключен.
- 3.1.2. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений, показанной на рис. 13. В блоке A4 контакт механического энкодера A соединить со входом 1 (суммирующий вход) блока A2. Общую точку контактов энкодера подключить к гнезду «0 В». Гнезда питания блока A4 («+5 В» и «0 В») соединить с одноименными гнездами источника напряжения +5 В блока счетчика импульсов A2. Вход 3 счетчика импульсов A2 соединить с кнопкой «Сброс» на лицевой панели этого блока. Кнопка используется для установки счетчика в состояние 0.

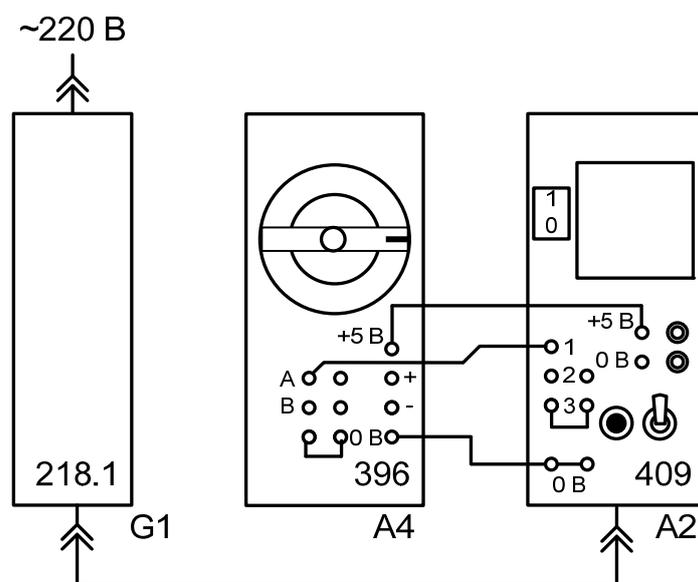


Рис. 13. Схема электрическая соединений при испытании нереверсивного механического энкодера

- 3.1.3. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- 3.1.4. Включите блок счетчика импульсов A2 (409) и сконфигурируйте его для измерения угла поворота нереверсивного механического инкрементного датчика углового положения следующим образом:

В группе **Group\_b** проверить необходимые установки:  
начальное состояние счетчика Strt=0,

нижняя граница счета  $FinL = -9999999$ ,  
 верхняя граница счета  $FinH = 9999999$ .

В группе **GrouP\_C** установить:

делитель  $P = 1$ ; множитель  $F = 1$ ; время счета  $t_i = 1$ ;

$inp = 6$  (нереверсивный счетчик импульсов);

$ind = 1$  (вывод на индикатор количества импульсов).

Проверить установки: смещение  $d_i = 0$ , фильтр  $t_c = 0$ ,  $F_{tt} = 0$ ,  $init = 1$ .

3.1.5. Указатель блока A4 установите в положение «0» и кнопкой «Сброс» блока A2 обнулите показания счетчика.

3.1.6. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 360 градусов *против часовой стрелки*, а затем от 360 до -360 градусов *по часовой стрелке*, заполните значения количества импульсов  $q_{m-n}$  в табл. 2.

Таблица 2

$\alpha, ^\circ$	0	50	150	250	360	300	200	100	0	-100	-200	-360
$q_{m-n}$												
$\alpha_{m-n}, ^\circ$												
$\delta\alpha_1, \%$												

3.1.7. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

### 3.2. Исследование характеристик нереверсивного оптического инкрементного энкодера

3.2.1. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой, показанной на рис. 14.

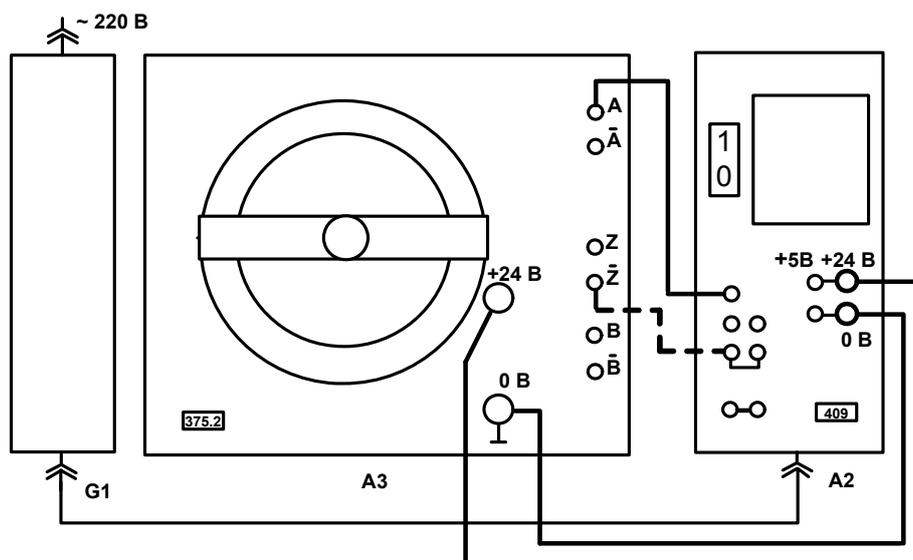


Рис. 14. Схема электрических соединений при испытании нереверсивного оптического энкодера

В блоке А3 вывод энкодера А соединить со входом счетчика 1 блока А2. Гнезда питания блока А3 («+24 В» и «0 В») соединить с одноименными гнездами источника напряжения «+24 В» и «0 В» блока счетчика импульсов А2. **Внимание!** Вывод энкодера  $\bar{Z}$  не соединять с входом счетчика 3 блока А2 (соединение на рис. 14 показано штриховой линией).

3.2.2. Включите блок счетчика импульсов А2 (409) и сконфигурируйте его для измерения угла поворота нереверсивного оптического А3 (375.2) инкрементного датчика углового положения как указано в п. 3.1.4.

3.2.3. Указатель блока А3 установите в положение «0» и кнопкой «Сброс» блока А2 обнулите показания счетчика.

3.2.4. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 360 градусов *против часовой стрелки*, а затем от 360 до -360 градусов *по часовой стрелке*, заполните значения количества импульсов  $q_{0-n}$  в табл. 3.

Таблица 3

$\alpha, ^\circ$	0	50	150	250	360	300	200	100	0	-100	-200	-360
$q_{0-n}$												
$\alpha_{0-n}, ^\circ$												
$\delta\alpha_2, \%$												

3.2.5. По окончании опыта выключите блока счетчика импульсов.

### **3.3. Исследование характеристик нереверсивного оптического инкрементного энкодера с функцией сброса**

3.3.1. Повторите действия пп. 3.2.1...3.2.5, дополнительно соединив вывод  $\bar{Z}$  энкодера со входом счетчика 3 блока А2 (соединение на рис. 14 показано штриховой линией). **Медленно** вращая вал энкодера (не быстрее 1 оборота за 20 с.), запишите значения  $q_{onz}$  в табл. 4.

Таблица 4

$\alpha, ^\circ$	0	50	150	250	360	300	200	100	0	-100	-200	-360
$q_{onz}$												
$\alpha_{onz}, ^\circ$												
$\delta\alpha_3, \%$												

3.3.2. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

### **3.4. Исследование характеристик реверсивного механического инкрементного энкодера**

3.4.1. Проверьте схему электропитания блоков А2 и G1. Убедитесь, что выключатель «СЕТЬ» блока А2 отключен.

3.4.2. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, показанной на рис. 15. В блоке А4 контакты энкодера А и В соединить с одноименными входами схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения. Общую точку контактов энкодера подключить к гнезду «0 В». Выходы схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения блока А4 подключить к входам счетчика 1 (суммирующий вход) и 2 (вычитающий вход) блока А2. Гнезда питания блока А4 («+5 В» и «0 В») соединить с одноименными гнездами источника напряжения +5 В блока счетчика импульсов А2. Вход 3 счетчика импульсов А2 соединить с кнопкой «Сброс» на лицевой панели этого блока. Кнопка используется для установки счетчика в состояние «0».

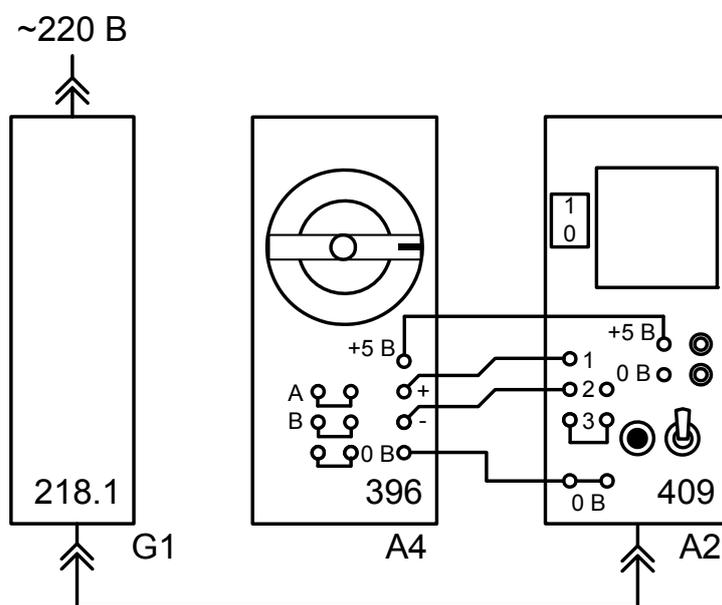


Рис. 15. Схема электрическая соединений при испытании реверсивного механического энкодера

3.4.3. Включите блок счетчика импульсов А2 (409) и сконфигурируйте его для измерения угла поворота реверсивного механического инкрементного датчика углового положения следующим образом:

В группе **Group\_b** проверить необходимые установки:

- начальное состояние счетчика  $Strt=0$ ,
- нижняя граница счета  $FinL = -9999999$ ,
- верхняя граница счета  $FinH = 9999999$ .

В группе **Group\_C** установить:

- делитель  $P = 1$ ; множитель  $F = 1$ ; время счета  $t_i = 1$ ;
- inp = 3** (реверсивный счетчик импульсов с отдельными входами);
- ind = 1** (вывод на индикатор количества импульсов).

Проверить установки: смещение  $d_i = 0$ , фильтр  $t_c = 0$ ,  $F_{tt} = 0$ ,  $init = 1$ .

3.4.4. Указатель блока А3 установите в положение «0» и кнопкой «Сброс» блока А2 обнулите показания счетчика.

3.4.5. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 30 градусов с шагом в 5 градусов, заполните значения  $q_{m-R}$  в табл. 5.

Таблица 5

$\alpha, ^\circ$	0	5	10	15	20	25	30
$q_{m-R}$							
$\alpha_{m-R}, ^\circ$							
$\delta\alpha_4, \%$							
$q_{o-R}$							
$\alpha_{o-R}, ^\circ$							
$\delta\alpha_5, \%$							

3.4.6. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 360 градусов *против часовой стрелки*, а затем от 360 до -360 градусов *по часовой стрелке*, заполните значения количества импульсов  $q_{m-R}$  в табл. 6.

Таблица 6

$\alpha, ^\circ$	0	50	150	250	360	300	200	100	0	-100	-200	-360
$q_{m-R}$												
$\alpha_{m-R}, ^\circ$												
$\delta\alpha_6, \%$												
$q_{o-R}$												
$\alpha_{o-R}, ^\circ$												
$\delta\alpha_7, \%$												
$q_{oRz}$												
$\alpha_{oRz}, ^\circ$												
$\delta\alpha_8, \%$												

3.4.7. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

### 3.5. Исследование характеристик реверсивного оптического инкрементного энкодера

3.5.1. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой, показанной на рис. 16. В блоке А3 (375.2) выводы энкодера А и В соединить с одноименными входами схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения, расположенными на блоке А4 (396). Выходы схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения блока А4 подключить ко входам счетчика 1 (суммирующий вход) и 2 (вычитающий вход) блока А2. Гнезда питания блока А3 («+24 В» и «0 В») соединить с одноименными гнездами источника напряжения +24 В блока счетчика импульсов А2. Гнезда питания блока

A4 («+5 В» и «0 В») соединить с одноименными гнездами источника напряжения +5 В блока счетчика импульсов А2. **Внимание!** Вывод энкодера  $\bar{Z}$  не соединять с входом счетчика 3 блока А2.

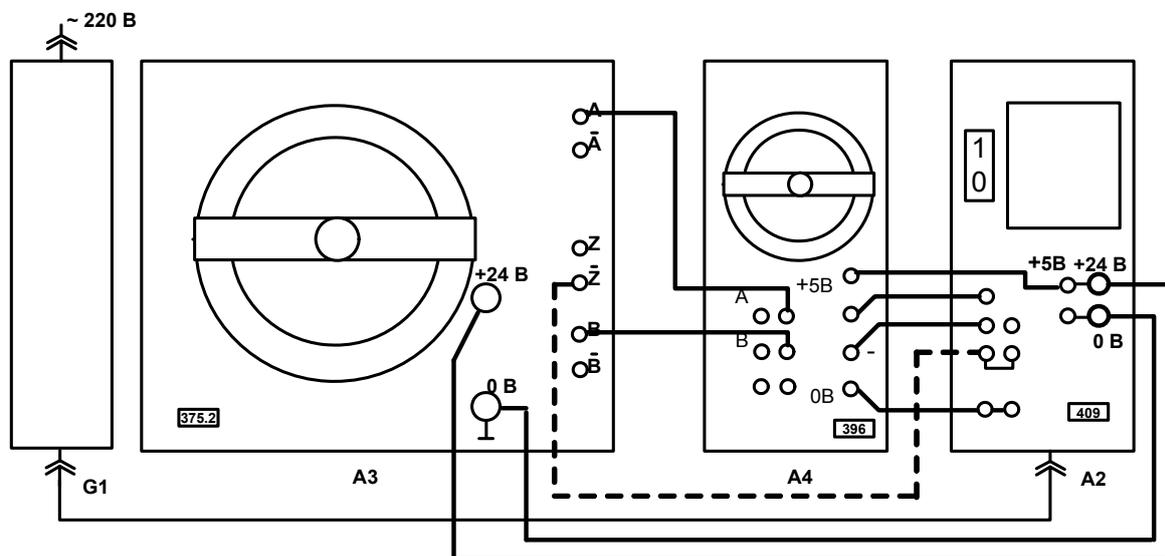


Рис. 16. Схема электрическая соединений при испытании реверсивного оптического энкодера

3.5.2. Включите блок счетчика импульсов А2 (409) и сконфигурируйте его для измерения угла поворота реверсивного оптического А3 (375.2) инкрементного датчика углового положения. Счетчик импульсов А2 необходимо сконфигурировать как реверсивный счетчик с отдельными входами увеличения и уменьшения содержимого счетчика как в п. 3.4.3.

3.5.3. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 30 градусов с шагом в 5 градусов, заполните значения  $q_{0-R}$  в табл. 5.

3.5.4. Вращая вал энкодера в диапазоне от 0 до 360 градусов *против часовой стрелки*, а затем от 360 до -360 градусов *по часовой стрелке*, заполните значения количества импульсов  $q_{0-R}$  в табл. 6.

3.5.5. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

### 3.6. Исследование характеристик реверсивного оптического инкрементного энкодера с функцией сброса

3.6.1. Повторите действия пп. 3.5.1...3.5.5, дополнительно соединив вывод  $\bar{Z}$  энкодера с входом счетчика 3 блока А2 (соединение на рис. 16 показано штриховой линией).

3.6.2. Вращая вал энкодера медленно (не быстрее 1 оборота за 20 с.) в диапазоне от 0 до 360 градусов *против часовой стрелки*, а затем от 360 до -360 градусов *по часовой стрелке*, запишите значения  $q_{0Rz}$  в табл. 6.

3.6.3. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

### 3.7. Регистрация осциллограмм выходных сигналов реверсивных оптического и механического инкрементного энкодера

3.7.1. Включите блок счетчика импульсов при собранной для опыта 3.6 схеме.

3.7.2. Вращая вал энкодера сначала *против часовой стрелки*, а затем – *по часовой стрелке с постоянной скоростью не очень быстро* (не быстрее 1 оборота за 20 с.), снять с помощью двухлучевого осциллографа следующие пары осциллограмм:

- каналы A и B;
- каналы A и Z;
- каналы A и  $\bar{A}$ ;
- выходы +N и –N схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения блока А4.

3.7.3. Для регистрации осциллограмм на выходах механического энкодера повторите действия пп. 3.4.1...3.4.3. Затем, вращая вал энкодера сначала *против часовой стрелки*, а после – *по часовой стрелке с постоянной скоростью не очень быстро* (не быстрее 1 оборота за 20 с.), снять с помощью двухлучевого осциллографа следующие пары осциллограмм:

- каналы A и B;
- выходы +N и –N схемы устранения дребезга контактов и определения направления вращения блока А4.

3.7.4. По окончании опыта выключите блок счетчика импульсов.

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

4.1. Цель работы.

4.2. Описание лабораторной установки, электрические схемы соединений.

4.3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

4.4. Для расчёта экспериментальных значений угла  $\alpha_{mXX}$  или  $\alpha_{oXX}$  инкрементного механического или оптического энкодера использовать формулу (1), где количество меток на оборот  $N_m = 24$  или  $N_o = 1000$ .

4.5. Погрешность  $\delta\alpha_x$  измерения углового положения определить по формуле: 
$$\delta\alpha_x = \frac{\alpha_{xxx} - \alpha}{\alpha} \cdot 100\%.$$

4.6. Построить характеристики  $\alpha_{xxx} = f(\alpha)$  механического и оптического инкрементных энкодеров на одном графике в диапазоне от -360 до 360 градусов по данным табл. 1...4, 6.

4.7. Построить характеристики  $\alpha_{xxx} = f(\alpha)$  механического и оптического инкрементных энкодеров на одном графике в диапазоне от 0 до 30 градусов по данным табл. 5.

4.8. Осциллограммы выходных сигналов энкодеров.

4.9. Ответы на контрольные вопросы.

4.10. Выводы.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие типы датчиков углового положения Вы знаете?

2. Для чего нужны два импульсных сигнала  $A$  и  $B$  с выходов инкрементного датчика?

3. Зачем используется выходной сигнал  $Z$  инкрементного датчика углового положения?

4. Что такое выходной код абсолютного датчика углового положения?

5. Что такое многошаговый код? Приведите пример такого кода.

6. Какие преимущества имеет одношаговый код по сравнению с многошаговым? Приведите пример одношагового кода.

7. Переведите значение 1100101 кода Грея в двоичный код, а затем – в десятичное число.

8. Какой код получается на выходе датчика, использующего диск, изображённый на рис. 4, б? Определить точность измерения углового положения этого датчика.

9. Как однозначно определяют положение при работе абсолютного датчика в диапазоне нескольких оборотов?

10. Какие параметры характеризуют датчики углового положения.

11. Перечислите причины возникновения погрешности измерения углового положения и способы её устранения.

12. Сравните преимущества и недостатки инкрементных и абсолютных датчиков углового положения и назовите возможные области их применения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин/ под ред. Е.О. Полищука. – Киев: Высшая школа, 1984. – С. 284–288.
2. Официальный сайт фирмы Fritz Kubler GmbH: [www.kuebler.com](http://www.kuebler.com).
3. Красногорцев И.Л. Датчики технологических параметров. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ДТП.002 РБЭ (940.1) / под ред. П.Н. Сенигова. – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2008. – 74 с.
4. Расчет и конструирование деталей аппаратуры САУ /В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов. –М.: Машиностроение, 1982.
5. ECW – Digital Contacting Encoder. Technical data. BOURNS. *Файл ECW1J.pdf*.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение конструкции, принципа действия, схем включения, путей уменьшения погрешностей вращающихся трансформаторов.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. *Вращающимися трансформаторами* (поворотными трансформаторами, резольверами) называют индукционные электрические микромашины переменного тока, у которых выходной сигнал пропорционален углу поворота ротора или некоторым функциям от него.

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) применяют в системах автоматического управления, в приборном оборудовании в качестве датчиков положения, для измерения углов рассогласования между двумя осями, в качестве построителей для решения геометрических и тригонометрических задач.

Основными типами ВТ являются [1]: двухполюсные ВТ, имеющие по две взаимно перпендикулярные обмотки на роторе и статоре; многополюсные ВТ; индукционные редуктосины и индуктосины; функциональные ВТ и индукционные потенциометры.

Конструктивно двухполюсные ВТ выполняют так же, как и асинхронный двигатель с фазным ротором. В равномерно распределенные пазы ротора и статора укладывают по две взаимно перпендикулярные обмотки. Электрическая схема такого ВТ показана на рис. 1; на статоре располагают обмотку возбуждения В1В2, квадратурную обмотку В3В4, на роторе синусную С1С2 и косинусную К1К2 обмотки.

Напряжение к расположенным на роторе обмоткам подводится (снимается) с помощью контактных колец и щеток (ВТ серий ВТМ, ВТ, СКТ и др.) или с помощью контактных пружин (некоторые ВТ серии СКВТ), во втором случае угол поворота ротора ограничен.

Широко применяются бесконтактные ВТ (серий БСКТ, БВТ и др.); питание к обмотке ротора в них подводится с помощью кольцевого трансформатора (рис. 2).

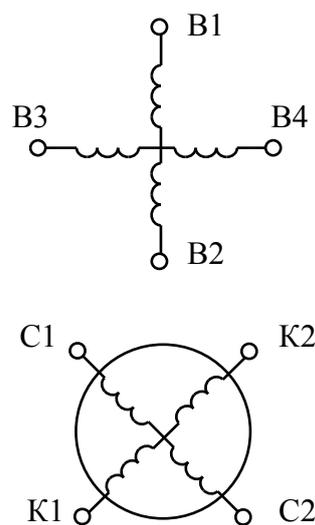


Рис. 1

У бесконтактных ВТ расположение обмоток обратное, причем квадратурная обмотка либо закорочена внутри машины, либо отсутствует вовсе [2]. ВТ выполняют таким образом, чтобы взаимная индуктивность обмоток статора и ротора изменялась по строго синусоидальному (косинусоидальному) закону.

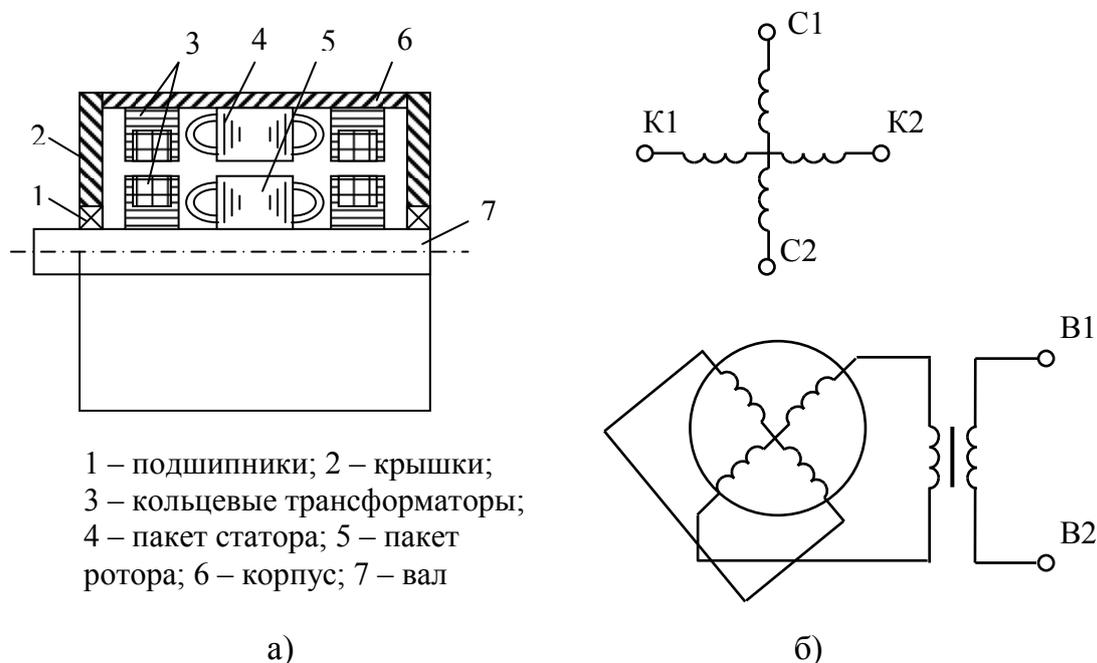


Рис. 2. Бесконтактный ВТ: конструкция (а) и электрическая схема (б)

1.2. В зависимости от схемы соединения обмоток и их питания ВТ могут работать **в различных режимах**:

- синусно-косинусный ВТ (СКВТ), позволяющий получить на выходных обмотках напряжение, пропорциональное синусу (косинусу) угла поворота ротора ВТ;
- линейный ВТ, у которого выходное напряжение пропорционально углу поворота ротора ВТ в диапазоне углов приблизительно  $\pm 60^\circ$ ;
- преобразователь координат или ВТ-построитель, позволяющий перейти от декартовой системы координат к полярной;
- ВТ в режиме фазовращателя, преобразующего угол поворота ротора ВТ в фазу выходного напряжения;
- ВТ в режиме трансформаторной дистанционной передачи, позволяющей измерить угол рассогласования между двумя механическими осями.

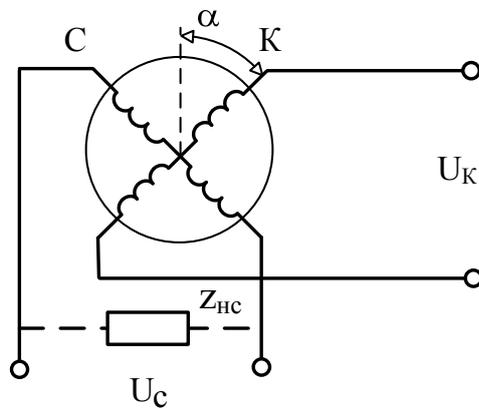
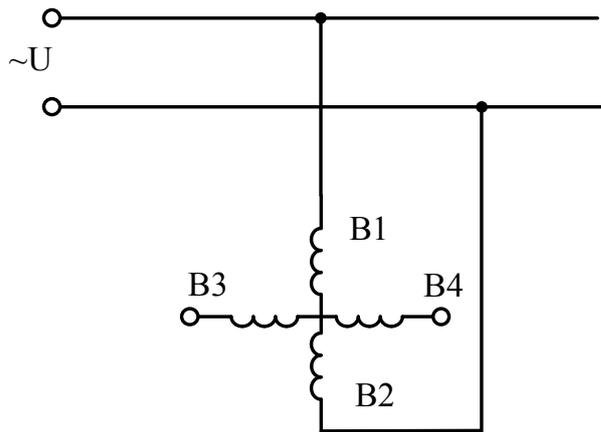


Рис. 3

$k$  – коэффициент трансформации между обмоткой возбуждения и роторными обмотками.

Мгновенные значения напряжений в обмотках будут определяться следующим образом:

$$\begin{aligned} e_k &= E_k \cdot \sin(\omega \cdot t) = E_M \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\omega \cdot t); \\ e_c &= E_c \cdot \sin(\omega \cdot t) = E_M \cdot \sin \alpha \cdot \sin(\omega \cdot t). \end{aligned}$$

Квадратурная обмотка В3В4 разомкнута и на процессы в ВТ влияния не оказывает.

При отсутствии нагрузки или при очень большом сопротивлении подключенного к СКВТ устройства напряжение на зажимах выходных обмоток ВТ будет равно наведенным ЭДС, т. е.

$$\begin{aligned} U_k &= E_k = E_M \cdot \cos \alpha; \\ U_c &= E_c = E_M \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Если же к одной из обмоток, например, синусной подключить нагрузку  $z_{НС}$ , то по ней потечет ток

1.3. Схема включения ВТ в режиме СКВТ соответствует рис. 3.

При подключении обмотки возбуждения В1В2 к сети во вращающемся трансформаторе возникает продольный магнитный поток  $\Phi_d$ , пульсирующий во времени с частотой сети.

Поток обмотки возбуждения будет наводить в синусной и косинусной обмотках ЭДС с действующими значениями, пропорциональными функциям угла поворота:

$$\begin{aligned} E_c &= E_M \cdot \sin \alpha; \\ E_k &= E_M \cdot \cos \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E_M = k \cdot U_B$  – максимальное значение ЭДС;

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{E}_c}{z_c + z_{nc}}, \quad (3)$$

где  $z_c$  – сопротивление обмотки С.

Ток в обмотке будет создавать поток  $\Phi_c$ , который в общем случае можно разложить на две составляющие: продольную  $\Phi_{cd}$  и поперечную  $\Phi_{cq}$ .

Продольный поток  $\Phi_{cd}$  направлен против потока статора и размагничивает ВТ [3]. Размагничивающее действие уравнивается увеличением тока в обмотке возбуждения В1В2. Результирующий продольный поток наводит в обмотке С ЭДС:

$$\dot{E}_{cd} = \dot{E}_M \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Поперечный поток  $\Phi_{cq}$  направлен под углом  $\alpha$  к оси обмотки С. Он наводит в ней ЭДС самоиндукции  $\dot{E}_{cq}$ , пропорциональную изменению тока  $I_c$ :

$$\dot{E}_{cq} = -j \cdot \omega \cdot L \cdot \dot{I}_c,$$

где  $L$  – индуктивность “поперечных” витков обмотки С (связанных с потоком  $\Phi_{cq}$ ), т. е.  $L = (W_c \cdot \cos \alpha)^2 \cdot \lambda$ , где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$\dot{E}_{cq} = -j \cdot \omega \cdot W_c^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \lambda \cdot \dot{I}_c,$$

а с учетом (3)

$$\dot{E}_{cq} = -j \cdot \omega \cdot W_c^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \lambda \cdot \frac{\dot{E}_c}{z_c + z_{nc}}. \quad (5)$$

Полная ЭДС  $\dot{E}_c$  представляет собой сумму ЭДС  $\dot{E}_{cd}$  и  $\dot{E}_{cq}$ :

$$\dot{E}_c = \dot{E}_{cd} + \dot{E}_{cq} = \dot{E}_M \cdot \sin \alpha - b_c \cdot \dot{E}_c \cdot \cos^2 \alpha, \quad (6)$$

где  $b_c = \frac{j \cdot \omega \cdot W_c^2 \cdot \lambda}{z_c + z_{nc}}$  – постоянный комплексный множитель.

Если решить (6) относительно  $\dot{E}_c$ , получим

$$\dot{E}_c = \frac{\dot{E}_M \cdot \sin \alpha}{1 + b_c \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что при нагрузке СКВТ синусоидальный характер зависимости  $\dot{E}_c$  от угла  $\alpha$  искажается из-за наличия слагаемого  $b_c \cdot \cos^2 \alpha$  в знаменателе выражения.

Относительная погрешность для синусоидальной обмотки ВТ

$$\Delta \dot{U}_c = \frac{\dot{E}_{c0} - \dot{E}_c}{\dot{E}_M} = \frac{b_c \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{1 + b_c \cdot \cos^2 \alpha}. \quad (8)$$

Комплексом  $\Delta \dot{U}_c$  определяется амплитудная и фазовая погрешность. Из (8) можно найти, что погрешность достигает максимального значения при угле поворота  $\alpha$ , равном  $35^\circ 16'$ .

В косинусной обмотке ЭДС также изменяется при нагрузке под влиянием поперечного потока. Выражение (7) принимает вид

$$\dot{E}_k = \frac{\dot{E}_M \cdot \cos \alpha}{1 + b_k \cdot \sin^2 \alpha}, \quad (9)$$

где  $b_k = \frac{j \cdot \omega \cdot W_K^2 \cdot \lambda}{z_K + z_{HK}}$ ; здесь  $W_K$  – число витков косинусной обмотки;

$z_K$ ,  $z_{HK}$  – сопротивления косинусной обмотки и подключенной к ней нагрузки соответственно.

Напряжение на измерительной обмотке будет отличаться от ЭДС обмотки на величину падения напряжения на её внутреннем сопротивлении  $z_c$  (или  $z_k$ ) при токе  $\dot{I}_c$ :

$$\dot{U}_c = \dot{E}_c - z_c \cdot \dot{I}_c. \quad (10)$$

Величина падения напряжения не зависит от положения ротора ВТ.

Т. к. главным техническим показателем ВТ является точность выполнения им функциональных преобразований, то важно устранять источники погрешностей.

1.4. Для устранения погрешности, вызванной поперечным потоком, применяют **симметрирование** ВТ [3]. Симметрирование может осуществляться со стороны статора – первичное симметрирование и со стороны ротора – вторичное симметрирование.

**Первичное симметрирование** заключается в нагрузке квадратурной обмотки малым сопротивлением  $z_{HB}$  (рис. 4).

Т. к. ось квадратурной обмотки совпадает с направлением продольного потока ВТ, то “поперечные” витки синусной обмотки ( $W_c \cdot \cos \alpha$ ) и витки квадратурной обмотки образуют трансформатор,

причем его первичная обмотка находится на роторе. Если сопротивление  $z_{HC}$  мало, то трансформатор работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания, взаимное размагничивание обмоток сводит результирующий поперечный поток  $\dot{\Phi}_q = \dot{\Phi}_{BK} + \dot{\Phi}_{cq}$  практически к нулю.

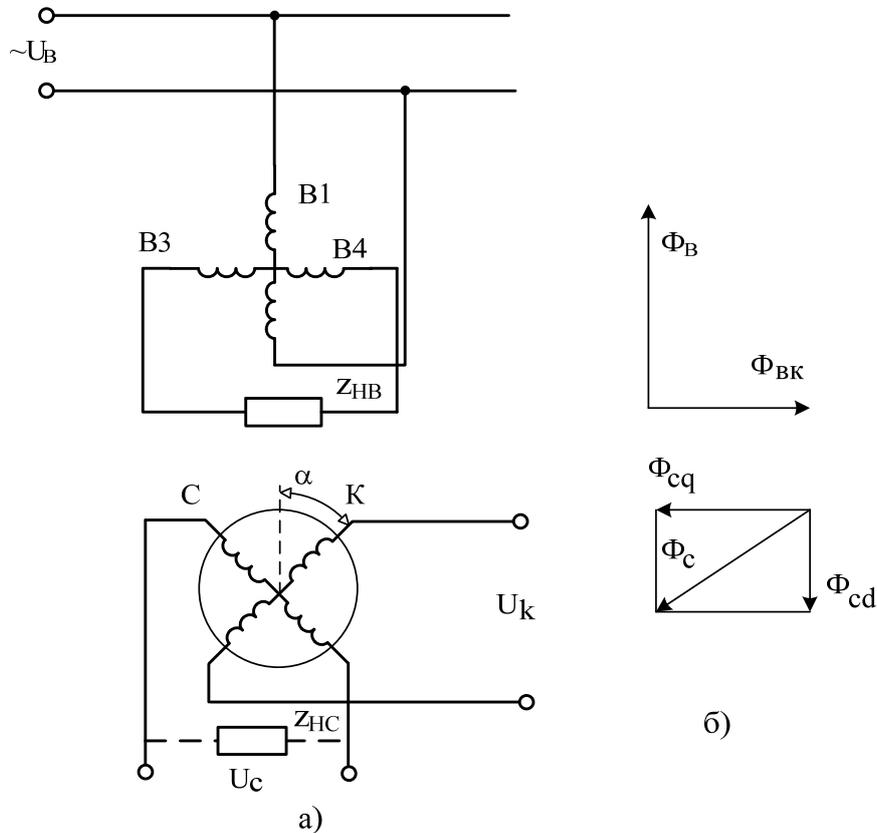


Рис. 4

Считают, что влияние поперечной реакции ротора исчезает, если при одинаковых параметрах обмоток В1В2 и В3В4 в обмотку В3В4 включить нагрузку  $z_H = z_{II}$ , где  $z_{II}$  – внутреннее сопротивление источника питания обмотки возбуждения В. Если ВТ питается от источника большой мощности при напряжении питания  $U = const$ , то можно считать  $z_{HB} = z_{II} = 0$ .

Недостатком первичного симметрирования является зависимость тока возбуждения от угла поворота ротора [4].

**Вторичное симметрирование** осуществляется со стороны ротора. При этом одновременно нагружают обе измерительные обмотки (рис. 5). По обмоткам текут токи  $I_C$ ,  $I_K$ , которые создают потоки  $\Phi_C$ ,  $\Phi_K$ . Чтобы поперечные составляющие этих потоков компенсировали друг

друга, т. е.  $\Phi_q = \Phi_{cq} + \Phi_{kq} = 0$ , необходимо получить компенсацию намагничивающих сил по поперечной оси:

$$\dot{I}_C \cdot W_C \cdot \cos \alpha = \dot{I}_K \cdot W_K \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

Тогда поперечный поток будет равен нулю, а ЭДС синусоидальной и косинусоидальной обмоток будут равны:

$$\dot{E}_C = \dot{E}_M \cdot \sin \alpha; \quad \dot{E}_K = \dot{E}_M \cdot \cos \alpha.$$

Токи, протекающие по обмоткам ротора

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_M}{z_C + z_{HC}} \cdot \sin \alpha; \quad \dot{I}_K = \frac{\dot{E}_M}{z_K + z_{HK}} \cdot \cos \alpha.$$

Подставив выражения для токов в (11), получим:

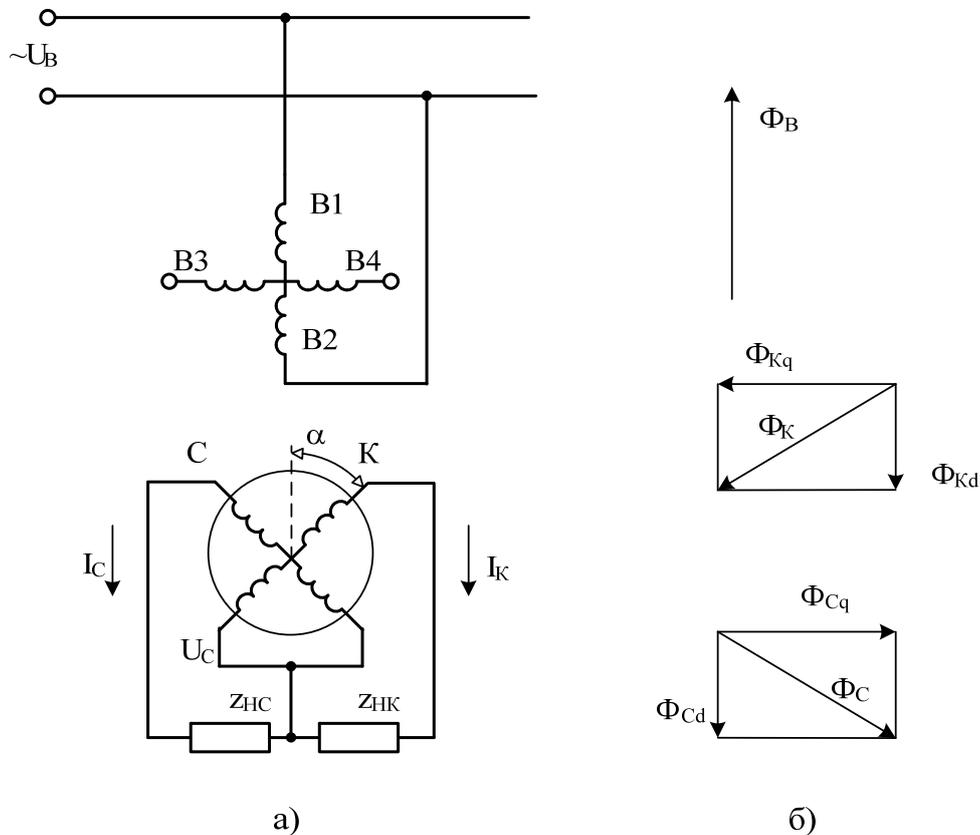


Рис. 5

$$\frac{\dot{E}_M \cdot \sin \alpha}{z_C + z_{HC}} \cdot W_C \cdot \cos \alpha = \frac{\dot{E}_M \cdot \cos \alpha}{z_K + z_{HK}} \cdot W_K \cdot \sin \alpha. \quad (12)$$

Если синусная и косинусная обмотки одинаковы, то равенство (12) выполняется, когда  $z_{HC} = z_{HK}$ , что и является условием вторичного симметрирования БТ.

Достоинством вторичного симметрирования является независимость тока возбуждения от угла поворота ротора ВТ. Недостатком данного метода является требование постоянства сопротивления нагрузки, что не всегда выполняется.

Наилучшие результаты получаются при совместном – первичном и вторичном симметрировании. В этом случае используются все четыре обмотки СКВТ.

1.5. **Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ)** используют для получения линейной зависимости выходного напряжения от угла поворота  $\alpha$  (рис. 6).

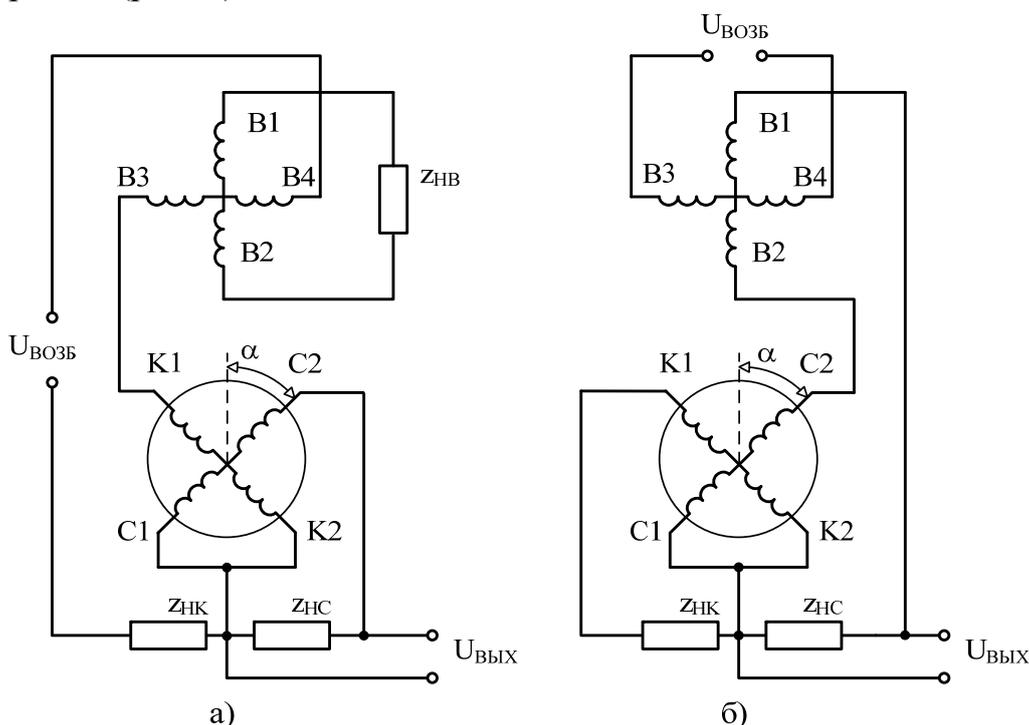


Рис. 6

Обычный СКВТ позволяет получить линейную зависимость выходного напряжения, но в небольшом диапазоне ( $\alpha = \pm 45^\circ$ ). Однако, изменив схему включения ВТ, можно этот диапазон увеличить до  $\alpha = \pm 55^\circ$  и получить выходное напряжение вида

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{K \cdot U_{\text{ВОЗБ}} \cdot \sin \alpha}{1 + K \cdot \cos \alpha},$$

где  $K = 0,565$  – коэффициент трансформации.

Когда требуется  $R_{\text{ВХ}} = \text{const}$ , используется схема, представленная на рис. 6, б, где  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ЗНС}}$ . При этом  $Z_{\text{НК}}$  подбирают так, чтобы ВТ был симметрирован, т. е. его выходное сопротивление было постоян-

ным. Чаще используется схема, изображенная на рис. 6, а, особенно, если  $Z_{HC} = \text{var}$ .

1.6. При использовании ВТ в качестве датчика положения или задающего устройства может быть реализован **фазовый режим** его работы. В этом режиме (рис. 7) обмотки ротора С и К подключены к источникам синусоидального ( $U_1 = U_M \cdot \sin \omega t$ ) и косинусоидального ( $U_2 = U_M \cdot \cos \omega t$ ) напряжений соответственно. Протекающие по этим обмоткам токи образуют вращающееся магнитное поле в ВТ. При этом на обмотке статора В1В2 наводится выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_2 \cdot U_M \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где  $K_2$  – коэффициент трансформации ВТ;

$\varphi$  – фаза выходного напряжения, величина которой пропорциональна механическому углу поворота  $\alpha$  ротора ВТ относительно статора.

1.7. Для определения рассогласования в следящих системах используется **трансформаторная дистанционная передача** на ВТ. Система состоит из двух ВТ – ВТ-датчика и ВТ-приёмника (рис. 8).

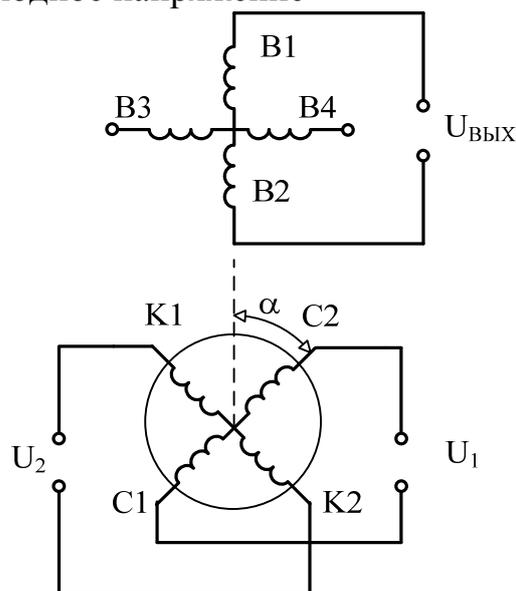


Рис. 7. Режим фазовращателя на ВТ

Напряжение питания  $\sim U$  подводится к обмотке возбуждения ВТ-датчика ВТ-Д. Обмотка возбуждения создает пульсирующий магнитный поток, который наводит в синусной и косинусной обмотках ротора ВТ-Д ЭДС

$$\dot{E}_K = \dot{E}_M \cdot \cos \alpha_D;$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_M \cdot \sin \alpha_D.$$

Квадратурная обмотка В3В4 ВТ-Д закорочена для компенсации поперечного потока.

Т. к. обмотки ротора ВТ-Д и ВТ-приёмника ВТ-П соединены, то под влиянием этих ЭДС по обмоткам и линиям связи потекут токи  $\dot{I}_K, \dot{I}_C$ . Токи в обмотках ротора ВТ-П создают МДС, результирующий вектор которых направлен в общем случае под углом к оси обмотки воз-

буждения ВТ-П и наводит в ней ЭДС  $E_{\text{ВЫХ}}$ . Значение наведенной ЭДС  $E_{\text{ВЫХ}}$  зависит от направления результирующего вектора, а последний определяется углом рассогласования осей ВТ-Д и ВТ-П  $\theta = \alpha_{\text{Д}} - \alpha_{\text{П}}$ :

$$E_{\text{ВЫХ}} = E_M \cdot \cos \theta.$$

В согласованном положении  $\alpha_{\text{Д}} = \alpha_{\text{П}}$ , а значит  $E_{\text{ВЫХ}} = 0$ . Появление же рассогласования между осями (например, поворот задающей оси на некоторый угол) приведет к появлению на зажимах обмотки возбуждения ВТ-П напряжения. Это напряжение может быть усилено и подано на исполнительный двигатель ИД, вал которого жестко связан с валами ВТ-П и рабочей машины РМ. Двигатель будет вращаться до тех пор, пока углы  $\alpha_{\text{Д}}$  и  $\alpha_{\text{П}}$  не станут равны, а напряжение на обмотке возбуждения ВТ-П не изменится до нуля.

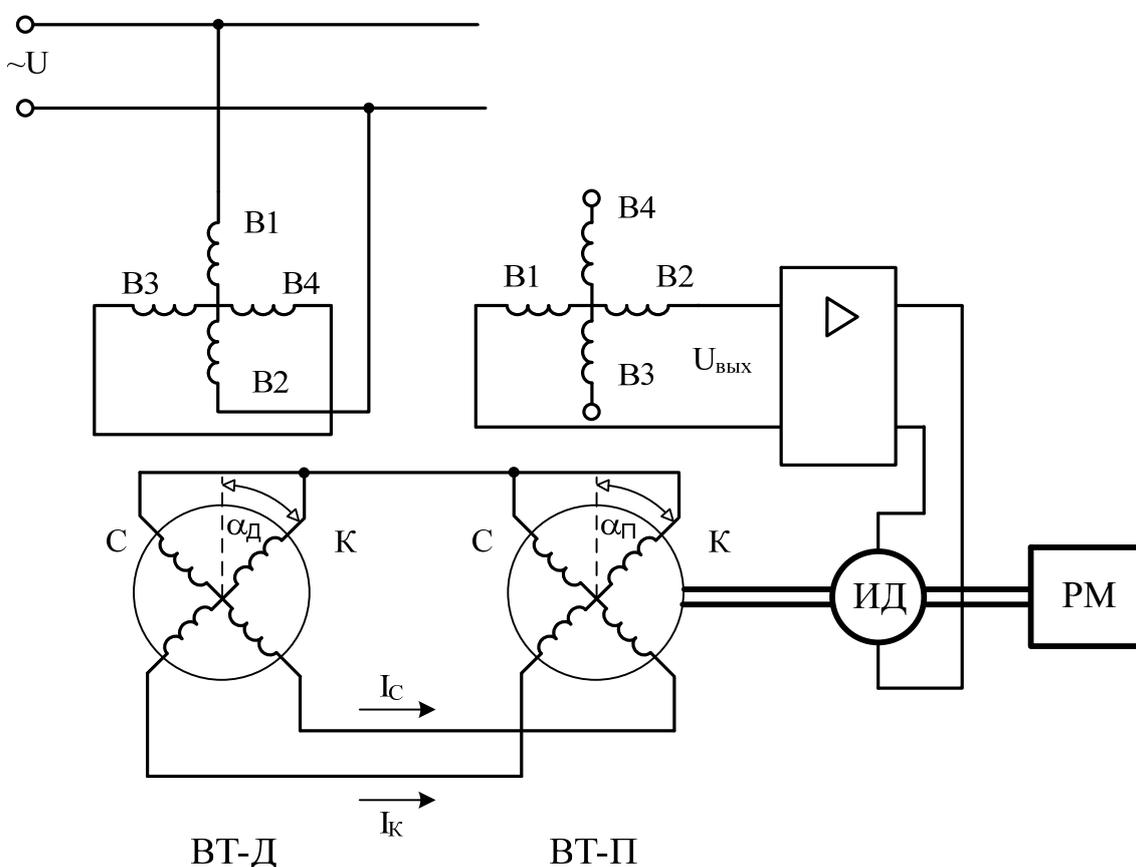


Рис. 8

По сравнению с трансформаторной передачей на сельсинах передача на ВТ обеспечивает большую точность, но т. к. их выходная мощность меньше, требуется больший коэффициент усиления усилителя.

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. В работе используются следующие приборы и оборудование:

2.1.1. Два стенда СВТ-1.

2.1.2. Осциллограф С1-68.

2.1.3. Соединительные провода.

2.1.4. Генератор сигналов специальной формы.

2.2. Стенды оборудованы бесконтактными ВТ типа РБ-2.

Его основные параметры:

- номинальное напряжение питания 12 В;
- номинальная частота питания 400 Гц;
- число полюсов 2;
- ошибка  $\leq 5$  мин.

## 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

### 3.1. Исследование режима СКВТ

3.1.1. Снять синусную характеристику при холостом ходе. Для этого

- на обмотку возбуждения подать синусоидальный сигнал частотой 400 Гц от генератора сигналов специальной формы;
- к синусной обмотке  $W_{SIN}$  (гнезда XS1, XS2) подключить осциллограф или вольтметр;
- снять характеристику  $U_C = f(\alpha)$ , считывая величину амплитуды синусоиды и вращая ротор ВТ в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ .

Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

$R_H =$ Ом	$\alpha$ , град	0	30	60	...	360
Измерения	$U_C$ , В					
	$U_K$ , В					
Расчет	$U_C$ , В					
	$U_K$ , В					
	$\Delta U_{\text{ВЫХС}}$ , %					
	$\Delta U_{\text{ВЫХК}}$ , %					

3.1.2. Снять косинусную характеристику при холостом ходе  $U_K = f(\alpha)$ , повторив п. 3.1.1, но подключив осциллограф или вольтметр к косинусной обмотке  $W_{COS}$  (гнезда XS3, XS4).

3.1.3. Снять синусную характеристику при нагрузке. Для этого

- подключить нагрузку  $R_{HC} = 900\Omega$  к синусной обмотке, для чего установить перемычку X1;

- осциллограф или вольтметр подключить к синусной обмотке;
- снять характеристику  $U_C = f(\alpha)$  в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ;
- результаты занести в табл. 2, аналогичную табл. 1;
- подключить нагрузку  $R_{HC} = 450\Omega$  и повторить предыдущие действия п. 3.1.3, результаты занести в табл. 3, аналогичную табл. 1.

3.1.4. Снять косинусную характеристику при нагрузке аналогично п. 3.1.3.

3.1.5. Рассчитать теоретические значения  $U_C'$ ,  $U_K'$  для углов  $\alpha$  по формулам (2). За значение  $E_M$  взять максимальное значение из экспериментальных данных при холостом ходе (при  $\alpha = 0^\circ$  для синусной характеристики и  $\alpha = 90^\circ$  для косинусной характеристики).

Рассчитать относительную погрешность  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ . Для синусной характеристики погрешность рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{\text{ВЫХС}} = \frac{|U_C(\alpha) - U_C'(\alpha)|}{E_M} \cdot 100\%.$$

Для косинусной характеристики погрешность определяется аналогично.

### 3.2. Исследование режима фазовращателя

Собрать схему, изображенную на рис. 7. На синусную и косинусную обмотку подать соответственно синусоидальное и косинусоидальное напряжения частотой 400 Гц.

Сигнал с выхода ВТ подать на измерительный вход осциллографа. На вход внешней синхронизации осциллографа подать синусоидальное или косинусоидальное напряжение возбуждения. Вращая вал ВТ, снять зависимость  $\varphi = f(\alpha)$ . Результаты занести в табл. 4.

Таблица 4

$\alpha$ , град	0	30	60	...	360
$\varphi$ , град					

### 3.3. Исследование трансформаторной дистанционной передачи на ВТ

Собрать схему рис. 8, используя два стенда СКТ-1.

К обмотке возбуждения ВТ-П подключить осциллограф (вольтметр). Вал ВТ-П жестко закрепить.

Вращая вал ВТ-Д, снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\theta)$ . Результаты занести в табл. 5.

Таблица 5

$\theta$ , град	0	30	60	...	360
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В					

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схемы снятия характеристик.
- 4.3. Таблицы данных.
- 4.4. Графики экспериментально снятых и рассчитанных характеристик.
- 4.5. Ответы на контрольные вопросы.
- 4.6. Выводы по работе.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Как устроен ВТ?
- 5.2. Как осуществляется в ВТ электрическое соединение неподвижной части схемы с роторными обмотками?
- 5.3. Как работает ВТ в режиме СКВТ?
- 5.4. Что понимается под симметрированием, как оно осуществляется и с какой целью?
- 5.5. Где применяется ЛВТ и чем отличаются его схемы, показанные на рис. 6, *а* и *б*?
- 5.6. Где применяется и как функционирует ВТ в режиме фазовращателя?
- 5.7. Для чего используется и как работает трансформаторная дистанционная передача на ВТ?

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 386 с.
2. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т. 2 / Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
3. Волков Н. И., Миловзоров В. П. Электромашинные устройства автоматики: Учеб. для вузов по спец. “Автоматика и телемеханика”. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 335 с.
4. Сабинин Ю. А. Электромашинные устройства автоматики: Учебник для вузов. – Л. Энергоатомиздат, 1988. – 408 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ЛИНЕЙНОГО ПОЛОЖЕНИЯ (ПРИБЛИЖЕНИЯ)

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение принципа действия и свойств бесконтактных датчиков линейного положения: оптического, индуктивного и емкостного бесконтактных выключателей и индуктивного датчика с аналоговым выходом.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 1.1. Емкостный бесконтактный выключатель

Устройство и принцип работы емкостного бесконтактного выключателя (датчика приближения) пояснен на рис. 1.

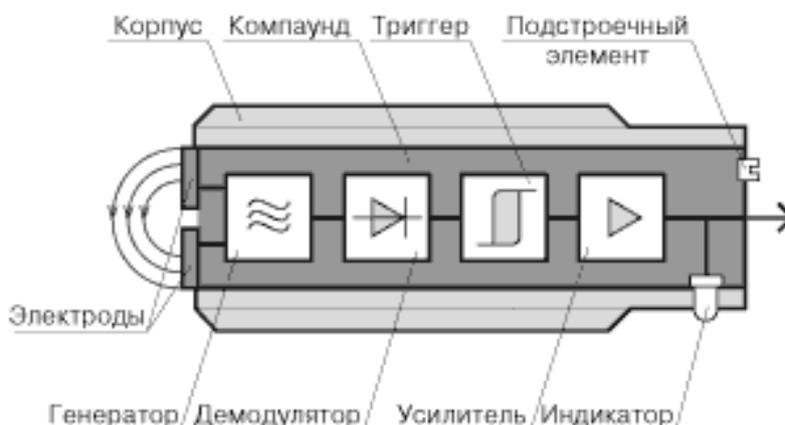


Рис. 1. Устройство ёмкостного бесконтактного выключателя

Активная поверхность емкостного выключателя образована двумя металлическими **электродами**, которые можно представить как обкладки "развернутого" конденсатора. Электроды включены в цепь обратной связи высокочастотного **автогенератора**, настроенного таким образом, что при отсутствии объекта вблизи активной поверхности он не генерирует. При приближении к активной поверхности выключателя объект попадает в электрическое поле и изменяет емкость обратной связи. Генератор начинает вырабатывать колебания, амплитуда которых возрастает по мере приближения объекта.

**Демодулятор** преобразует изменение амплитуды высокочастотных колебаний генератора в изменение постоянного напряжения. **Триггер** обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса. **Усилитель** обеспечивает необходимый уровень сигнала на выходе и нагрузочную способность выхода датчика.

**Светодиодный индикатор** показывает состояние выключателя, обеспечивает контроль работоспособности, оперативность настройки. **Компаунд** обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды. **Корпус** обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий. Выполняется из латуни или полиамида, комплектуется метизными изделиями.

Разнообразие объектов воздействия, вызывающих срабатывание емкостных выключателей, обуславливает широкий спектр областей, в которых они применяются.

**Наибольший эффект при использовании емкостных датчиков достигается в системах:**

- контроля уровня наполнения резервуаров, емкостей, контейнеров сыпучими и жидкими материалами;
- контроля уровня содержимого в упаковке, в таре;
- сигнализации разрыва лент;
- счета и позиционирования объектов любого рода.

Возможно применение емкостных выключателей в пищевой и химической отраслях промышленности. При этом для исключения непосредственного контакта активной поверхности выключателя с пищевыми продуктами или же с химически агрессивными средами, можно рекомендовать использовать защитную диэлектрическую перегородку, изготовленную из соответствующих материалов.

При необходимости обнаружения веществ и материалов, находящихся за металлической стенкой, в ней следует выполнить окно, закрытое диэлектрической перегородкой, перед которой устанавливают емкостный выключатель. Толщина перегородки должна быть значительно меньше расстояния воздействия выключателя, а диэлектрик должен иметь малую диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$ .

## **1.2. Оптический бесконтактный выключатель (ОБВ)**

Оптические бесконтактные выключатели состоят из 2-х функционально законченных узлов – источника излучения и приемника этого излучения. Источник оптического излучения (излучатель) и приемник могут быть выполнены в одном корпусе или в разных корпусах. Использование в оптических датчиках инфракрасного излучения позволяет минимизировать влияние на срабатывание датчиков посторонних фоновых источников света.

Принцип действия ОБВ пояснен на рис. 2.

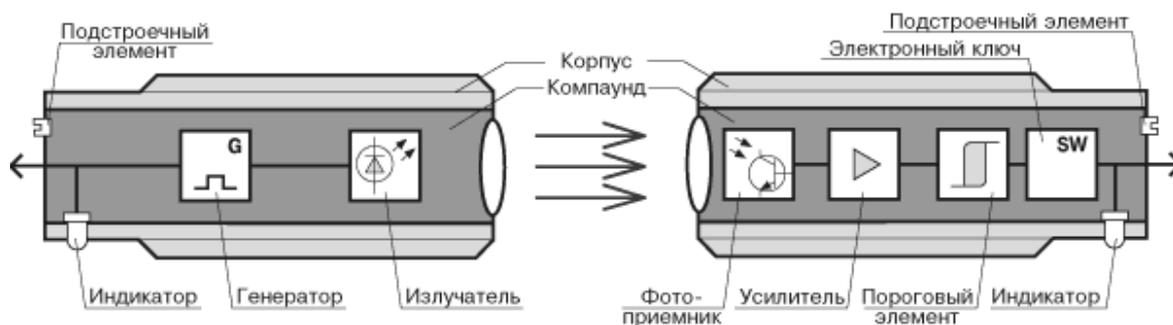


Рис. 2. Устройство оптического бесконтактного выключателя

**Генератор** вырабатывает кодированную последовательность электрических импульсов. Импульсы подаются на **излучатель** – светодиод, создающий излучение оптического диапазона. **Индикатор** показывает наличие напряжения питания на излучателе. Оптическая система формирует диаграмму направленности излучения и при необходимости его поляризацию.

**Компаунд** обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды. **Корпус** обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий. Выполняется из латуни или полиамида, комплектуется метизными изделиями.

Оптическая система приемника излучения формирует диаграмму направленности приемника и при необходимости производит поляризационную селекцию. **Фотоприемник** воспринимает излучение и преобразует его в электрический сигнал. **Усилитель** увеличивает входной сигнал до необходимого значения. **Пороговый элемент** обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса.

**Электронный ключ** обеспечивает коммутацию выходного тока выключателя, определяет схему подключения нагрузки, имеет защиту от перегрузки и короткого замыкания. Светодиодный цветной **индикатор** показывает состояние выключателя, позволяет определить функциональный резерв по выбранному объекту, обеспечивает контроль работоспособности, оперативность настройки. Подстроечный элемент (регулятор чувствительности) позволяет производить настройку выключателя по фактической контрастности объекта на фоне окружающих предметов.

Функциональный резерв определяется как отношение светового потока, полученного приемником, к минимальному световому потоку, вызывающему срабатывание выключателя. Функциональный резерв позволяет компенсировать ослабление сигнала в результате загрязнения оптики и наличия аэрозольных компонентов в окружающем пространстве.

**Цветной светодиодный индикатор** работает следующим образом:

- при отсутствии сигнала на входе приемника индикатор не светится;
- при появлении сигнала с уровнем, при котором происходит срабатывание выключателя, индикатор светится зеленым цветом;
- при дальнейшем увеличении уровня сигнала зеленый цвет плавно изменяется через желтый, оранжевый до красного.

**Контрастность объекта** определяется его собственным коэффициентом отражения и величиной отраженного света от окружающего фона.

**ОБВ могут быть барьерного типа (тип Т.), диффузного типа (тип D.), рефлекторного типа (тип R.).**

Принцип работы оптических бесконтактных выключателей **барьерного типа** показан на рис. 3.

Оптические выключатели, работающие на прямом луче, состоят из приемника и передатчика, выполненных в отдельных корпусах. При эксплуатации они располагаются соосно друг против друга. Поток излучения от излучателя передатчика направлен на приемник. Срабатывание происходит при прерывании луча объектом. Выключатели, использующие принцип прерывание луча, отличаются большой дальностью действия – до нескольких десятков метров и большой помехозащищенностью от воздействия посторонних факторов (пыль, капли воды и других жидкостей).

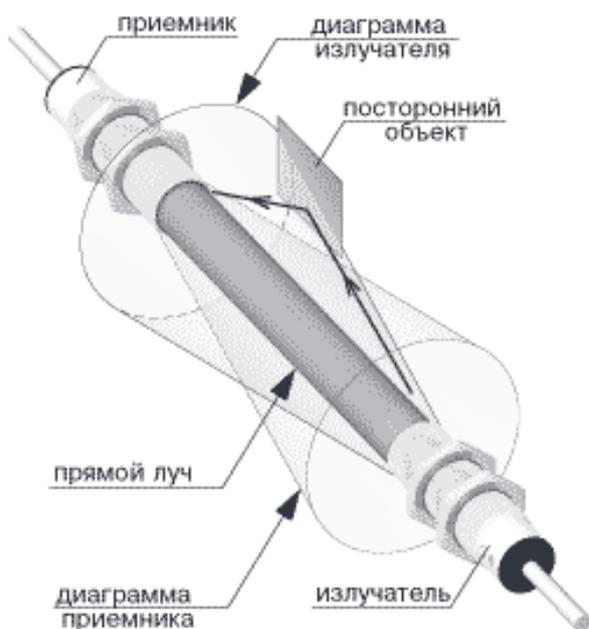


Рис. 3. Конструкция ОБВ (Тип Т. Барьерный)

Основными недостатками таких выключателей является наличие двух отдельных изделий, что не всегда удобно при их монтаже и прокладке проводов питания к ним.

Необходимо иметь в виду, что:

- посторонние предметы с высоким коэффициентом отражения, подобные рефлектору, находящиеся в области перекрытия диаграмм направленностей приемника и передатчика, могут вызвать ложное срабатывание;
- прозрачные и полупрозрачные недостаточно ослабят луч до порога срабатывания.

Для уменьшения или полного устранения вышеперечисленных эффектов оптические выключатели снабжены регуляторами чувствительности.

Диаметр прямого луча определяет минимальный размер регистрируемого объекта.

В оптических выключателях, использующих эффект **диффузного и зеркального отражения (тип D.)** потока излучения от объекта приемник и излучатель выполнены в одном корпусе. Поток излучения от передатчика попадает на поверхность объекта, от которого происходит его отражение в различных направлениях. Распределение отраженного потока определяется оптическими свойствами объекта. Часть потока возвращается обратно в приемник, вызывая его срабатывание.

Преимущество данного вида выключателей заключается в простоте применения, при котором не требуется никаких дополнительных приборов.

При использовании выключателей данного типа необходимо учитывать возможность появления ложных срабатываний в случае появления за контролируемым объектом предметов с гораздо большей отражательной способностью. В этих случаях следует применять диффузные оптические выключатели с подавлением фона.

Минимальный размер регистрируемого объекта определяется его отражающей способностью, контрастностью и функциональным резервом.

Принцип работы оптических бесконтактных выключателей **рефлекторного типа** показан на рис. 4.

Излучение светодиода имеет круговую поляризацию, т. е. представляет собой совокупность множества плоскополяризованных пространственных световых колебаний (волн) с различными плоскостями поляризации.

Если на пути луча установить специальный поляризационный фильтр, то через него пройдут только те волны, плоскость поляризации которых совпадает с плоскостью поляризации фильтра. Таким образом, поляризационный фильтр формирует луч с плоской поляризацией.

При отражении поляризованного луча от различных предметов плоскости поляризации падающего и отраженного луча, как правило, совпадают.

Плоскость поляризации изменяется на  $90^{\circ}$  при отражении от специальных световозвращателей (угловых отражателей или рефлекторов). Если на пути поляризованного луча расположить еще один поляризационный фильтр с плоскостью поляризации, развернутой на  $90^{\circ}$  по отно-

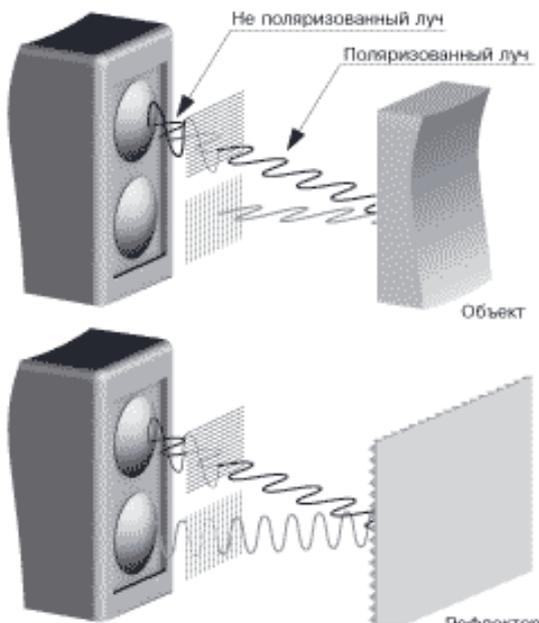


Рис. 4. Конструкция ОБВ  
(Тип R. Рефлекторный)

шению к первому, то луч через него не пройдет. Таким образом, данный фильтр будет для него барьером.

Специальные световозвращатели – "рефлекторы", которые поворачивают плоскость поляризации на  $90^{\circ}$ . Они выполнены в виде самоклеящейся пленки или в виде отдельного устройства для монтажа на объектах.

Если такой рефлектор поместить на пути поляризованного луча, то луч, отразившись от него, изменит плоскость поляризации и свободно пройдет через входной поляризационный фильтр фотоприемника, повернутый на  $90^{\circ}$  по от-

ношению к поляризационному фильтру излучателя.

Работая с поляризованным излучением, выключатель воспринимает поток только от световозвращателя, который поворачивает плоскость поляризации на  $90^{\circ}$ . Все предметы, появляющиеся между выключателем и световозвращателем, вызывают прерывание поляризованного луча и срабатывание выключателя.

Данный эффект реализован в оптических выключателях с обозначением TRP. Поляризационные фильтры встроены вовнутрь, поэтому по внешнему виду такие выключатели ничем не отличаются от выключателей, использующих принцип отражения луча от объекта. Эти выключатели по помехозащищенности от воздействия посторонних факторов приближаются к выключателям, использующим прерывание луча.

### 1.3. Индуктивный бесконтактный выключатель (ИБВ)

**Индуктивный бесконтактный выключатель** имеет чувствительный элемент в виде катушки индуктивности с открытым в сторону активной поверхности магнитопроводом.

Принцип работы ИБВ показан на рис. 5.

При подаче напряжения питания перед активной поверхностью индуктивного выключателя образуется переменное магнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности генератора. При попадании объекта воздействия в зону чувствительности выключателя, снижается добротность колебательного контура и амплитуда колебаний, что вызывает срабатывание триггера и изменение состояния выхода выключателя.

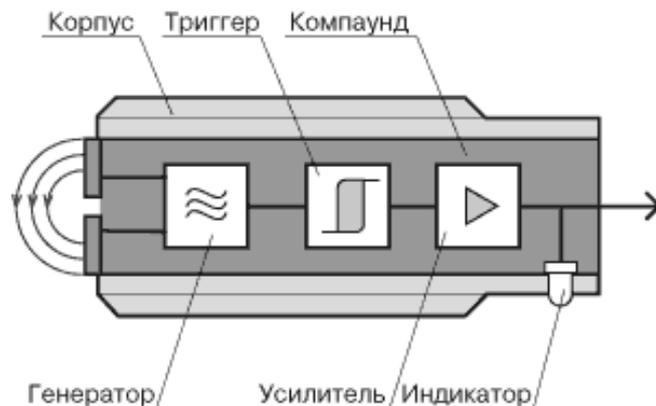


Рис. 5. Конструкция индуктивного бесконтактного выключателя

Индуктивные выключатели наиболее эффективно использовать в качестве конечных выключателей в автоматических линиях, станках и т. п., так как они срабатывают только на металлы и не чувствительны к остальным материалам. Это увеличивает их защищенность от помех. Например, введение в зону чувствительности выключателя рук оператора, эмульсии, воды, смазки и т. п. не приведет к ложному срабатыванию.

Объектом воздействия для индуктивных выключателей являются металлические детали: зубья шестерен, кулачки, ползуны; часто это металлическая пластина, прикрепленная к соответствующей детали оборудования.

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. При исследовании бесконтактных датчиков линейного положения используется блок 395, позволяющий изменить и измерить положение воздействующего объекта относительно датчика (рис. 6).

2.2. Однофазный источник питания G1 используется для безопасного питания блоков счетчика импульсов A2 (409) и мультиметров A3 (509.3).

2.3. При испытании бесконтактный датчик устанавливают в каретку вертикального перемещения (1), а зажим с объектом воздействия в каретку горизонтального перемещения (7, 8, 4). Вращая рукоятку вертикального перемещения (2) устанавливают риску на корпусе датчика с лицевой стороны на отметку «100 мм» вертикальной линейки (3). Закрепленный в зажиме объект воздействия (7 и 8) устанавливают в отверстия нижнего ряда каретки горизонтального перемещения (4). Вращением ручки горизонтального перемещения (5) добиваются, чтобы лицевая поверхность объекта воздействия касалась торца датчика. По горизонтальной линейке (6) отсчитывают смещение нуля горизонтальной шкалы. Величина смещения обычно составляет 0...3 мм. В даль-

нейшем, при измерении расстояния между датчиком и объектом воздействия полученное смещение вычитают из величины, измеренной по горизонтальной линейке.

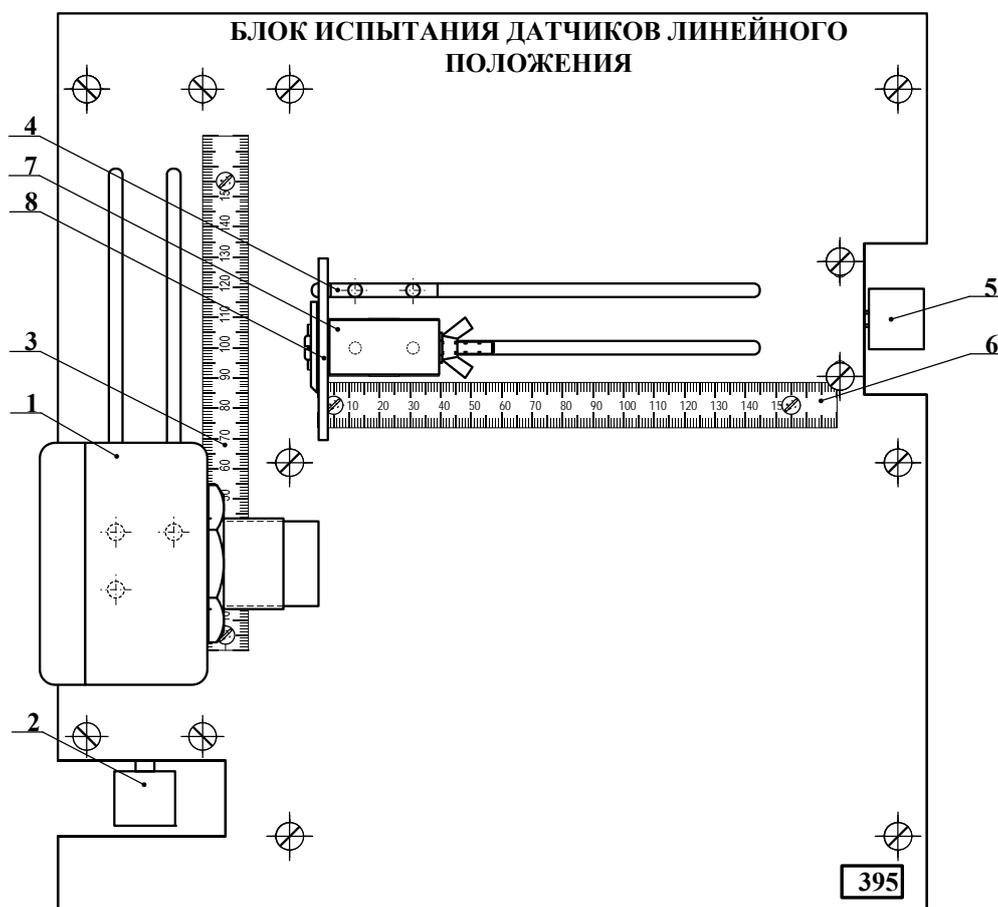


Рис. 6. Блок испытания датчиков линейного положения:

1 – датчик, установленный в каретку вертикального перемещения; 2 – рукоятка вертикального перемещения; 3 – линейка вертикального перемещения. Отсчет производится по риску на корпусе датчика. Ось датчика совпадает с осью объекта воздействия, когда риска датчика указывает на деление 100 мм вертикальной линейки; 4 – каретка горизонтального перемещения; 5 – ручка горизонтального перемещения; 6 – линейка горизонтального перемещения. В положении «0» лицевая сторона объекта воздействия касается торца корпуса датчика; 7 – зажим; 8 – объект воздействия

Блок испытания датчиков линейного положения позволяет исследовать статическую пространственную характеристику датчика. Механизм горизонтального перемещения удаляет или приближает объект воздействия к датчику, а механизм вертикального перемещения смещает продольную ось датчика относительно оси объекта воздействия. Измеряя выходной сигнал датчика, строим его зависимость от расстояния

до объекта воздействия и величины смещения продольных осей объекта и датчика.

2.4. В работе в качестве объектов воздействия используются пластинки из четырех материалов: оргстекло, текстолит, алюминий, железо. С одной стороны пластинки из алюминия и железа покрыты краской.

### 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

#### 3.1. Испытание оптического, емкостного и индуктивного бесконтактных выключателей

3.1.1. Исследуемый оптический бесконтактный выключатель установить в каретку вертикального перемещения блока испытания датчиков линейного положения (395) как показано на рис. 6. Ручкой вертикального перемещения установить риску на корпусе выключателя на отметку «100 мм» вертикальной линейки.

3.1.2. При отключенном питании блоков собрать схему, приведенную на рис. 7. Бесконтактный выключатель подключается к источнику питания +24 В блока счетчика импульсов А2 (409). Напряжение на выходе бесконтактного выключателя измеряется мультиметром блока А3 (509.3). Для подключения выхода датчика к мультиметру используйте щупы из комплекта мультиметра.

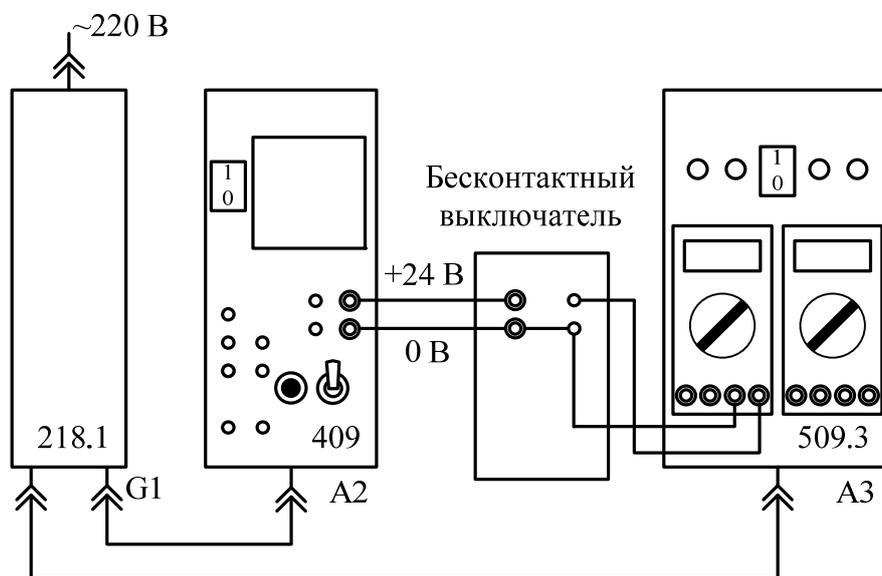


Рис. 7. Схема электрическая соединений при исследовании бесконтактных выключателей

3.1.3. Определите, на какие объекты реагирует выключатель выбранного типа: поочередно подносите объекты к торцу выключателя на расстояние 5...10 мм и наблюдайте за выходным сигналом выключате-

ля. Оптический выключатель не работает при расстояниях до объекта воздействия менее 5 мм. Удаляйте объект от датчика и оцените расстояние, на котором происходит включение (выключение) датчика.

3.1.4. Объект воздействия, на который выключатель реагирует закрепить в зажиме и установить в каретку горизонтального перемещения. Ручкой горизонтального перемещения указатель зажима устанавливается на «0» горизонтальной линейки. Измерьте величину смещения нуля (обычно 0...3 мм). В дальнейшем полученное смещение нуля необходимо вычитать из отсчета расстояния по горизонтальной линейке.

3.1.5. Ручкой горизонтального перемещения постепенно отодвигайте объект воздействия от бесконтактного выключателя и зафиксируйте расстояние, на котором произойдет переключение выходного напряжения.

Повторите опыт при приближении объекта к датчику. Из-за гистерезиса характеристики выключателя расстояния его включения и отключения не совпадают.

Результаты эксперимента занести в табл. 1.

Зафиксируйте в табл. 1 также начальное напряжение на выходе датчика  $U_0$  (в положении объекта рядом с датчиком).

Таблица 1

Материал		Оргстекло	Текстолит	Железо	Железо (ч.)	Алюминий	Алюминий (б.)	Примечание
$L_{удал}, мм$	широкие							$U_0 =$
$L_{приб}, мм,$								
$L_{удал}, мм$	узкие							
$L_{приб}, мм,$								

3.1.6. Повторите пункты 3.1.4 и 3.1.5 для других объектов, на которые реагирует исследуемый выключатель (широкие и узкие пластины).

3.1.7. Повторите пункты 3.1.1...3.1.6 для **емкостного** и **индуктивного** бесконтактных выключателей.

Результаты экспериментов занести в табл. 2 и 3, аналогичные табл. 1.

## 3.2. Испытание индуктивного датчика линейного положения

3.2.1. Исследуемый индуктивный датчик линейного положения установить в каретку вертикального перемещения блока испытания датчиков линейного положения (395) как показано на рис. 6. Ручкой верти-

кального перемещения установить риску на корпусе выключателя на отметку «100 мм» вертикальной линейки.

3.2.2. При отключенном питании блоков собрать схему, приведенную на рис. 8. Бесконтактный выключатель подключается к источнику питания +24 В блока счетчика импульсов А2 (409). В зависимости от расстояния до объекта воздействия ток на выходе индуктивного датчика изменяется в пределах 1,25...20 мА при нагрузке не более 600 Ом. Для измерения тока к выходу датчика подключается миллиамперметр (мультиметр, блок 509.3).

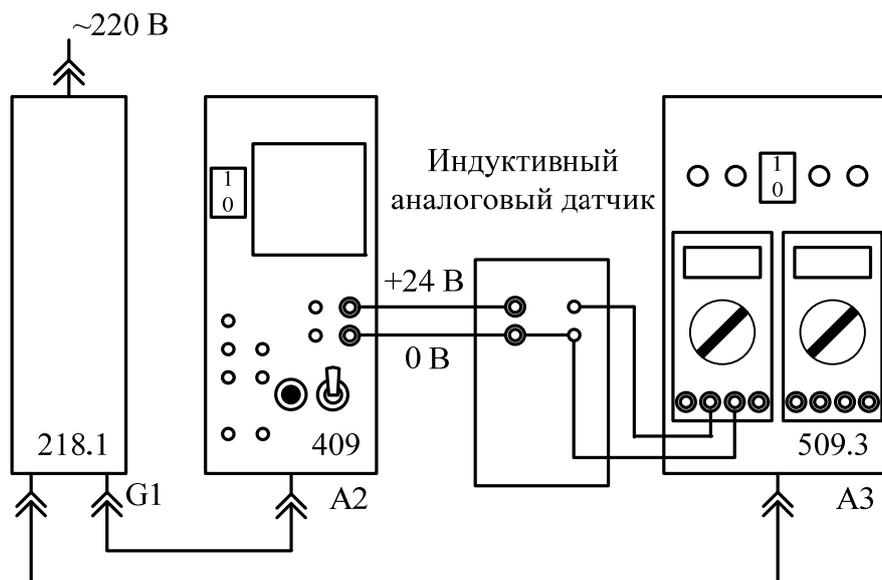


Рис. 8. Схема электрическая соединений при исследовании индуктивного аналогового датчика положения

3.2.3. Определите, на какие объекты реагирует индуктивный датчик линейного положения.

3.2.4. Объект воздействия, на который выключатель реагирует, закрепите в зажиме и установите в каретку горизонтального перемещения. Ручкой горизонтального перемещения указатель зажима устанавливается на «0» горизонтальной линейки. Измерьте величину смещения нуля (обычно 0...3 мм). В дальнейшем полученное смещение нуля необходимо вычитать из отсчета расстояния по горизонтальной линейке.

3.2.5. Ручкой горизонтального перемещения постепенно отодвигайте объект воздействия от датчика и измеряйте выходной ток датчика. Рекомендуемый диапазон изменения расстояния между датчиком и объектом 0...50 мм. Результаты эксперимента занести в табл. 4.

3.2.6. Повторите пункты 3.2.4 и 3.2.5 для других объектов, на которые реагирует исследуемый датчик (широкие и узкие пластины).

Таблица 4

$L$ , мм	0	5	10	...	50	Материал, ширина пластин
$I_1$ , мА						
$I_2$ , мА						
$I_3$ , мА						
$I_4$ , мА						
...						

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Описание лабораторной установки, исследуемые схемы.
- 4.3. Таблицы экспериментов.
- 4.4. Построить характеристики  $U=f(L)$  для бесконтактных выключателей и  $I=f(L)$  для индуктивного датчика положения.
- 4.5. Выводы по работе.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Объясните принцип работы оптического бесконтактного выключателя.
- 5.2. Каков принцип работы ёмкостного бесконтактного выключателя?
- 5.3. Сравните ёмкостной и индуктивный бесконтактные выключатели и перечислите их преимущества и недостатки.
- 5.4. Перечислите основные типы оптических датчиков положения, поясните их принцип действия.
- 5.5. Сравните резистивный и индуктивный датчики положения, перечислите их преимущества и недостатки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин/ под ред. Е.О. Полищука. – Киев: Высшая школа, 1984. С. 284–288.
2. Расчет и конструирование деталей аппаратуры САУ / В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов. – М.: Машиностроение, 1982.
3. Электронный ресурс <http://www.megak.ru/>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение принципов действия, характеристик и схем включения датчиков температуры – термопары, терморезистора и термистора.

### 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В современной промышленности существует множество технологических процессов, требующих точного контроля температуры при производстве продукции. Температуру можно измерить с помощью различных датчиков, которые оценивают температуру по изменению каких-либо физических параметров. Существует большая номенклатура датчиков температуры, но наиболее часто употребляются термопары, термосопротивления, жидкостные и инфракрасные термометры.

#### 1.1. Измерение температуры с помощью термопар

Термоэлектрические датчики (термопары) относятся к датчикам генераторного типа. Их работа основана на одном из термоэлектрических явлений – появлении **термоэлектродвижущей силы** (термо-ЭДС).

Сущность этого явления заключается в следующем. Если составить электрическую цепь из двух разнородных металлических проводников (или полупроводников), причем с одного конца проводники спаять, а место соединения нагреть, то в такой цепи возникает ЭДС. Эта ЭДС будет пропорциональна температуре места спая (точнее, разности температур места спая и свободных, неспаянных концов). Коэффициент пропорциональности зависит от материала проводников и в определенном интервале температуры остается постоянным. Цепь, составленная из двух разнородных материалов, называется **термопарой**; проводники, составляющие термопару, называются **термоэлектродами**; места соединения термоэлектродов – спаями. Спай, помещаемый в среду, температуру которой надо измерить, называется горячим или рабочим. Спай, относительно которого измеряется температура, называется холодным или свободным. Возникающая при различии температур горячего и холодного спаев ЭДС называется **термо-ЭДС**. По значению этой термо-ЭДС можно определить температуру.

Возникновение термо-ЭДС объясняется наличием свободных электронов в металлах. Эти свободные электроны хаотически движутся между положительными ионами, образующими остов кристаллической

решетки. В разных металлах свободные электроны обладают при одной и той же температуре разными скоростями и энергиями. При соединении двух разнородных металлов (электродов) свободные электроны из одного электрода проникают в другой. При этом металл с большей энергией и скоростью свободных электронов больше их теряет. Следовательно, он приобретает положительный потенциал. Металл с меньшей энергией свободных электронов приобретает отрицательный потенциал. Возникает контактная разность потенциалов – термо-ЭДС.

Эта термо-ЭДС зависит не только от температуры горячего спая  $T_1$  (т. е., от измеряемой температуры), но и от температуры холодного спая  $T_2$  и определяется разностью этих температур:

$$E = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_2),$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент пропорциональности или термоэлектрическая чувствительность.

Только при условии поддержания температуры  $T_2$ , равной стандартному значению, измеряемая термо-ЭДС может рассматриваться как функция, прямопропорциональная значению  $T_1$ . В промышленности принята стандартная температура для  $T_2$  равная  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ; следовательно, ЭДС будет определяться по формуле:  $E_{\text{ВЫХ}} = V_1 = \alpha_1 \cdot (T_1 - 0) = \alpha_1 \cdot T_1$ .

Для измерения термо-ЭДС, вырабатываемой термопарой, в цепь термопары включают измерительный прибор (милливольтметр). Милливольтметр включают либо разомкнув свободный спай (рис. 1, а), либо в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 1, б). Как видно из схем включения измерительного прибора, в случае разомкнутого свободного спая (рис. 1, а) у термопары три спая: один горячий 1 и два холодных 2 и 3, которые должны иметь постоянную температуру.

При включении милливольтметра в разрыв одного из термоэлектродов (рис. 1, б) имеется четыре спая: один горячий 1, один холодный 2 (он должен иметь постоянную температуру), два нейтральных 3 и 4 (они должны находиться при одинаковой, но не обязательно постоянной температуре). Для обеих схем термо-ЭДС и показания прибора будут одинаковыми, если соответственно одинаковыми будут температуры горячих и холодных спаев.

Способ изготовления спая (сваркой, спайкой и т. п.) на термо-ЭДС не влияет, если только размеры спая таковы, что температура его во всех точках одинакова.

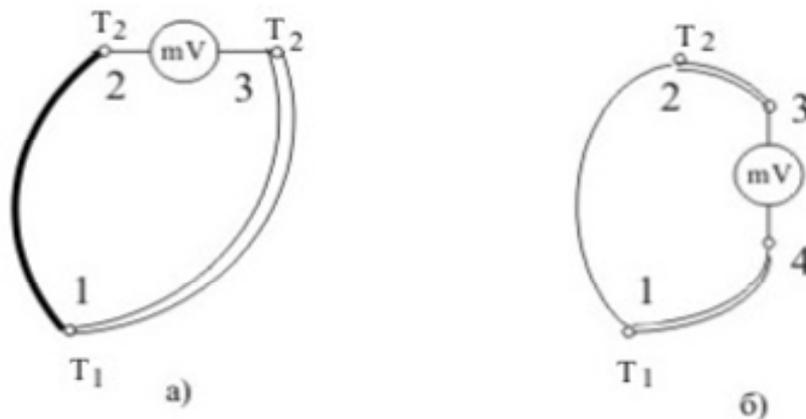


Рис. 1

Примеры термопар, построенных на разных комбинациях металлов, показаны в табл. 1. Выбор конкретной термопары зависит от рабочего диапазона температуры и желаемой чувствительности.

Таблица 1

Тип термопары	$\alpha_1$ (мкВ / °С)	Рабочий диапазон (°С)
медь-константан	45	от -150 до +350
железо-константан	53	от -150 до +1000
хромель-алюмель	40	от -200 до +500
хромель-константан	80	от 0 до +500
платина-(платина-родий)	6,3	от 0 до +1500

## 1.2. Измерение температуры с помощью термосопротивлений

Принцип действия термосопротивлений основан на том, что электрическое сопротивление материала изменяется при изменении его температуры. Существуют два основных вида этих датчиков – металлические терморезисторы и полупроводниковые термисторы.

Типичный **терморезистор** состоит из тонкого платинового провода, намотанного на сердечник и покрытого защитным покрытием. Обычно сердечник и покрытие сделаны из стекла и керамики.

Как следует из их названия, работа терморезисторов основана на изменении сопротивления в металле, при более или менее линейной прямопропорциональной зависимости сопротивления от температуры:

$$R_{RTD} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T),$$

где  $R_{RTD}$  – сопротивление терморезистора в Омах;

$R_0$  – сопротивление терморезистора при температуре 0 °С;

$\alpha$  – температурный коэффициент (для платины  $\alpha = 0,00385$  [Ом/°С] в Европе,  $\alpha = 0,00392$  [Ом/°С] в США);

$T$  – температура в градусах Цельсия.

Графически зависимости сопротивления  $R_{RTD}$  стандартного датчика Pt100 от температуры  $T$  представлены на рис. 2. При этом можно видеть, что принятые как промышленный стандарт датчики имеют сопротивление  $100 \Omega$  при  $0^\circ\text{C}$ . При этом среднее значение наклона зависимости сопротивления от температуры для терморезистора для данного датчика зависит от чистоты в нем платины и определяется температурным коэффициентом  $\alpha$ .

Наиболее часто используют терморезистор, получаемый из платины определенной чистоты и состава, со значением  $\alpha = 0,00385$ . Кроме того, существует еще один стандартный датчик, получаемый из немного другого платинового состава. У него немного большее значение  $\alpha = 0,00392$ , и он применяется в основном в США.

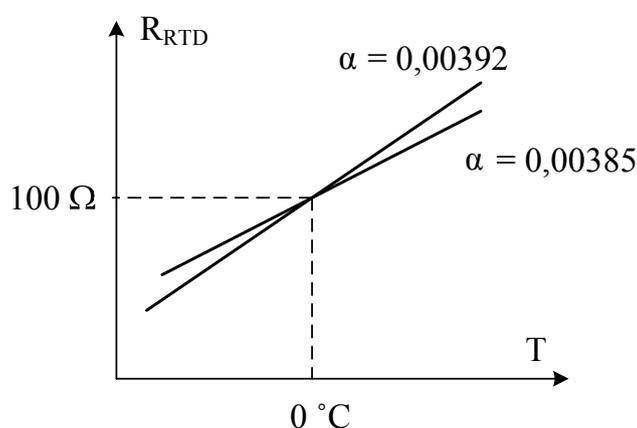


Рис. 2. Зависимости сопротивления терморезистора от температуры

**Термисторы** используют свойство изменения сопротивления керамического полупроводника при изменении температуры; его сопротивление падает нелинейно с ростом температуры:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)},$$

где  $R_T$  – сопротивление термистора при температуре  $T$  ( $^\circ\text{K}$ );

$R_0$  – сопротивление термистора при исходной температуре  $T_0$  ( $^\circ\text{K}$ );

$\beta$  – постоянная, зависящая от материала ( $^\circ\text{K}$ ). Значение  $\beta$  находится между 3000 и 4000  $^\circ\text{K}$ .

Регулировочная характеристика  $R_T = f(T)$  термистора представлена на рис. 3 и является отрицательной и существенно нелинейной. Это затрудняет использование этого датчика. Однако, эта трудность может быть устранена использованием термисторов в парах, таким образом, что нелинейности взаимно компенсируются. Более того, производители предлагают специальные устройства, которые внутренне компенсируют нелинейность характеристики термистора.

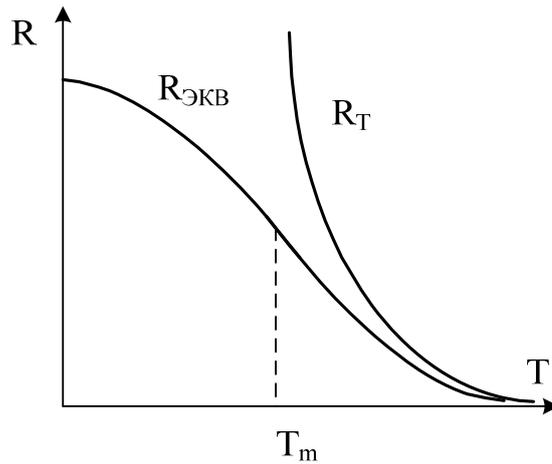


Рис. 3

Наконец, нелинейность регулировочной характеристики  $R_T = f(T)$  может быть скомпенсирована использованием параллельно включенного сопротивления со значением  $R_P$  (рис. 4).

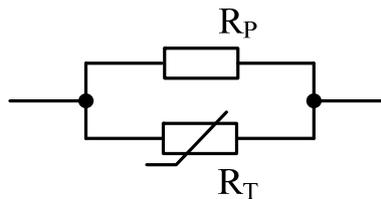


Рис. 4

Эквивалентное сопротивление  $R_{ЭКВ}$  двух параллельно включенных сопротивлений вычисляется по формуле:

$$R_{ЭКВ} = \frac{R_P \cdot R_T}{R_P + R_T}.$$

Если нужно выбрать  $R_P$  таким образом, чтобы линеаризовать кривую в окрестности рабочей температуры  $T_m$ , то следует найти значение  $R_P$  по формуле:

$$R_P = R_{T_m} \cdot \frac{\beta - 2 \cdot T_m}{\beta + 2 \cdot T_m}.$$

После линеаризации характеристика термистора будет представлять собой линейную зависимость  $R_{ЭКВ} = f(T)$  в окрестностях точки с температурой  $T_m$  (рис. 3).

Термисторы обычно обозначаются в соответствии с их сопротивлением при температуре 250 °С. Наиболее часто встречается значение 2252 Ом, среди других часто встречающихся 5000 и 10000 Ом.

### 1.3. Жидкостные и инфракрасные датчики температуры

Типичным примером **жидкостного датчика** является домашний термометр, обычно содержащий одну из двух основных жидкостей: ртуть или органическую жидкость (например, спирт). При увеличении температуры жидкая среда расширяется, а, значит, увеличивается её объём. Если поместить её в герметично закрытый сосуд, то можно наблюдать изменение объёма по изменению высоты столба жидкости. Датчики с расширяющейся жидкостью не требуют электрического питания, не представляют риска взрыва и стабильны даже после повторяющихся циклов работы. С другой стороны, они не дают данные, которые можно легко записать или передать.

Все вещества излучают электромагнитную энергию, спектр и интенсивность которой зависит от температуры. Во многих технологических процессах эта энергия излучается в инфракрасном диапазоне. **Инфракрасные датчики** являются бесконтактными и измеряют излучение поверхности тела. При увеличении температуры увеличиваются количество инфракрасного излучения и его средняя частота, которые и измеряются датчиком.

## 2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

### 2.1. Блок электронагревателя

В блок А7 (394.2) встроен электронагреватель с измерителем-регулятором температуры. Исследуемый датчик вставляется в отверстие на лицевой панели нагревателя и с помощью мультиметра измеряется его выходное напряжение или сопротивление.

Блок электронагревателя позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя в диапазоне 30...100 °С. В блоке также установлен маломощный источник +5 В для питания микросхемы датчика температуры и других устройств.

Слева от индикаторов 3 и 4 (рис. 4) на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода:

- К1 – включен при нагреве;
- К2 – не используется;
- AL – индикатор превышения предельных значений;
- RS – индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования (см. ниже) прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

## 2.2. Задание температуры электронагревателя

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2 (рис. 5). Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

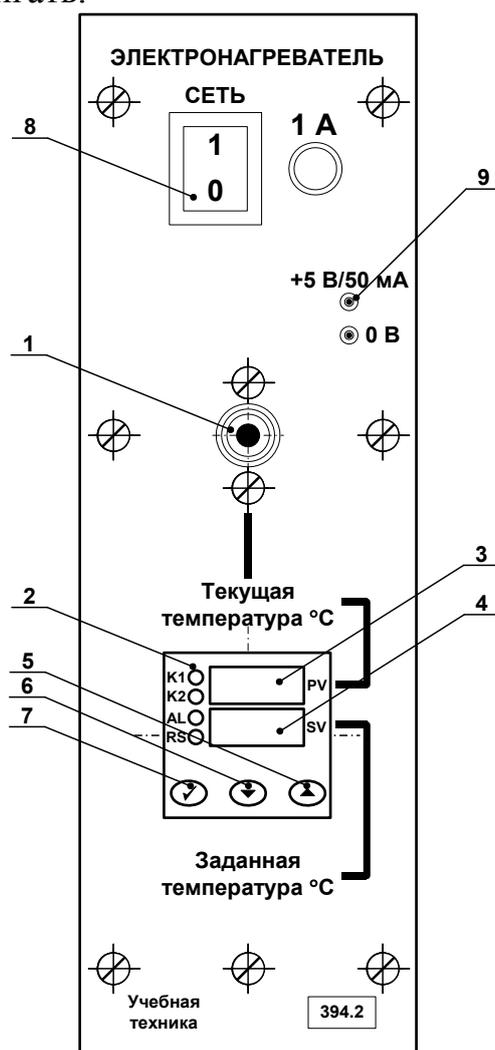


Рис. 5. Лицевая панель блока электронагревателя (394.2):

1 – отверстие нагревателя; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV); 4 – индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV); 5, 6, 7 – кнопки управления регулятором температуры; 8 – выключатель питания; 9 – гнезда источника питания +5 В

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7. Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10 °С выше комнатной) и постепенно повышать её величину до 100 °С, т. к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

### **2.3. Включение (отключение) режима автоматического регулирования**

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и, после этого, включить режим автоматического регулирования.

Переключение режима автоматического регулирования:

1. Однократно нажать кнопку 7 (рис. 5) регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразится надпись «r-S». На индикаторе 4 (зеленый, SV) текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 – индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP»↔«rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние – на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен – режим «rUn» (РАБОТА), выключен – «StoP» (СТОП).

Подробно режимы работы измерителя-регулятора температуры TP441 и порядок его программирования описаны в [3]. **При выполнении экспериментов любые изменения параметров регулятора температуры, кроме указанных выше, не допускаются.**

### **2.4. Схемы электрические соединений экспериментов**

Схемы электрические соединений при испытании датчиков температуры показаны на рис. 6...9.

2.4.1. Термоэлектрический преобразователь ТПК225-010.60 (термопара) подключается по схеме рис. 6. Мультиметр МУ65 измеряет напряжение термопары (предел 200 мВ постоянного тока).

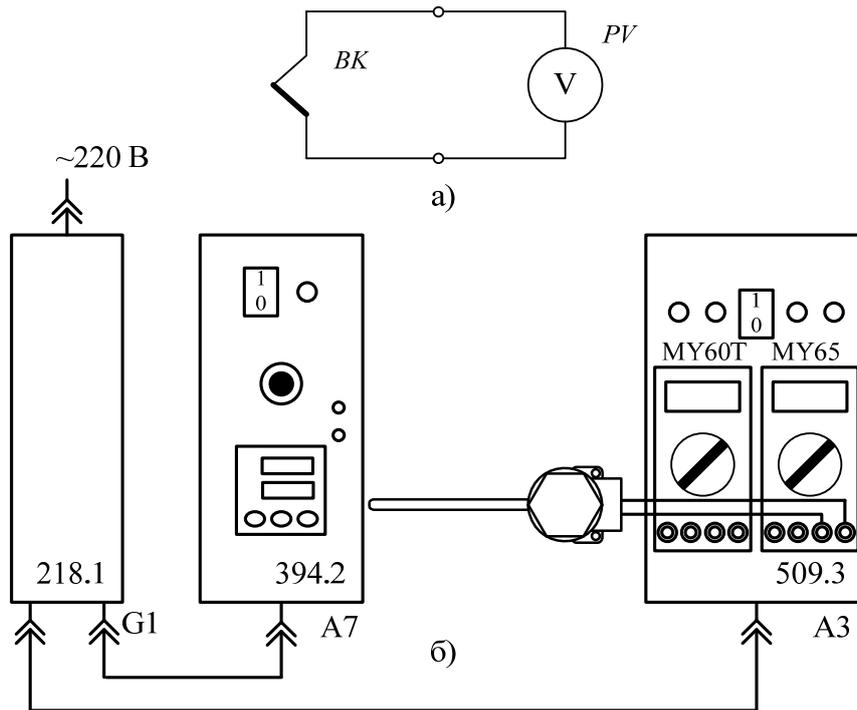


Рис. 6. Схема электрическая соединений при испытании термоэлектрического преобразователя

2.4.2. Термопреобразователь сопротивления ТС125-50М.В2.60 подключается по схеме рис. 7. Мультиметр МУ65 измеряет сопротивление термопреобразователя.

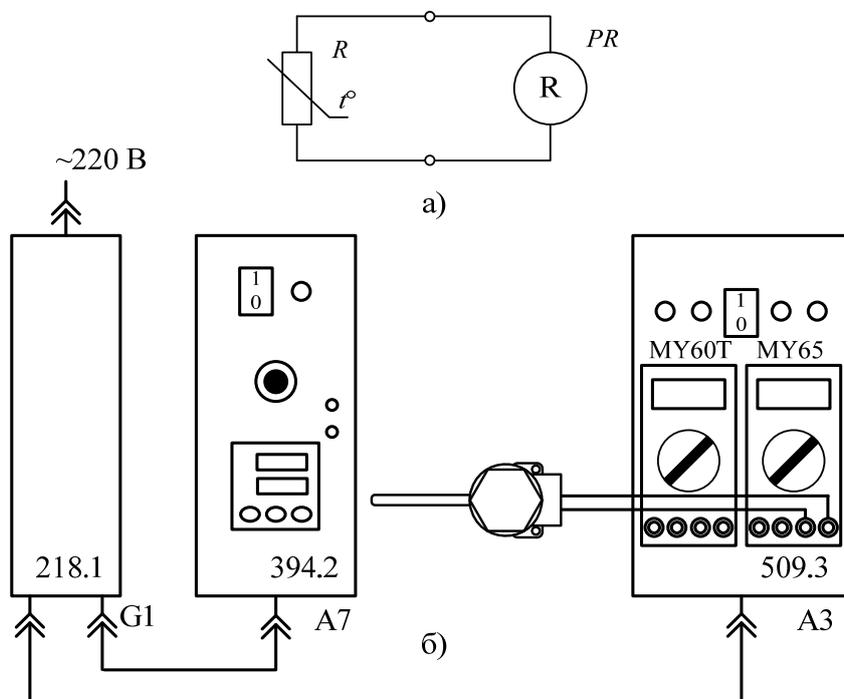


Рис. 7. Схема электрическая соединений при испытании термопреобразователя сопротивления

2.4.3. Полупроводниковый терморезистор КТ110 подключается по схеме рис. 8. Мультиметр МУ65 измеряет сопротивление терморезистора.

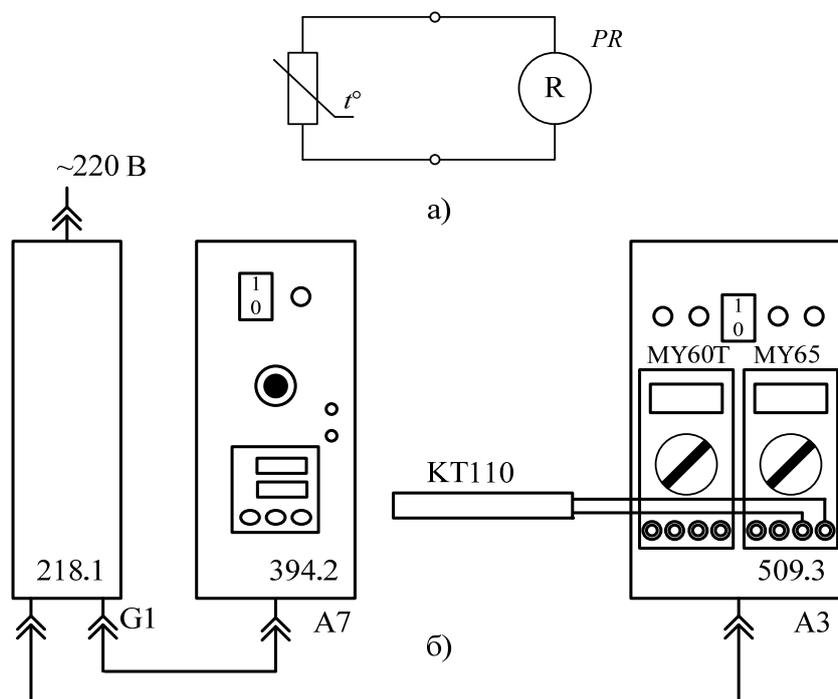


Рис. 8. Схема испытания полупроводникового терморезистора КТ110

2.4.4. Датчик температуры LM60 подключается по схеме рис. 9.

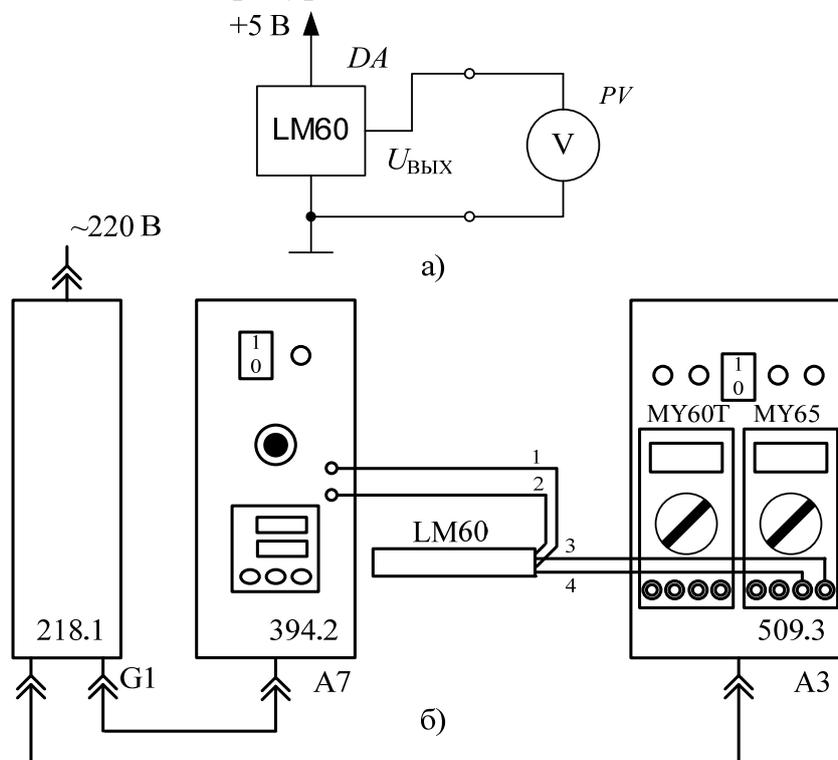


Рис. 9. Схема подключения датчика температуры LM60

Провода питания 1 (+5 В, тонкий красный) и 2 (0 В, тонкий синий) подключаются к соответствующим гнездам источника питания («+5 В» и «0 В») на лицевой панели электронагревателя А7 (394.2). Выходное напряжение датчика (черный толстый провод 3 – выход, синий толстый провод 4 – 0 В) подключаются к гнездам измерения напряжения мультиметра МУ65. Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блоков А3, А7.

### 3. ПРОГРАММА РАБОТЫ

3.1. Проверьте схему электропитания блоков А7, А3 и G1. Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.

3.2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений рис. 6...9 в зависимости от типа испытываемого датчика.

3.3. Узнайте у преподавателя значения температуры, при которых Вы будете измерять сигналы датчиков. Из-за инерционности нагревателя целесообразно выбрать не более 5...7 точек в диапазоне температур от комнатной до 100 °С.

3.4. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

3.5. Включите выключатель «СЕТЬ» блоков А7 (394.2) и А3 (509.3).

3.6. При включении питания автоматический режим регулятора температуры электронагревателя выключен. Установите требуемую температуру (раздел 2). Включите автоматический режим регулятора температуры. Начнется разогрев нагревателя (включены светодиоды индикаторов К1 и RS).

3.7. **Последовательно** измерьте сигналы датчиков при комнатной температуре (схемы рис. 6...9). Для исключения нагрева датчиков от рук их необходимо брать за корпус вблизи выводов. Из-за равенства температур «холодного» и «горячего» спаев термоэлектрического преобразователя (термопары) его ЭДС равна 0, а показания мультиметра, измеряющего эту ЭДС могут быть нестабильны.

3.8. После стабилизации температуры нагревателя вблизи заданного значения поочередно вставьте каждый из датчиков в отверстие нагревателя до упора. Выждите 2...3 минуты для стабилизации температуры и измерьте выходной сигнал датчика.

3.9. Задайте следующее значение температуры, дождитесь её стабилизации и повторите измерения сигналов датчиков. При высоких температурах датчиков будьте осторожны: не касайтесь рабочей части датчика, извлеченного из нагревателя.

3.10. Результаты измерения занесите в табл. 2.

Таблица 2

$T, ^\circ\text{C}$		комн.	35	45	...	85
$T_T, ^\circ\text{C}$						
$E_{\text{ТПК225}}$	мВ					
$E'_{\text{ТПК225}}$	мВ					
$E_{\text{ТПК225}_T}$	мВ					
$\delta_{\text{ТПК225}}$	%					
$R_{\text{ТС125}}$	Ом					
$R_{\text{ТС125}_T}$	Ом					
$\delta_{\text{ТС125}}$	%					
$R_{\text{КТ110}}$	Ом					
$R_{\text{КТ110}_T}$	Ом					
$\delta_{\text{КТ110}}$	%					
$U_{\text{LM60}}$	мВ					
$U_{\text{LM60}_T}$	мВ					
$\delta_{\text{LM60}}$	%					

3.11. По завершении измерений отключить питание всех блоков.

3.12. Рассчитать теоретические значения выходных напряжений, а также погрешностей.

3.12.1. Измеренные в эксперименте значения термоэлектродвижущей силы преобразователя ТПК225-010.60 (термопары ХА, хромель-алюмель) необходимо привести к нормальным условиям – температуре холодного спая  $0^\circ\text{C}$ . Для этого добавьте к измеренному значению величину термо-ЭДС холодного спая:

$$E'_{\text{ТПК225}} = E_{\text{ТПК225}} + E_0,$$

где  $E_{\text{ТПК225}}$  – экспериментально полученное значение термо-ЭДС;

$E_0$  – термо-ЭДС холодного спая термопары из приведенной ниже табл. 3.

Температуру холодного спая (окружающей среды) можно вычислить с использованием сопротивления термопреобразователя ТС125-50М.В2.60. Сравните полученные значения  $E'_{\text{ТПК225}}$  со стандартной характеристикой термопары ХА из табл. 3.

Теоретическое значение выходного напряжения для термоэлектрического преобразователя ТПК225-010.60 определите по формуле:

$$E_{\text{ТПК225}_T} = \alpha_1 \cdot \Delta T = \alpha_1 \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент пропорциональности или термоэлектрическая чувствительность (из табл. 1);

Таблица 3

## Характеристика термопары ХА

Температура горячего спаея, °С	Термо-ЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055

$\Delta T$  – разность температур горячего и холодного спаев;

$T$  – температура горячего спаея;

$T_0$  – температура холодного спаея.

Погрешность измерения для термопары вычисляется по формуле

$$\delta_{\text{ТПК225}} = \frac{E_{\text{ТПК225}_T} - E_{\text{ТПК225}}}{E_{\text{ТПК225}_T}} \cdot 100\%.$$

3.12.2. Теоретическое значение выходного напряжения для датчика LM60 в милливольтгах определяется по формуле:

$$U_{LM60_T} = 6.25 \cdot T + 424, \quad (2)$$

где  $T$  – температура датчика в градусах Цельсия.

Погрешность измерения датчика LM60 вычисляется по формуле:

$$\delta_{LM60} = \frac{U_{LM60_T} - U_{LM60}}{U_{LM60_T}} \cdot 100\%$$

3.12.3. Теоретическое значение сопротивления термистора (полупроводникового терморезистора КТ110) определяется по формуле:

$$R_{KT110\_T} = R_{25} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T^2), \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,00788 \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta = 0,00001937 \text{ K}^{-2}$  – коэффициенты датчика;

$R_{25} = 2 \text{ кОм}$  – номинальное сопротивление датчика при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Погрешности измерения термистора и терморезистора вычисляются по формуле:

$$\delta_{KT,TC} = \frac{R_{TC,KT\_T} - R_{TC,KT}}{R_{TC,KT}} \cdot 100 \%$$

3.12.4. Теоретическое значение сопротивления термопреобразователя сопротивления ТС125-50М.В2.60 определяется по формуле:

$$R_{TC125\_T} = R_0 \cdot (1 + \alpha_M \cdot T), \quad (4)$$

где  $\alpha_M = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/^\circ\text{C}$  – температурный коэффициент меди;

$R_0 = 50 \text{ Ом}$  – сопротивление датчика при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

3.13. Для одного из датчиков по указанию преподавателя рассчитать измеренную датчиком температуру  $T_T, \text{ }^\circ\text{C}$ , выразив ее из формул (1)...(4).

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Зарисовать исследуемые схемы и привести табл. 1 и 2.

4.2. По данным табл. 2 построить все экспериментальные и теоретические зависимости датчиков  $E = f(T)$ ,  $U = f(T)$ ,  $R = f(T)$  попарно в одних осях.

4.3. Рассчитать чувствительность термопары и термодатчика LM60 по экспериментальным данным по формуле  $S_T = \frac{\Delta E}{\Delta T}$ , где  $\Delta T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4.4. Рассчитать чувствительности терморезистора и термистора по экспериментальным данным по формуле  $S_R = \frac{\Delta R}{\Delta T}$ , где  $\Delta T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и сравнить их между собой.

4.5. Ответить на контрольные вопросы.

4.6. Сделать выводы по работе, в частности, сравнить различные датчики по чувствительности, линейности характеристики, диапазону работы, и т. п., предложить в связи с этим варианты использования исследованных схем.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Чем определяется ЭДС термопары? Каковы требования к окружающей среде?

5.2. По каким характеристикам выбирается тип термопары?

5.3. Как определить температуру с помощью терморезистора?

5.4. Проанализировать регулировочную характеристику термистора. Каким образом можно сделать её более линейной?

5.5. Сравнить между собой термопару, терморезистор и термистор и выделить их основные достоинства и недостатки.

5.6. Какие еще датчики пригодны для контроля температуры? Дать краткую характеристику.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – СПб: КОРОНА принт, 1998. – 400 с.
2. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
3. Измерители-регуляторы температуры ТР440 и ТР441. Руководство по эксплуатации. ТАЛС.405111.040 РЭ. *Файл TR440\_TR441\_doc\_020607.pdf.*

## Приложение

### Правила выполнения лабораторных работ

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прослушавшие соответствующую часть лекционного курса.

2. Работа в лаборатории выполняется бригадами по 2–3 человека на рабочем месте. Отчет оформляется общий на бригаду.

3. К выполнению каждой работы студенты должны готовиться предварительно до лабораторного занятия, ознакомившись с описанием работы и проработав соответствующие теоретические вопросы.

4. Преподаватель проверяет готовность студентов к выполнению работы. Студенты, показавшие неподготовленность, к выполнению работы не допускаются.

5. Четырехчасовые лабораторные работы выполняются за два двухчасовых занятия. Отчет представляется после выполнения всей работы.

6. Студенты могут включить лабораторный стенд, только получив разрешение преподавателя. Студенты, включившие стенд без разрешения преподавателя, в случае выхода из строя оборудования несут материальную ответственность за повреждения.

7. После окончания экспериментальной части работы студенты, не выключая стенда, проводят необходимые расчеты и предъявляют их преподавателю для проверки правильности полученных результатов. Если какие-либо результаты наблюдений вызывают сомнения руководителя, то эти наблюдения должны быть повторены.

8. На основании своих протоколов студенты производят обработку результатов наблюдений, т. е. выполняют расчеты, строят графики и диаграммы и оформляют отчет по работе согласно требованиям программы работы.

9. Правила оформления отчетов (текста, рисунков, графиков, формул) даны в стандарте СТО ТПУ 2.5.01-2006. Отчеты, оформленные не в соответствии с данным стандартом, возвращаются на доработку.

10. Рекомендуется производить оформление отчета возможно скорее после выполнения экспериментальной части. Оформленные отчеты по работе представляются преподавателю на проверку в день выполнения очередной работы.

11. Отчеты защищаются студентами после окончания цикла лабораторных работ.

## **Пример оформления титульного листа отчета по лабораторной работе**

Министерство образования и науки РФ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Институт      Энергетический  
Направление Электротехника, электромеханика, электротехнологии  
Кафедра      Электропривода и электрооборудования

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА**

Отчёт по лабораторной работе № 1  
по дисциплине «Элементы систем автоматики»

Исполнители

студенты гр. 7А86

(подпись)  
(подпись)  
(дата)

Иванов И.И.  
Петров П.П.

Руководитель:

доцент, канд. техн. наук

(подпись)  
(дата)

Александров А.А.

Томск 2011 г.

## Пример оформления рисунков, формул и таблиц в отчете по лабораторной работе

Правила оформления отчетов (текста, рисунков, графиков, формул) даны в стандарте СТО ТПУ 2.5.01-2006. Отчеты, оформленные не в соответствии с данным стандартом, возвращаются на доработку.

Результаты исследования приведены на рисунке 1.

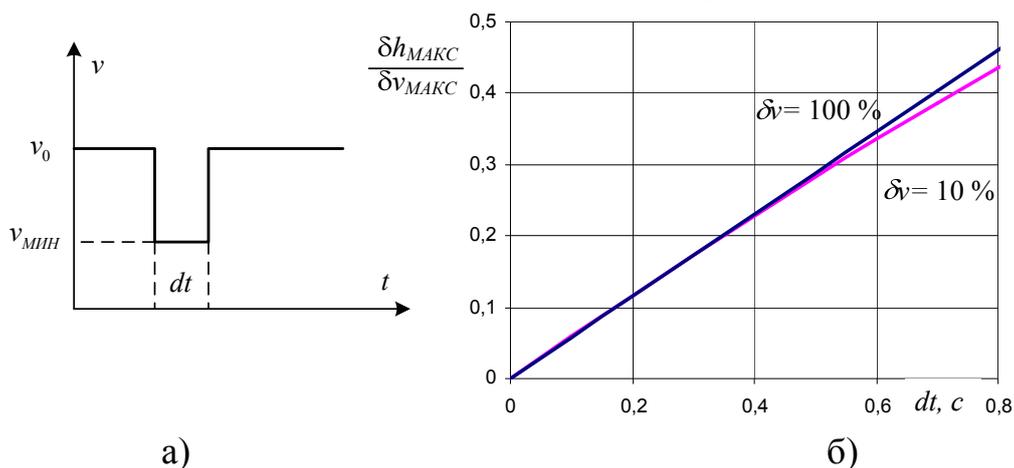


Рисунок 1 – Зависимость отношения  $\delta h_{\text{МАКС}} / \delta v_{\text{МАКС}}$  от времени провала скорости  $dt$  (б) при заданной форме кривой скорости (а)

Скорость движения объекта описывается следующим законом:

$$v(t) = v_0 + \Delta v_{\text{МАКС}} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где  $\Delta v_{\text{МАКС}}$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  – амплитуда, угловая частота и фаза гармонической составляющей скорости;

$v_0$  – постоянная составляющая скорости движения.

Результаты экспериментальных исследований зависимости напряжений тахогенератора  $U_{BR}$  скорости вращения  $n$  от напряжения на якоре двигателя  $U_{\text{Я}}$  приведены в таблице 5.

Таблица 5

$U_{\text{Я}}, \text{В}$	-20	-15	-10	-5	-1	0	1	5	10	15	20
$U_{BR}, \text{В}$											
$U_{BR\Gamma}, \text{В}$											
$\delta, \%$											
$n, \text{об/мин}$											

Учебное издание

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

## ЧАСТЬ 1

*Составители*

САПОЖНИКОВ Алексей Иванович  
НЕЧАЕВ Михаил Анатольевич  
ОБРАЗЦОВ Константин Валентинович

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор  
*кандидат технических наук, доцент А.Ю. Чернышев*

*Дизайн обложки А.И. Сидоренко*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 25.12.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 6,10.

Заказ 1518-12. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru