

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**С. И. Мадвейко, Г. П. Будько, А. В. Чураков**

## **ЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ И КОМПОНЕНТЫ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальностей  
1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические системы»,  
1-39 02 02 «Проектирование и производство программно-управляемых  
электронных средств»*

Минск БГУИР 2019

УДК 681.586(076.5)  
ББК 32.96-04я73  
М13

**Рецензенты:**

кафедра энергетики и электронной техники учреждения образования  
«Полоцкий государственный университет»  
(протокол №10 от 17.01.2018);

доцент кафедры конструирования и производства приборов  
Белорусского национального технического университета  
кандидат технических наук, доцент А. Л. Савченко

**Мадвейко, С. И.**

М13       Электронные датчики и компоненты. Лабораторный практикум : по-  
сobie / С. И. Мадвейко, Г. П. Будько, А. В. Чураков. – Минск : БГУИР,  
2019. – 79 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-436-9.

Содержит пять лабораторных работ по изучению основных параметров потен-  
циометрических преобразователей, работающих в составе автоматизированного обо-  
рудования, принципов работы импульсных датчиков положения, ультразвуковых дат-  
чиков измерения расстояния, основных характеристик индуктивных преобразовате-  
лей, методов измерения температуры на основе аналоговых сигналов при помощи  
операционных усилителей.

Предназначено для закрепления и углубления теоретической знаний, приобре-  
тения практических навыков работы с электронными датчиками и компонентами в со-  
ставе автоматизированного оборудования.

**УДК 681.586(076.5)**  
**ББК 32.96-04я73**

**ISBN 978-985-543-436-9**

© Мадвейко С. И., Будько Г. П.,  
Чураков А. В., 2019  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2019

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Цель работы: изучить теорию потенциометрических (реостатных) преобразователей; изучить методы определения основных параметров потенциометрических преобразователей.

#### 1.1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1.1. Потенциометрический преобразователь

*Потенциометрический преобразователь* – прибор, состоящий из подвижного элемента (щетки), перемещающегося по активному сопротивлению. Этот прибор является параметрическим датчиком и может быть использован в качестве измерителя линейного и углового перемещений (рис. 1.1).

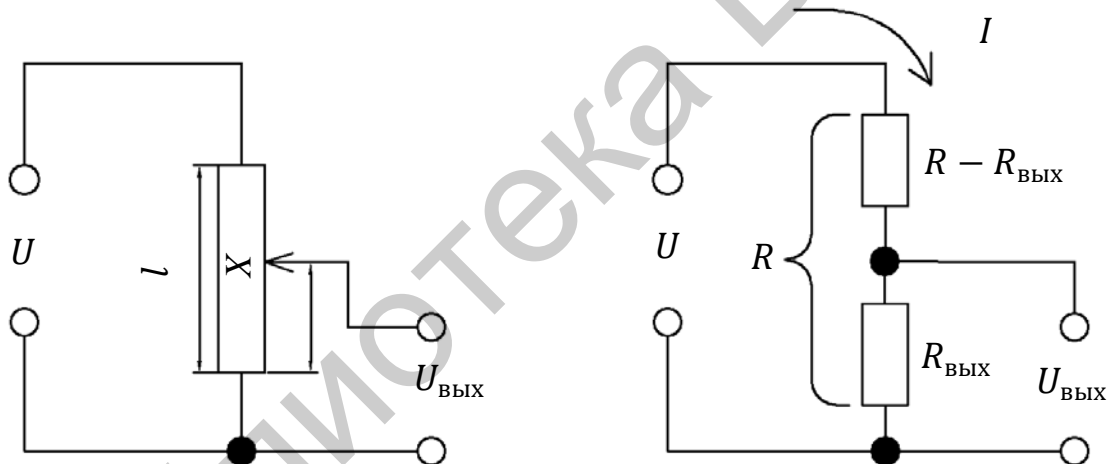


Рис. 1.1. Схема потенциометрического датчика

Если сопротивление всей обмотки датчика обозначить через  $R$ , а сопротивление части этой обмотки, с которой снимается выходное напряжение, через  $R_{\text{ВЫХ}}$ , то потенциометрическая схема включения датчика может быть представлена как последовательное соединение резисторов с сопротивлением  $R_{\text{ВЫХ}}$  и  $(R - R_{\text{ВЫХ}})$  (см. рис. 1.1). Ток через обмотку датчика определяется по формуле  $I = U/R$ , а приложенное напряжение распределяется (делится) между последовательно соединенными резисторами согласно выражению

$$U = IR_{\text{ВЫХ}} + I(R - R_{\text{ВЫХ}}).$$

Если сопротивление обмотки равномерно распределить по длине  $l$ , а перемещение движка обозначить через  $x$ , то выходное напряжение датчика определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = IR_{\text{ВЫХ}} = Ux/l.$$

Таким образом, выходной сигнал датчика пропорционален перемещению движка.

Конструктивно чаще всего потенциметрический преобразователь выполнен в виде непрерывной катушки, питающее напряжение подается на катушку, а выходной сигнал снимается со щеток (рис. 1.2).

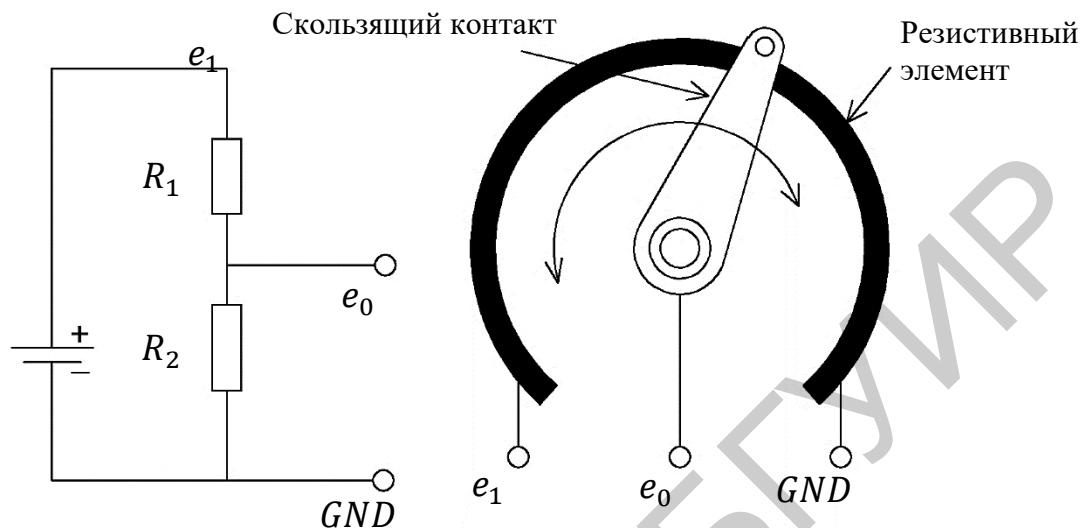


Рис. 1.2. Потенциметрический датчик

*Типы перемещений, преобразуемых потенциметрическими датчиками:*

- угловые;
- линейные.

*Достоинства потенциметрического датчика:*

- высокая точность;
- высокая стабильность функции преобразования;
- малое значение переходного сопротивления;
- малые габариты и вес;
- простота конструкции;
- небольшой коэффициент сопротивления.

*Недостатки потенциметрического датчика:*

- ограниченные возможности при использовании переменного тока (не более 1 кГц);
- наличие шумов;
- подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов;
- наличие скользящего контакта (приводит к ограниченному количеству рабочих циклов датчика).

### 1.1.2. Классификация потенциметрических преобразователей

Потенциметрические датчики классифицируются:

- 1) по диапазону перемещения подвижного контакта:
  - а) с ограниченным перемещением;

б) с неограниченным перемещением, т. е. более  $360^\circ$  (спиральные винтовые потенциометры);

2) по способу включения:

- а) реостатные;
- б) ненагруженные делители;
- в) нагруженные делители;

3) по характеру воспроизведения функций:

- а) линейные;
- б) функциональные.

Потенциометры, применяемые в системах автоматического регулирования, могут быть подразделены на следующие классы точности:

- 0,01–0,02 – высокоточные, имеют погрешность не более 0,02 %;
- 0,05 – повышенной точности, имеют погрешность 0,05 %;
- 0,1 – средней точности, имеют погрешность 0,1 %;
- 0,2 – нормальной точности, имеют погрешность 0,2 %.

По способу выполнения сопротивления потенциометрические датчики делятся на следующие:

- ламельные с постоянными сопротивлениями;
- проволочные с непрерывной намоткой;
- с резистивным слоем (пленочные).

В ламельных потенциометрах используются постоянные сопротивления, припаиваемые к ламелям (рис. 1.3). При движении токоъемника по контактным ламелям сопротивление меняется. В таких потенциометрах изменение сопротивления может происходить в широких пределах.

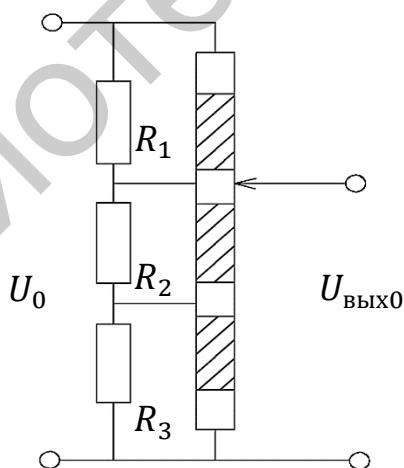


Рис. 1.3. Ламельный потенциометр

В потенциометрах непрерывной намотки переменным сопротивлением служит намотанная на каркас в один ряд тонкая проволока. Сопротивление таких потенциометров лежит в пределах от нескольких десятков ом до десятков килоом.

Из-за того что щетка выполняется из упругих материалов, при перемещении по обмотке потенциометра ее изогнутый конец касается следующего витка раньше, чем сходит с предыдущего (рис. 1.4).

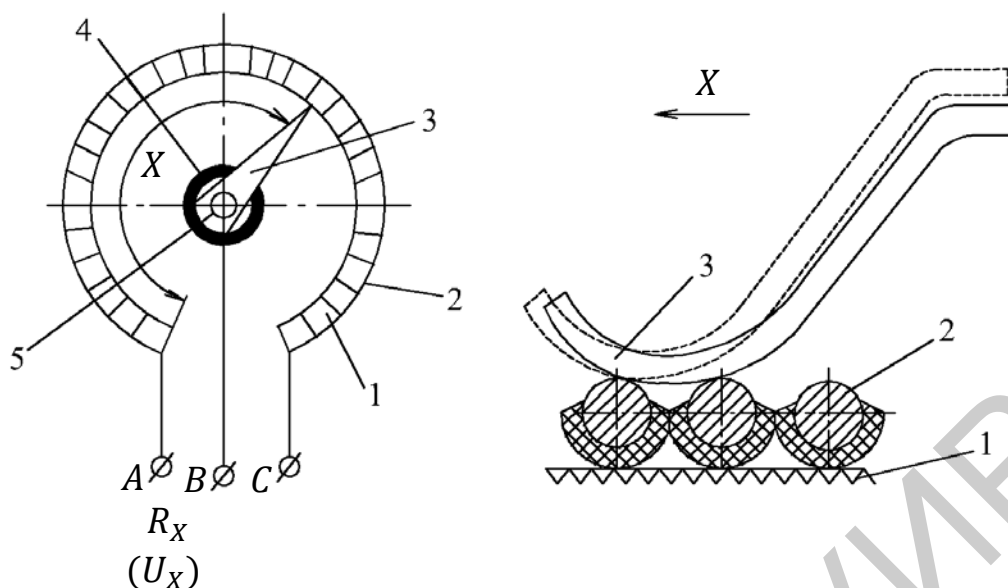


Рис. 1.4. Схема преобразователя и схема перемещения щетки по обмотке преобразователя:

- 1 – каркас; 2 – витки изолированного провода; 3 – щетка; 4 – токосъемное кольцо; 5 – ось вращения щетки

Вследствие этого в момент перехода с витка на виток контакт не нарушается и каждому положению щетки  $X$  соответствует сопротивление  $R_X$  между одним из крайних зажимов (например,  $A$ ) и средним зажимом  $B$ , соединенным с токосъемным кольцом 4, по которому скользит щетка 3. Полное сопротивление потенциметрического преобразователя равно

$$R_0 = \frac{4 \cdot \rho \cdot l_B \cdot w}{\pi \cdot d^2},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;

$l_B$  – средняя длина витка;

$w$  – число витков;

$d$  – диаметр провода.

В потенциометрах с резистивным слоем (рис. 1.5) переменным сопротивлением служит резистивный слой (пленка, пластинка), нанесенный непрерывной дорожкой, по которой движется щетка.

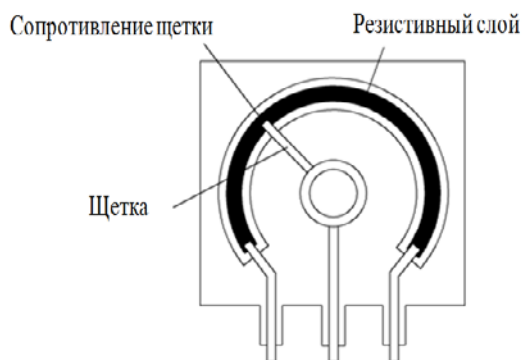


Рис. 1.5. Потенциометр с резистивным слоем

В системах автоматического регулирования используются реверсивные потенциометрические датчики. Выходное напряжение таких датчиков изменяет знак (полярность) при изменении знака входного сигнала.

Схемы реверсивных потенциометрических датчиков показаны на рис. 1.6. На рис. 1.6, *а* изображена схема использования потенциометра с неподвижным выводом от средней точки катушки. Выходное напряжение снимается с движка и средней точки. При переходе движка через среднюю точку выходное напряжение изменяет свой знак: при питании переменным током фаза изменяется на  $180^\circ$ , а при питании постоянным током полярность изменяется на противоположную.

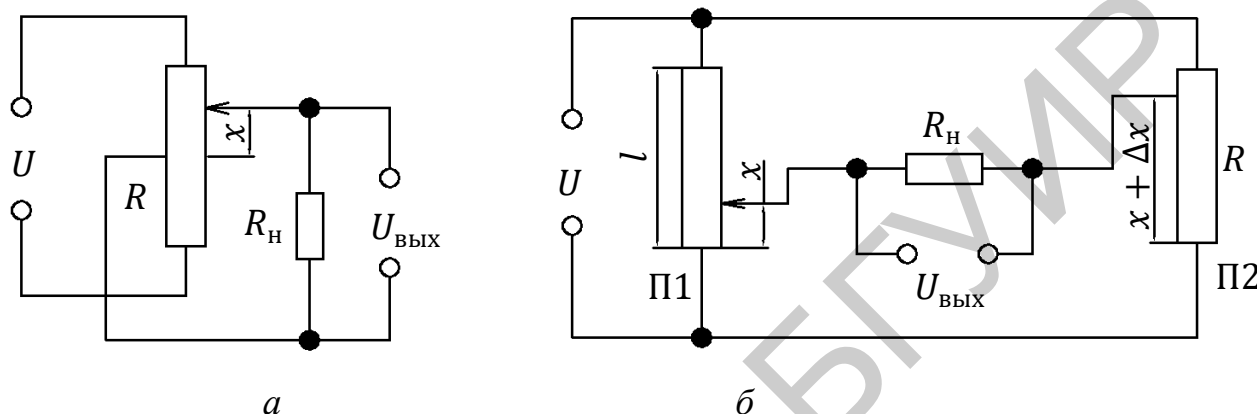


Рис. 1.6. Реверсивные схемы потенциометрических датчиков:

*а* – потенциометр с неподвижным выводом от средней точки катушки;  
*б* – мостовая схема включения

В следящих системах широко используется мостовая схема включения потенциометрических датчиков, изображенная на рис. 1.6, *б*. Потенциометр П1 связан с входной осью следящей системы и является задающим. Потенциометр П2 имеет механическую связь с исполнительным устройством. Выходное напряжение (или ток нагрузки) определяется разницей в положении движков потенциометров П1 и П2, т. е. соответствует сигналу ошибки следящей системы. Знак сигнала ошибки зависит от того, больше или меньше угол поворота исполнительной оси по сравнению с углом поворота входной оси.

### 1.1.3. Характеристики потенциометрических преобразователей

Основными эксплуатационными характеристиками потенциометров являются:

- статическая характеристика и статическая чувствительность;
- номинальное сопротивление;
- минимальное сопротивление;
- номинальная мощность рассеивания;
- уровень собственных шумов;
- предельное рабочее напряжение;
- износостойчивость и вибропрочность;

– стабильность величины сопротивления.

Статическая характеристика определяет функциональную зависимость выходного напряжения потенциометра от перемещения его движка (рис. 1.7).

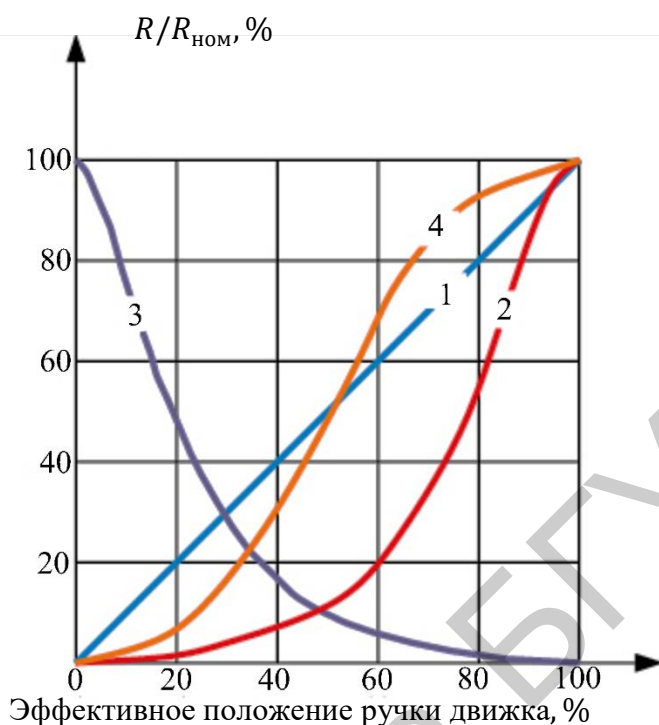


Рис. 1.7. Типы характеристик изменения сопротивления переменных резисторов:

- 1 – линейная; 2 – логарифмическая;  
3 – обратная логарифмическая; 4 – типа «S»

*Статическая чувствительность* характеризуется крутизной статической характеристики и определяется как приращение напряжения на единицу линейного или углового перемещения щетки.

*Номинальное сопротивление* – полное сопротивление резистора на постоянном токе между основными выводами при крайнем максимальном положении движка (потенциометр выведен на максимальное значение).

*Минимальное сопротивление* – минимальное сопротивление резистора на постоянном токе между основными выводами при крайнем минимальном положении движка (потенциометр выведен на минимальное значение).

*Номинальная мощность рассеивания* определяется максимально допустимой мощностью, длительно рассеиваемой на сопротивлении потенциометра без нарушения его нормальной работы.

*Уровень собственных шумов* оценивают по величине ложного сигнала, появляющегося на выходе потенциометра вследствие мгновенных нарушений контакта, возникающих при больших скоростях перемещения или вибрации щетки.

*Предельное рабочее напряжение* характеризует максимальное сопротивление, прикладываемое между выводами потенциометра.



*Износоустойчивость* определяется числом перемещений движка до нарушения нормальной работы потенциометра.

*Вибропрочность* оценивается временем, в течение которого потенциометр выдерживает колебания с заданным ускорением в заданном диапазоне частот.

#### 1.1.4. Функциональные потенциометрические преобразователи

Необходимо отметить, что в автоматике для получения нелинейных зависимостей часто используются функциональные передаточные функции. Их построение производится разными способами:

- 1) изменением диаметра проволоки вдоль катушки;
- 2) изменением шага катушки;
- 3) шунтированием участков линейных потенциометров сопротивлениями различной величины;
- 4) применением каркаса определенной конфигурации.

При применении метода шунтирования линейный реостат делится на ряд равных участков и шунтируется сопротивлениями различной величины. При этом характеристика реостата будет иметь вид ломаной линии, состоящей из прямолинейных отрезков, число которых равно числу участков (рис. 1.8).

Величина сопротивления шунта определяется по формуле

$$r_{wi} = \frac{\Delta R_a \cdot \Delta R_i}{\Delta R_a - \Delta R_i'}$$

где  $\Delta R_a$  – сопротивление  $i$ -го участка до шунтирования;

$\Delta R_i$  – требуемое сопротивление  $i$ -го участка.

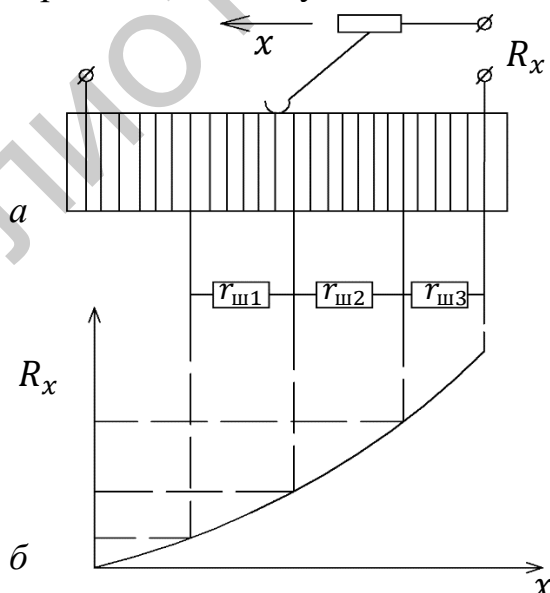


Рис. 1.8. Преобразователь с зашунтированными участками:  
а – схема; б – характеристика

Чтобы получить квадратичную зависимость с применением каркаса определенной конфигурации, нужно, чтобы ширина каркаса изменялась по линейному закону, как это показано на рис. 1.9.

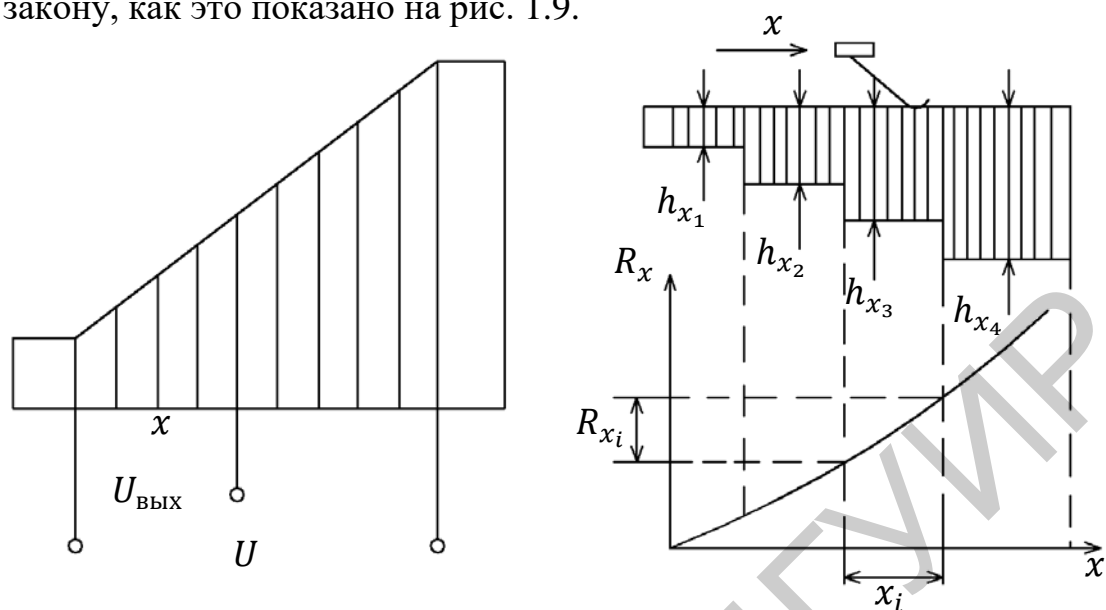


Рис. 1.9. Функциональный потенциметрический датчик

При применении каркаса переменного сечения шаг намотки постояен, а нелинейность зависимости достигается изменением длины витка  $l_{xi}$  на различных участках за счет переменной высоты  $h_{xi}$  каркаса:

$$h_{xi} = \frac{\pi \cdot R_{xi} \cdot d^2 \cdot d_{из}}{8 \cdot \rho \cdot x_i} - a,$$

где  $h_{xi}$  – высота прямоугольного каркаса (для  $i$ -го участка);

$R_{xi}$  – сопротивление  $i$ -го участка преобразователя;

$d$  – диаметр обмоточного провода без изоляции;

$d_{из}$  – диаметр обмоточного провода с изоляцией;

$\rho$  – удельное сопротивление материала провода;

$x_i$  – длина  $i$ -го участка преобразователя;

$a$  – толщина каркаса.

Обычные потенциметрические датчики имеют ограниченный диапазон работы. Его величина задана геометрическими размерами каркаса и числом витков обмотки, которые увеличивать бесконечно нельзя. Поэтому нашли применение многооборотные потенциметрические датчики (рис. 1.10).

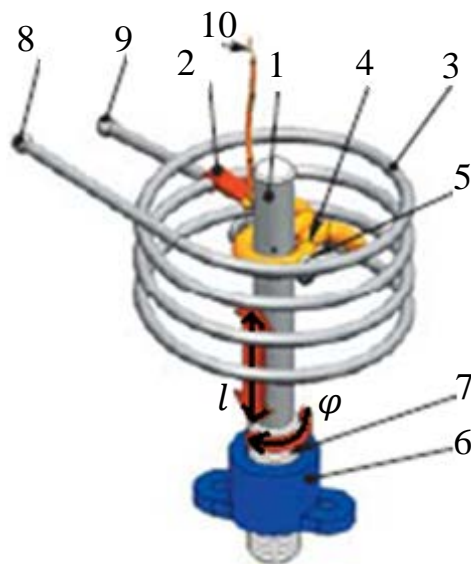


Рис. 1.10. Многооборотный проволочный потенциометр:

- 1 – линейный осевой ход вала; 2 – контактный элемент движка;  
 3 – многооборотная спиральная катушка сопротивления; 4 – движок;  
 5 – крепление движка к валу; 6 – стационарная втулка-основание; 7 – резьбовой наконечник вала для осевого перемещения вала в резьбовом отверстии втулки;  
 8–10 – терминалы устройства;  $\varphi$  – измеряемый угол поворота

У таких датчиков резистивный элемент свит по винтовой линии с несколькими витками. Их ось должна повернуться несколько раз, чтобы движок переместился с одного конца обмотки на другой, т. е. электрический диапазон таких датчиков кратен тремстам шестидесяти.

Основными достоинствами многооборотных потенциометров являются высокая разрешающая способность и точность, что достигается благодаря большой длине резистивного элемента при малых общих габаритах.

Фотопотенциометр, изображенный на рис. 1.11, представляет собой бесконтактный аналог обычного потенциометра с резистивным слоем. Но механический контакт в нем заменен фотопроводящим, что повышает надежность и срок службы. Сигналом с фотопотенциометра управляет световой зонд, выполняющий роль движка. Он формируется специальным оптическим устройством и может смещаться в результате внешнего механического воздействия вдоль фотопроводящего слоя. В месте засветки фотослоя возникает избыточная по сравнению с темновой фотопроводимость и создается электрический контакт.

Фотопотенциометры делятся по назначению на линейные и функциональные.

В *линейных фотопотенциометрах* сопротивление изменяется в прямой зависимости от угла поворота передвижного контакта.

*Функциональные фотопотенциометры* позволяют пространственное перемещение источника света преобразовать в электрический сигнал заданного функционального вида за счет профилированного резистивного слоя (гиперболические, экспоненциальные, логарифмические).

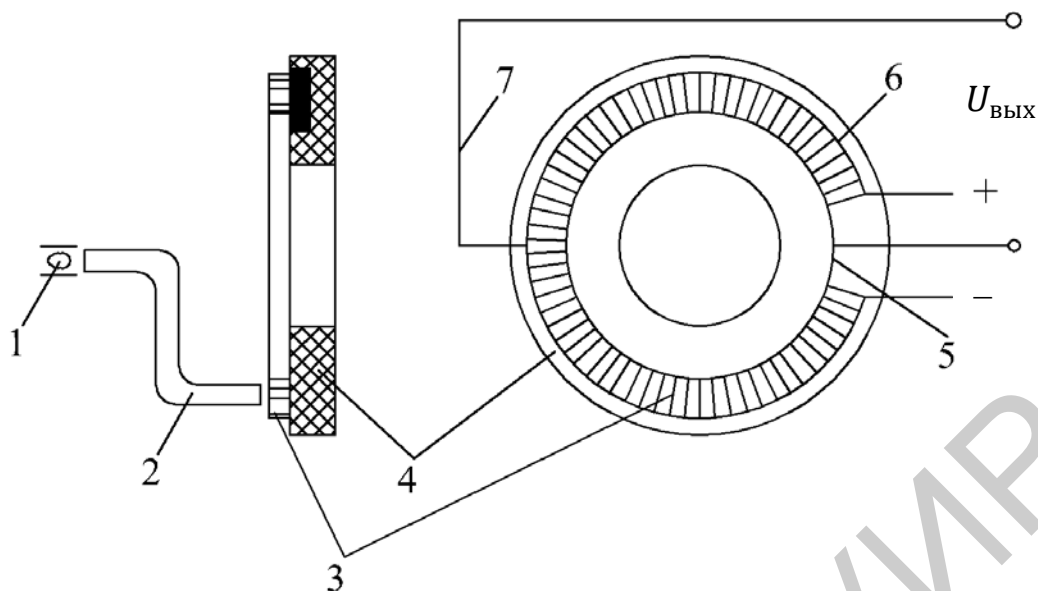


Рис. 1.11. Фотопотенциометр:

- 1 – источник света; 2 – светодиод; 3 – резистивный слой;  
 4 – изолирующая подложка; 5 – проводящий слой;  
 6 – полупроводниковый слой; 7 – средняя точка резистивного слоя

Принцип работы фотопотенциометра таков. Под действием светового потока, передаваемого от источника света 1 по светодиоду 2, в освещенном участке полупроводникового разделительного слоя образуются фотоэлектроны, в результате чего участок резистивного слоя, соответствующий положению светодиода, электрически соединяется с проводящим слоем. При повороте светодиода выходной сигнал фотопотенциометра изменяется. Реверсивность элемента достигается введением средней точки 7 резистивного слоя.

Имеются разработки жидкостных потенциометров с использованием в качестве резистивного элемента жидкости керметных потенциометров, резистивные элементы которых получают спеканием смеси стекла с порошком окиси палладия, серебра или золота с органическим пластификатором.

Также разработаны потенциометры, базирующиеся на таких физических принципах, как следующие:

- эффект Холла;
- МДП-структуры (металл – диэлектрик – полупроводник);
- электрохимические явления.

### 1.1.5. Погрешности потенциметрических преобразователей

Погрешности потенциметрических преобразователей:

#### 1. Зона нечувствительности.

При перемещении движка сопротивление включенной части потенциометра изменяется за счет конечного диаметра обмоточного провода. Вследствие этого выходное напряжение меняется ступенчато, по мере перехода

щетки от витка к витку (рис. 1.12). Таким образом, возникает зона нечувствительности, характеризующаяся тем, что при некотором незначительном перемещении движка потенциометра напряжение на выходе не изменяется, т. е. потенциометр не чувствует этого перемещения. Благодаря этому статическая характеристика потенциометрического измерительного преобразователя обладает нелинейностью типа «аналогово-цифровой преобразователь».

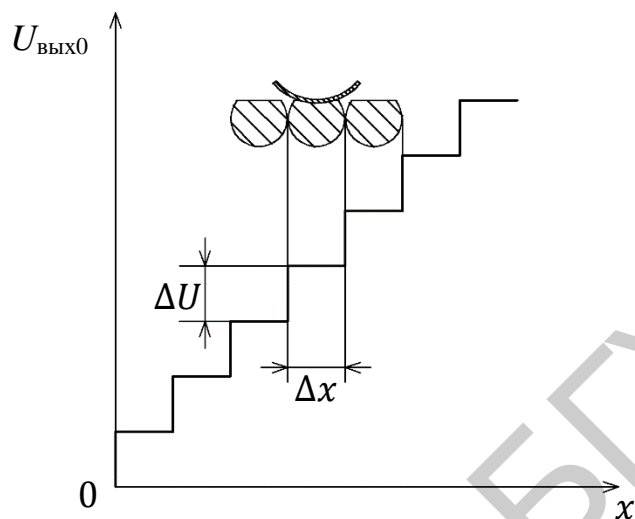


Рис. 1.12. Зона нечувствительности потенциометрического датчика

Величина скачка напряжения вычисляется по формуле

$$\Delta U = \frac{U}{W},$$

где  $W$  – число витков потенциометра.

Порог чувствительности определяется диаметром намоточного провода:

$$\Delta x = \frac{l}{W}.$$

Для уменьшения порога чувствительности необходимо увеличивать число витков при том же напряжении  $U$  и длине намотки  $l$ , что соответствует применению намоточных проводов более тонкого сечения. В этом случае характер существенной нелинейности становится менее выраженным, и с достаточной степенью точности можно пользоваться усредненной характеристикой, представляющей собой линейную зависимость.

## 2. Неравномерность статической характеристики.

Непостоянство диаметра провода по его длине, а также непостоянство удельного сопротивления и шага намотки приводят к тому, что величина скачка  $\Delta U$  и величины зоны нечувствительности  $\Delta x$  от витка к витку могут быть различны. Это является причиной неравномерности статической характеристики потенциометра. Такая погрешность может устраняться путем улучшения технологии производства намоточных проводов и самих датчиков.

### 3. Погрешность от люфта.

Люфт, возникающий между осью вращения движка и направляющей втулкой, приводит иногда к нарушению токосъема. Вследствие этого статическая характеристика может обладать неоднозначностью, параметры которой должны учитываться при анализе высокоточных систем. Для исключения нелинейности типа «люфт» и, следовательно, устранения вызванной ею погрешности применяют поджимные пружины, выбирающие люфт.

### 4. Погрешность от трения.

Если величина входного сигнала, приводящего в движение щетку потенциометра, мала, то из-за трения щетки о намотку потенциометра возникает зона застоя. При дальнейшем увеличении сигнала щетка выходит из зоны застоя, однако, это соответствует уже другому значению входной величины потенциометрического датчика, т. е. статическая характеристика соответствует нелинейности типа «зона нечувствительности». Уменьшение погрешности от трения производят путем тщательного регулирования нажима щетки.

### 5. Погрешность от влияния нагрузки.

В зависимости от характера нагрузки возникает погрешность как в статическом, так и в динамическом режимах. При активной нагрузке изменяется статическая характеристика. Величина выходного напряжения будет определяться в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{(U_r \cdot R_H)}{(R \cdot R_H + R_r - r_2)}.$$

То есть  $U_{\text{вых}} = f(r)$  зависит от  $R_H$ .

При  $R_H \gg R$  можно показать, что

$$U_{\text{вых}} = \frac{U}{R} \cdot r.$$

При  $R_H$ , приблизительно равном  $R$ , зависимость нелинейна, и максимальная погрешность датчика будет при отклонении движка на  $(2/3) \cdot l$ . Обычно выбирают  $R_H/R = 10 - 100$ .

Величина ошибки при  $x = (2/3) \cdot l$  может быть определена из выражения

$$E = \frac{4}{27} \cdot \eta,$$

где  $\eta = R_H/R$  – коэффициент нагрузки.

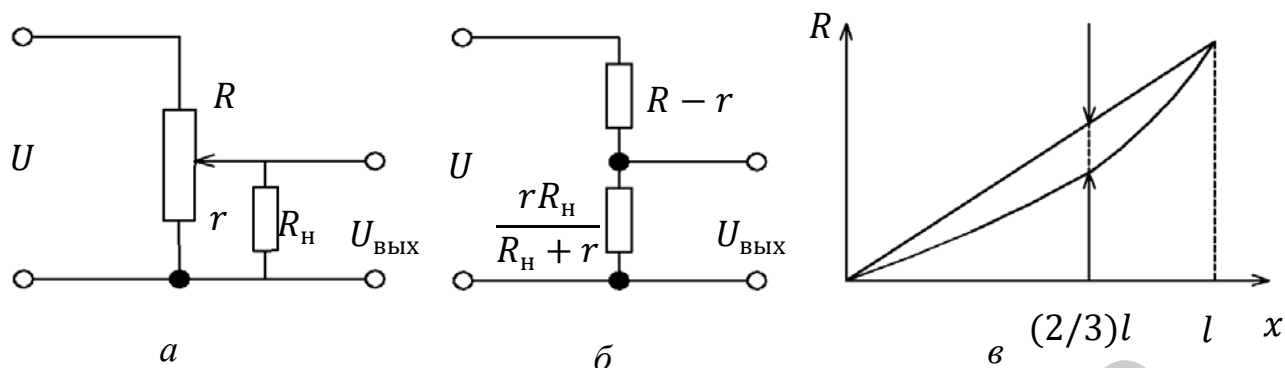


Рис. 1.13. Потенциометрический датчик:  
*a* – потенциометрический датчик под нагрузкой; *б* – эквивалентная схема потенциометрического датчика с нагрузкой; *в* – влияние нагрузки на статическую характеристику потенциометрического датчика

## 1.2. Практическая часть

Оборудование: лабораторный стенд, мультиметр.

### 1.2.1. Исследование однотактного потенциометрического преобразователя

1. Используя мультиметр, измерить полное сопротивление потенциометрического преобразователя  $C_2$ , сопротивления нагрузок  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$  (рис. 1.14). Результаты занести в табл. 1.1. Учесть, что потенциометры  $C_1$  и  $C_2$  закреплены на одной оси и электрически включены встречно.

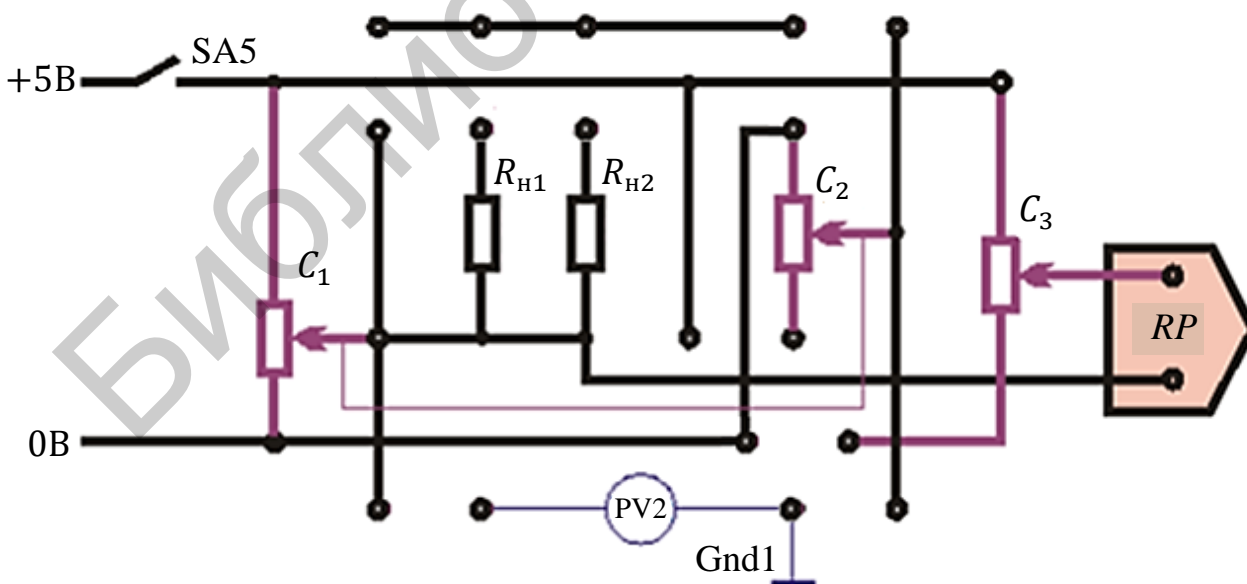


Рис. 1.14. Схема однотактного потенциометрического преобразователя для первого опыта

Здесь резистор  $R_{H1}$ :  $R = 510 \text{ Ом}$ ,  $P = 2 \text{ Вт}$ ; резистор  $R_{H2}$ :  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $P = 2 \text{ Вт}$ .  $RP$  на схеме (см. рис. 1.14) – выход, который отвечает за рассогласование угла.

Таблица 1.1  
Результаты измерений  $C_2$ ,  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$

Параметр	$R$ , кОм
$C_2$	
$R_{H1}$	
$R_{H2}$	

2. Вращая ручку потенциометра  $C_2$ , снять зависимость  $R_{C_2} = f(\varphi)$ . Результаты занести в табл. 1.2, построить график  $R = f(\varphi)$ . Мультиметр подключать к контактам 0В и среднему выводу  $C_2$ .

Таблица 1.2  
Результаты измерений  $R_{C_2}$

№ п/п	$\varphi$ , °	$R_{C_2}$ , кОм
1	0	
2	30	
...	...	...
10	270	

3. Собрать схему, как показано на рис. 1.15.

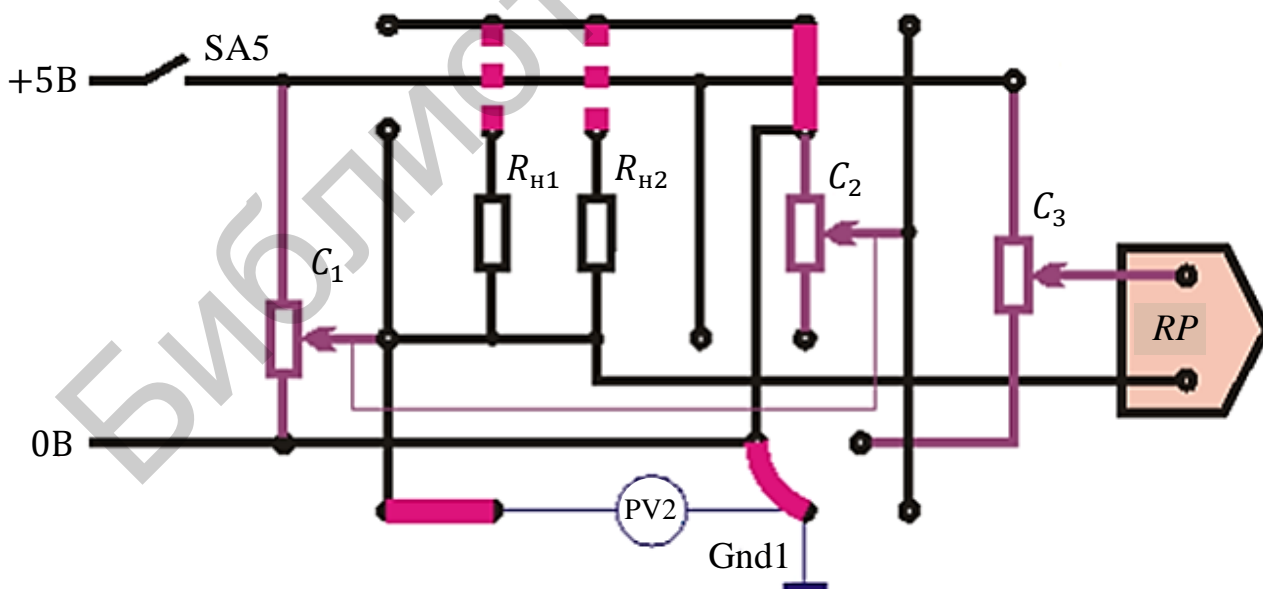


Рис. 1.15. Схема однопотенциметрического преобразователя для второго опыта

Здесь резистор  $R_{H1}$ :  $R = 510 \text{ Ом}$ ,  $P = 2 \text{ Вт}$ ; резистор  $R_{H2}$ :  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $P = 2 \text{ Вт}$ .



4. Убедиться, что схема собрана правильно:
  - присутствуют только необходимые переключки;
  - тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении «Выключено»;
  - регуляторы R21, R22 установлены в крайнее левое положение;
  - если используются измерительные приборы, то тумблеры SA10, SA11 установлены в положение «Измерение».
5. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
6. Включить переключатель SA5.
7. Плавно перемещая ручки потенциометров  $C_1, C_2$ , снять статическую характеристику  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$  в режиме холостого хода. Данные занести в табл. 1.3.
8. Плавно перемещая ручки потенциометров  $C_1, C_2$ , снять статическую характеристику  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$  при подключении нагрузки  $R_{\text{Н2}}, R_{\text{Н1}}$  поочередно. Данные занести в табл. 1.3, построить графики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$ .

Таблица 1.3

Результаты измерений  $U_{\text{ВЫХ}}$  для однотактного потенциометрического преобразователя

$\varphi, ^\circ$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (х.х)}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (R}_{\text{Н2}})$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (R}_{\text{Н1}})$
0			
30			
...	...	...	...
270			

9. Выключить переключатель SA5.
10. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).
11. Разобрать схему.

### 1.2.2. Исследование мостовой потенциометрической схемы

1. Собрать схему, как показано на рис. 1.16.  
Здесь резистор  $R_{\text{Н1}}: R = 510 \text{ Ом}, P = 2 \text{ Вт}$ ; резистор  $R_{\text{Н2}}: R = 1 \text{ кОм}, P = 2 \text{ Вт}$ .
2. Убедиться, что схема собрана правильно:
  - присутствуют только необходимые переключки;
  - тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении «Выключено».
  - регуляторы R21, R22 установить в вертикальное положение.
 Если используются измерительные приборы, то тумблеры SA10, SA11 установить в положение «Измерение».
3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).
4. Включить переключатель SA5.

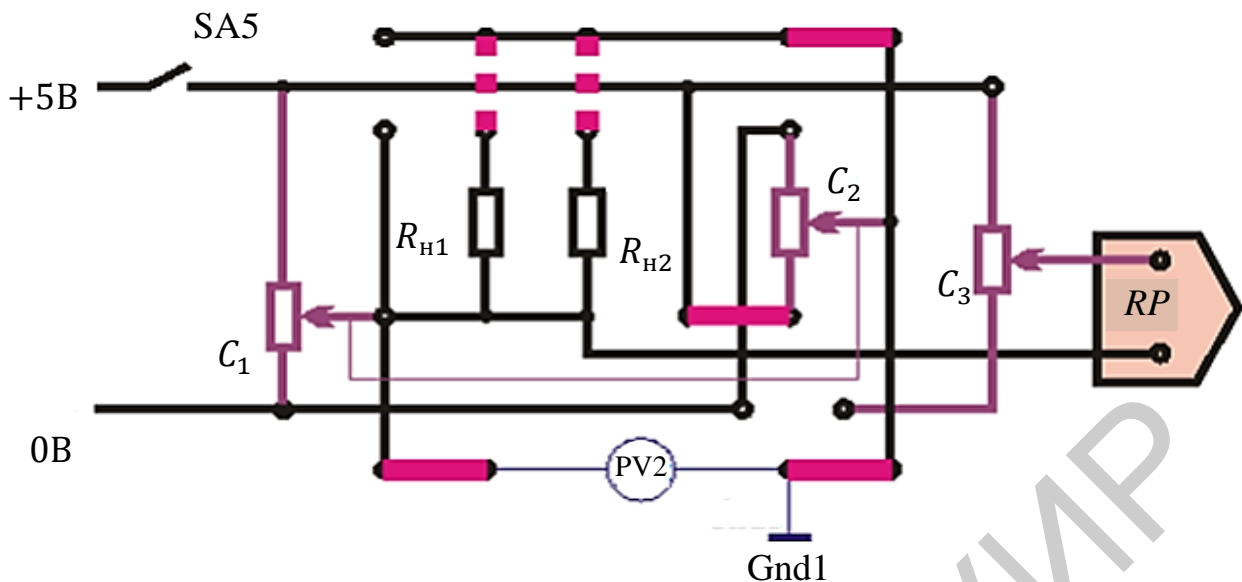


Рис. 1.16. Схема мостового потенциметрического преобразователя

5. Установить ручки потенциометров  $C_1$ ,  $C_2$  в среднее положение, при этом добившись нулевого напряжения. Данные положения ручек (0) считать исходными.

6. Плавно поворачивая ручки потенциометров  $C_1$ ,  $C_2$ , снять статические характеристики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$  в режиме холостого хода, данные занести в табл. 1.4.

7. Плавно поворачивая ручки потенциометров  $C_1$ ,  $C_2$ , снять статические характеристики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$  при подключении нагрузки  $R_{H2}$ ,  $R_{H1}$  поочередно. Данные занести в табл. 1.4, построить графики  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\varphi)$ .

Таблица 1.4

Результаты измерений  $U_{\text{ВЫХ}}$  мостового потенциметрического преобразователя

$\varphi, ^\circ$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (х.х)}$		$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (} R_{H2} \text{)}$		$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В (} R_{H1} \text{)}$	
	направление		направление		направление	
	справа	слева	справа	слева	справа	слева
0						
30						
60						
90						

8. Выключить переключатель SA5.

9. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

10. Разобрать схему.

### 1.2.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схемы исследования потенциометров.

4. Табличные и графические результаты измерений.
5. Анализ полученных данных и вывод.

#### 1.2.4. Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы потенциометра.
2. Назовите особенности и примеры применения потенциометров.
3. Каковы конструкции потенциометрических датчиков?
4. Перечислите основные параметры и характеристики потенциометрических датчиков.
5. Назовите особенности схем включения потенциометрических датчиков.
6. Перечислите достоинства и недостатки потенциометрических датчиков.
7. Назовите основные причины отказов потенциометрических датчиков и укажите методы повышения их надежности.
8. Каковы пути увеличения точности измерений, получаемых потенциометрическими датчиками?
9. Назовите пути получения нелинейных зависимостей передаточной функции потенциометрического датчика.
10. Что такое фотопотенциометр? Опишите принцип его работы.

#### Список использованных источников

1. Келим, Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю. М. Келим. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2002. – 384 с.
2. Bill Messner at Carnegie Mellon and Prof. Dawn Tilbury at the University of Michigan. Control Tutorials for MATLAB and Simulink (CTMS) [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/>.
3. ГОСТ Р 51086–97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. – Введ. 1997–07–29. – М. : Госстандарт России, 1997.
4. Четвертков, И. И. Потенциометры / И. И. Четвертков, Н. М. Коросько. – М. : Сов. радио, 1978. – 64 с.
5. Колосов, С. П. Элементы автоматики / С. П. Колосов, И. В. Калмыков, В. И. Нефедова. – 3-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1970. – 392 с.
6. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 588 с.
7. Красовский, А. А. Основы автоматики и технической кибернетики / А. А. Красовский, Г. С. Поспелов. – М. : ГЭИ, 1962. – 600 с.
8. Аскерко, В. С. Техническая электроника и элементы авиационных автоматических устройств. В 2 ч. Ч. 2. / В. С. Аскерко. – М. : ВВИА им. Жуковского, 1975. – 103 с.
9. Белевцев, А. Т. Потенциометры / А. Т. Белевцев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 328 с.

10. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. Я. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.

11. Гавриков, В. Потенциометры и триммеры *Bourns*: от истоков до наших дней / В. Гавриков // Новости электроники. – 2015. – №1.

12. Глухов, В. В. Методические указания по дисциплине «Автоматика и управление». В 4 ч. Ч. 1 / В. В. Глухов. – М. : МГТУ ГА, 2006. – 20 с.

13. Лаврова, А. Т. Элементы автоматических приборных устройств : учеб. пособие / А. Т. Лаврова. – М. : Машиностроение, 1975. – 456 с.

14. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий [и др.] ; под ред. Е. П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

15. Агейкин, Д. И. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы / Д. И. Агейкин, Е. Н. Костина, Н. Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ

Цель работы: изучить принципы работы импульсных датчиков положения; провести экспериментальные исследования работы импульсного датчика положения и его выходных сигналов; исследовать работу схемы формирования аналогового сигнала скорости по импульсам датчика положения.

#### 2.1. Краткие теоретические сведения

*Импульсный датчик* – один из ключевых компонентов бесконтактных систем диагностики. Конструктивно датчик устанавливается в непосредственной близости от исполнительного механизма (например, приводного вала) и отслеживает скорость его вращения. Чем быстрее вращается вал, тем чаще датчик передает электрические импульсы низкого напряжения в систему управления, которая отслеживает положение механизмов и скорость вращения.

*Основные задачи импульсных датчиков* – определение положения и обеспечение синхронизации взаимозависимых частей механизмов.

Импульсные датчики используют принцип модуляции светового, электрического или электромагнитного потоков энергии при взаимном перемещении шкалы датчика относительно съемника.

Абсолютное большинство импульсных датчиков, применяющихся в современных роботизированных системах, относятся к типам:

- индукционным;
- оптическим;
- магнитоэлектрическим (на основе эффекта Холла).

Работа *индукционного генератора импульсов* основана на явлении электромагнитной индукции. Датчик состоит из постоянного электромагнита с об-

моткой и зубчатого диска. При вращении диска магнитное поле замыкается либо через зуб, либо через впадину. Таким образом, магнитный поток, проходящий через обмотку, то возрастает, то снижается.

*Импульсные оптические (фотоэлектрические) датчики* имеют растровую шкалу, на которой с постоянным шагом определены риски таким образом, что непрозрачные участки и просветы (штрихи) имеют одинаковую ширину. В своей конструкции датчик оптический состоит из излучателя, генерирующего свет в различных диапазонах, а также приемника, который различает сигнал, испускаемый первым элементом. В основе работы прибора лежит изменение оптического излучения при появлении в зоне действия непрозрачного объекта. При включении устройства испускается оптический луч, принимаемый через рефлектор или отраженный от объекта.

Принцип работы *датчика Холла* основан на изменении проводимости специального полупроводникового материала под влиянием постоянного магнитного поля. Как правило, источник поля (постоянный магнит) и полупроводниковый элемент зафиксированы неподвижно и разделены шторкой с проемами – обтюратором. Обтюратор закреплен на вале движущегося механизма и вращается вместе с ним. В моменты, когда шторка обтюратора оказывается напротив полупроводникового элемента, магнитное поле прерывается.

Электрические импульсы формируются за счет чередования периодов наличия и отсутствия поля.

### **2.1.1. Импульсный датчик с переменным магнитным сопротивлением**

Схема этого типа датчика представлена на рис. 2.1.

Магнитный сердечник сенсорной катушки подвергается воздействию магнитного поля от постоянного магнита и обращен к диску (полюсное зубчатое колесо) или к ферромагнитной вращающейся части.

Появление магнитных неоднородностей (зубцов, щелей, провалов), связанных с вращением диска, служит причиной периодических изменений магнитного сопротивления в магнитной цепи катушки индуктивности. Эти изменения приводят к напряжению, частота и амплитуда которого пропорциональны скорости вращения.

Амплитуда напряжения зависит от следующих факторов:

- расстояния между катушкой и вращающейся частью;
- скорости вращения.

Диапазон измерений датчика зависит от количества магнитных неоднородностей, имеющих во вращающейся части. Минимальное значение скорости, которую можно измерить, снижается с ростом числа зубцов. И наоборот, максимальная измеряемая скорость растет с уменьшением числа зубцов из-за трудности обработки высокочастотных сигналов.

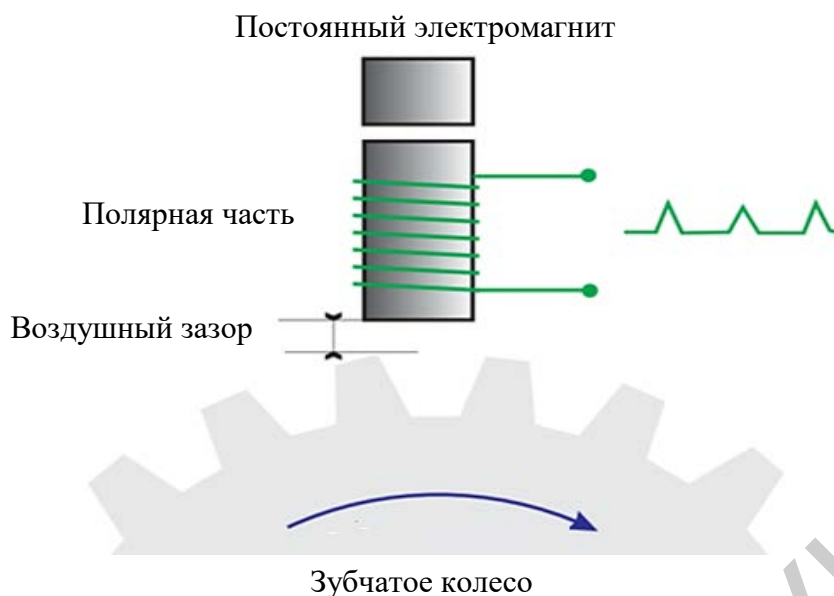


Рис. 2.1. Импульсный датчик с переменным магнитным сопротивлением

### 2.1.2. Тахометр на вихревых токах

Вместо системы катушки индуктивности с постоянным магнитом здесь применяется колебательный контур. Катушка индуктивности, которая является также измерительной головкой, образует индуктивность  $L$  измерительной цепи синусоидального колебательного контура. Характеристики катушки  $L$  и  $R$  изменяются по мере приближения металлического проводника.

Когда зубчатое колесо, находящееся перед катушкой, вращается, каждый проходящий зубец прерывает определяемый осциллятором сигнал, например, путем изменения формы тока в источнике питания.

Частота полученного сигнала пропорциональна скорости вращения. Амплитуда сигнала в данном случае не определяется скоростью вращения, т. е. она от нее не зависит. Это означает, что этот тип датчика можно использовать при низких скоростях.

### 2.1.3. Импульсный оптический датчик положения

В настоящее время импульсные оптические датчики положения (ОДП) являются наиболее распространенным типом датчиков положения, которые часто применяются для измерений взаимного положения подвижных кинематических пар, входящих в состав цифровых следящих систем. Современные ОДП обеспечивают более высокую разрешающую способность, надежность и точность, чем резистивные и электромагнитные датчики тех же размеров. Кроме того, в отличие от последних, для ОДП характерны независимость метрологических параметров от нагрузки, а также высокая помехозащищенность. Им свойственны накопление ошибок при сбоях питания и необходимость периодического определения нуля отсчета.

*Виды ОДП:*

1. *По принципу считывания сигнала:*

- относительные (накапливающие);
- абсолютные (с абсолютным отсчетом).

2. *По способу кодирования:*

- растровые;
- импульсные;
- кодовые;
- комбинированные (прецизионные).

*Относительные (накапливающие) преобразователи* используют датчик и счетную систему, суммирующую отдельные приращения, а также репер (метку), относительно которого эти приращения суммируются.

*Абсолютные датчики* не содержат репера. Их выполняют либо одношкальными, либо содержащими системы грубого и точного отсчета.

Рассмотрим *растровые оптические датчики положения*, предназначенные для преобразования линейных и угловых перемещений в цифровой код на основе использования растрового сопряжения. Принцип их действия такой же, как у растровых ЭДП. Оптический растр представляет собой совокупность однотипных непрозрачных элементов, образующих периодическую структуру и воздействующих на поток лучистой энергии как единое целое.

Схема растрового ОДП фирмы *National Engineering* представлена на рис. 2.2.

Один из наиболее известных принципов построения растровых ОДП основан на применении однодорожечных пропускающих или отражающих решеток. На рис. 2.2, *а* представлен пример растрового сопряжения. На рис. 2.2, *б* представлен пример промышленного растрового ОДП с отражающей решеткой. Это датчик накапливающего типа, поэтому для определения абсолютного значения перемещения необходимо использование счетных импульсов. Здесь же выделена сканирующая головка с четырьмя фотоприемниками. Диафрагма сканирующей головки содержит четыре щели, размещенные так, что выходные сигналы фотоприемников сдвинуты на четверть периода измерительной решетки. На рис. 2.2, *в* представлен пример диаграммы напряжений.

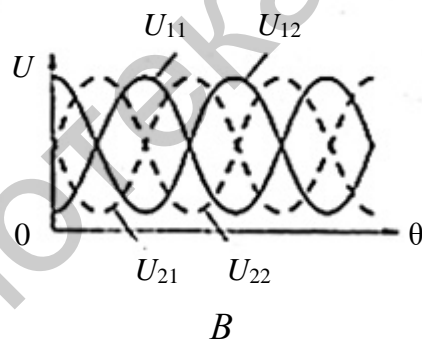
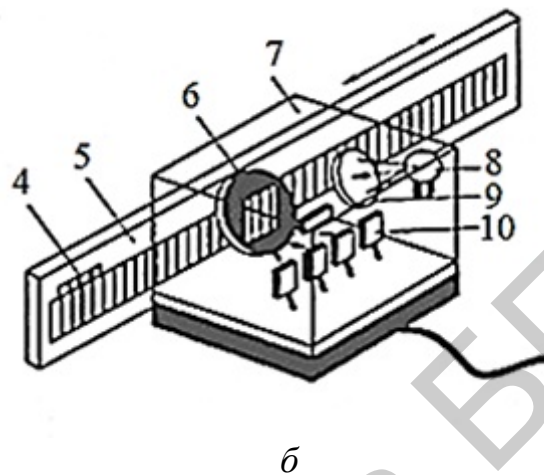
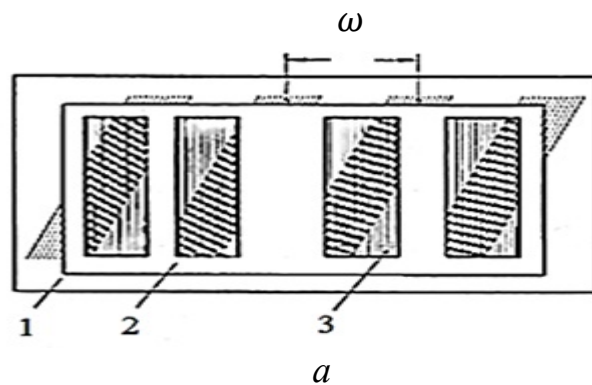


Рис. 2.2. Схема растрового ОДП фирмы *National Engineering*:  
 а – пример растрового сопряжения: 1, 2 – соответственно индикаторная и измерительная пластины; 3 – муаровые полосы;  
 б – конструктивная схема: 4 – маркер начала отсчета; 5 – отражающая решетка; 6 – диафрагма; 7 – сканирующая головка; 8 – осветитель, 9 – конденсор; 10 – фотоприемники;  
 в – диаграмма напряжений

*Достоинства растровых ОДП:*

- простота и технологичность конструкции;
- малые габаритные размеры и масса.

*Недостатки растровых ОДП:*

- накопление ошибок от сбоев и помех в цепях реверсивного счетчика;



- потеря информации о перемещении при отказе в цепи питания;
- необходимость периодического определения начала отсчета (для получения достоверного абсолютного значения измеряемого перемещения).

Рассмотрим *импульсные оптические датчики положения*.

На рис. 2.3 показан принцип работы простейшего импульсного оптического датчика положения.

Излучающий участок включает тройной источник света с тремя фотодиодами или светодиодами (для резервирования) со сроком службы от десяти до двенадцати лет.

Специальная интегральная схема (*ASIC*), подключенная к светочувствительному датчику сигнала, преобразует синусоидальный сигнал в прямоугольные сигналы после усиления.

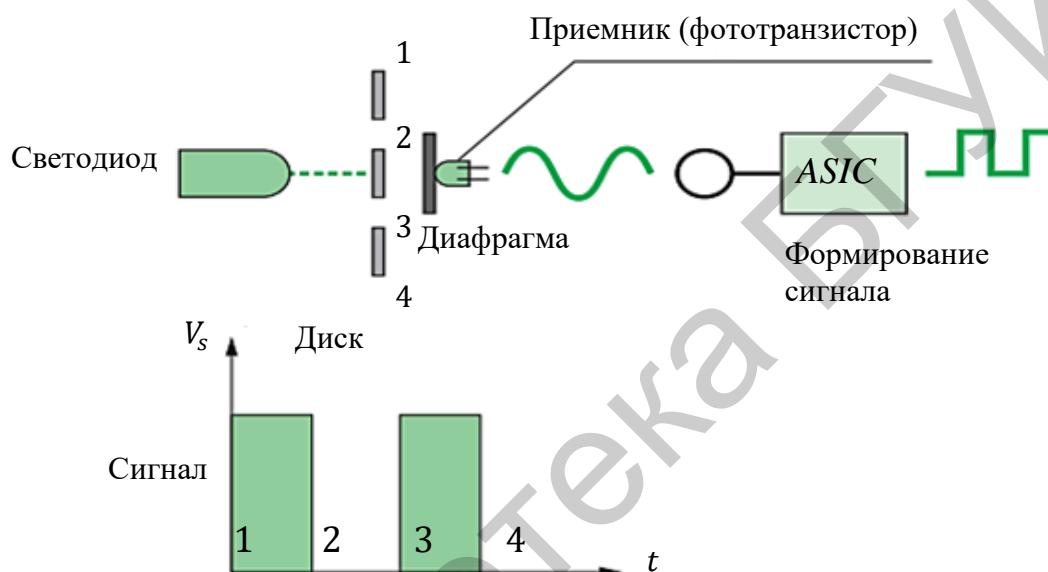


Рис. 2.3. Принцип работы простейшего импульсного оптического датчика положения

Диск представляет собой прочный диск (рис. 2.4) с разрешением до 80 000 точек (например, 10 000 точек для диаметра 90 мм) или стекло для более высоких разрешений и высоких частот считывания (до 300 кГц). На диске импульсных датчиков имеется только одна дорожка младшего разряда.

Для получения информации об угловом или линейном перемещениях используется реверсивный счетчик, суммирующий или вычитающий импульсы в зависимости от направления перемещения. Определение знака перемещения осуществляется с помощью специальных логических схем. Для точного определения исходного положения имеется специальная «реперная» метка.



Рис. 2.4. Диск импульсного оптического датчика положения

В датчиках современных конструкций шкала содержит несколько дорожек и смещенных на нецелое количество шагов фотоэлементов. При такой схеме значительно уменьшается цена управляющего импульса, определяющая разрешающую способность датчика. Например, в датчиках фирмы *Ferranti* используются шкалы с 1250–10 000 штрихами и два фотодиода, причем штрихи дорожек смещены между собой на четверть шага (рис. 2.5, *a*). Одновибраторы измерительной схемы импульсного ОДП формируют и подают на счетчик два импульса с обеих дорожек – по переднему и заднему фронту каждого штриха. Поэтому при вращении вала на один оборот шкалы импульсов возбуждается в четыре раза больше делений (рис. 2.5, *б*).

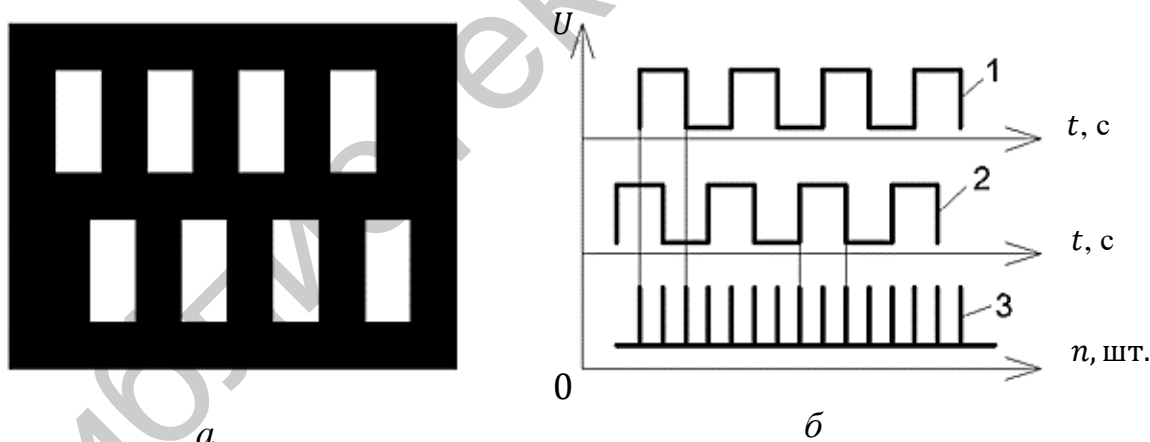


Рис. 2.5. Импульсный ОДП:

*a* – схема расположения дорожек; *б* – диаграммы сигналов:

1, 2 – импульсы с наружной и внутренней дорожек соответственно;

3 – счетные импульсы

Знак направления движения исполнительного органа определяется логической схемой (рис. 2.6, *a*). В данной схеме используют два канала измерения, связанные с каждой дорожкой кодовой шкалы. Триггеры Шмитта  $T_1$ ,  $T_2$  открыты в то время, когда сигналы усилителей  $U_1$ ,  $U_2$  имеют положительную полярность. Это соответствует прозрачному участку кодирующей шкалы. В соответствии с расположением фотоприемников  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  сигналы триггеров сдвинуты

между собой на  $1/4$  периода синусоидального сигнала усилителя (рис. 2.6, б). Дифференцирующие цепи  $G_1, G_2$  (для этой цепи можно использовать одновибраторы) формируют короткие импульсы в момент переброса триггера  $T_2$  по переднему и заднему фронту. На выходе схемы совпадения один сигнал появляется только тогда, когда на ее входах есть одновременно сигналы  $G_1$  и  $T_1$  (на выходе схемы II соответственно с  $G_2$  и  $T_2$ ). Следовательно, на выходе схемы I сигналы формируются при движении органа управления, например, вперед, а на выходе II – назад. Количество импульсов определяет само перемещение. В качестве накапливающего сумматора используют реверсивный счетчик.

Фотоприемники сдвинуты между собой:

$$l = (m + 1/4) \cdot w,$$

где  $m$  – целое число;

$w$  – шаг диска.

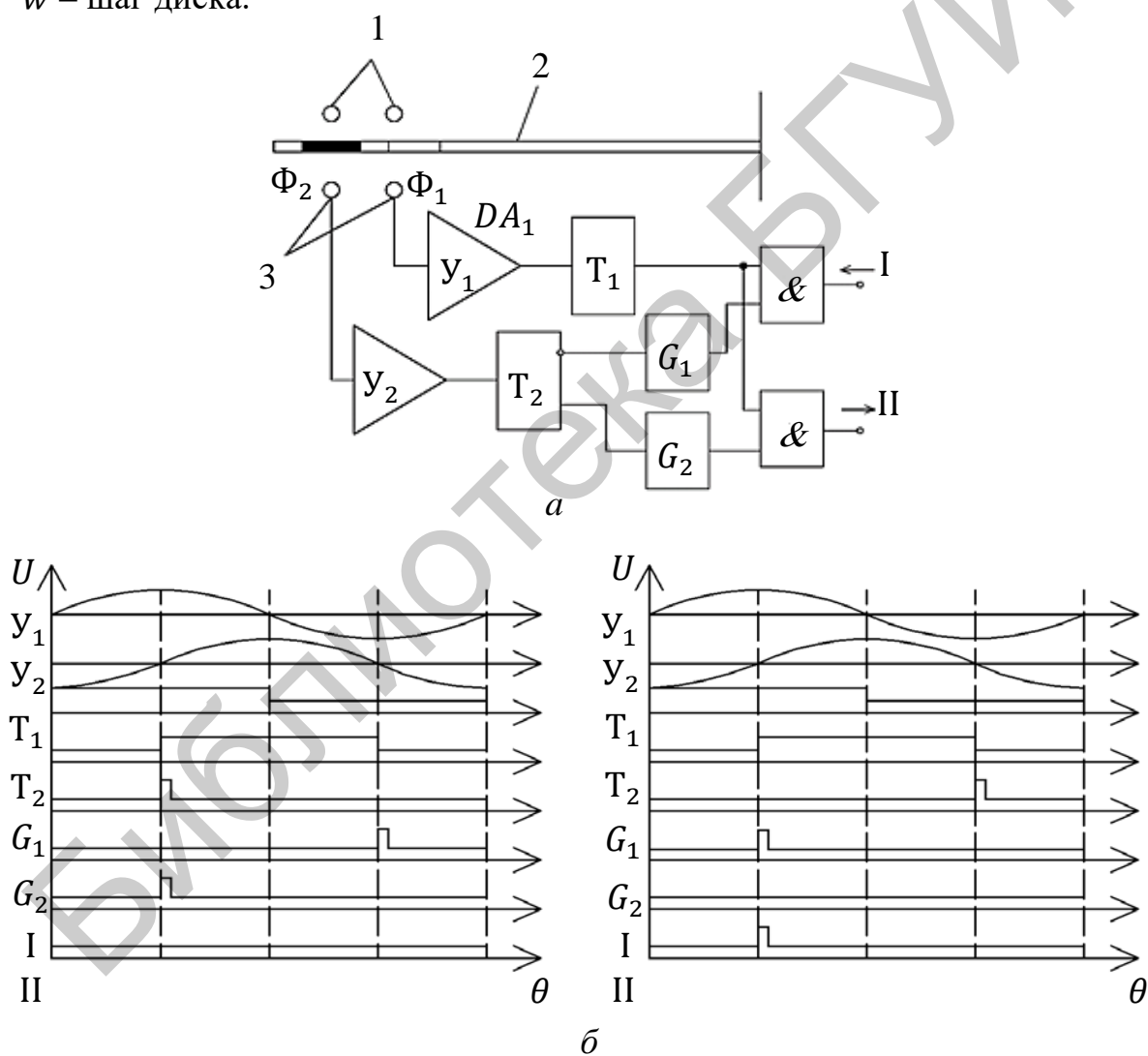


Рис. 2.6. Схема определения направления движения и диаграммы сигналов импульсного ОДП:

$a$  – схема определения направления движения: 1 – осветители;

2 – оптическая шкала; 3 – фотоприемники;

$b$  – диаграммы сигналов:  $G_1, G_2$  – одновибраторы;  $T_1, T_2$  – триггеры Шмитта

Достоинствами оптических импульсных датчиков положения являются:

- малая стоимость;
- достаточно простая конструкция;
- малые массогабаритные характеристики.

Вместе с тем они не лишены недостатков:

- потеря информации о перемещении при отключении питания;
- возможность сбоев по цепи реверсивного счетчика;
- необходимость фиксации нулевого отсчета датчика.

Основные технические характеристики импульсных датчиков положения

*Osicoder*:

- диаметр корпуса – 40, 58 и 90 мм;
- вал – цельный или полый;
- разрешение – 100–80 000 точек;
- тип выхода – RS422.

Основные параметры наиболее распространенных импульсных ОДП приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сравнительная характеристика импульсных ОДП

Модель	$U_{\text{ип}}, \text{В}$	Число импульсов за один оборот	$\Omega, \text{об/с}$	$\varepsilon, \%$	Размеры, мм		$m, \text{кг}$
					$d$	$l$	
BE-178 (Россия)	$\pm 15$	5000	100	0,02	50	106	0,7
ПУФ-МИНИ (Россия)	5	1024	100	0,04	30	61	0,2
ЛИР-3170А (Россия)	5	3 600 000	16	0,000 2	160	64	3,5
ROD-800 (Германия)	5	36 000	5	0,000 3	70	50	0,8
Mini-ROD-450 (Германия)	5	3600	160	0,03	6	33	0,1
TSI-110 (Япония)	$\pm 15$	12 000	100	0,004	70	75	0,3

Здесь  $U_{\text{ип}}$  – напряжение источника питания;  $\Omega$  – максимальная угловая скорость;  $\varepsilon$  – точность измерения.

Конструкция импульсного оптического датчика углового положения (энкодера) включает в себя светоизлучающий диод, светочувствительное приемное устройство и диск с чередующимися непрозрачными и прозрачными зонами, физически соединенный валом с обследуемым узлом механизма.

При прохождении прозрачных зон диска свет, излучаемый светодиодами, попадает на фотодиоды, после чего фотодиоды вырабатывают электрический сигнал, который затем усиливается и преобразуется в прямоугольный сигнал перед его передачей в систему обработки данных. При вращении диска выходной сигнал кодирующего устройства принимает форму последовательных прямоугольных импульсов. На рис. 2.7 показан типовой пример.



Рис. 2.7. Пример конструктивного исполнения импульсного оптического датчика углового положения

При построении оптических систем применяют две основные схемы. В первой схеме оптическая система содержит лампу и линзу, через которую освещается одна сторона диска; приемники подсвечиваются через узкую щель диафрагмы, установленную строго по линии считывания. Во второй – оптическая система формирует один линейный пучок, проецируемый по линии считывания диска (диафрагма располагается перед диском).

При вращении градуированного диска на выходе светочувствительного датчика вырабатываются одинаковые импульсы в зависимости от движения обследуемого объекта. Разрешение, т. е. количество импульсов на оборот, зависит от количества делений на диске или кратно этому числу. Чем больше это значение, тем больше количество измерений на один оборот и более точно определяется перемещение или скорость движущихся частей, соединенных с энкодером.

Типовое применение: резка по размеру. Разрешение выражается как расстояние, покрываемое за один оборот, деленное на количество точек.

Рассмотрим *кодовые оптические датчики положения* (рис. 2.8).

Оптическая система у кодового ОДП построена так же, как у импульсного ОДП, а его кодирующая шкала представляет собой стеклянное основание с кодовой маской, выполненной в виде нескольких (обычно до 20) дорожек с прозрачными и непрозрачными сегментами. Число дорожек, как правило, определяет разрядность выходного двоичного кода. Осветитель создает лучистый поток, падающий на шкалу. В момент съема информации луч, проходя через прозрачные сегменты кодовых дорожек шкалы и ограничивающую щелевую диафрагму, освещает фотоприемники (фотодиодные линейки), усиленные сигналы с которых принимаются за двоичные единицы. Отсутствие сигнала с фотоприемника соответствует двоичному нулю. В результате каждому перемещению соответствует определенная комбинация двоичных единиц и нулей, являющаяся его цифровым кодом.

*К достоинствам кодовых оптических датчиков можно отнести:*

- наиболее высокую разрешающую способность;
- надежность и точность;
- независимость метрологических параметров от нагрузки;
- высокую помехозащищенность.

*Недостатком кодовых оптических датчиков является необходимость последующей дешифрации кодов.*

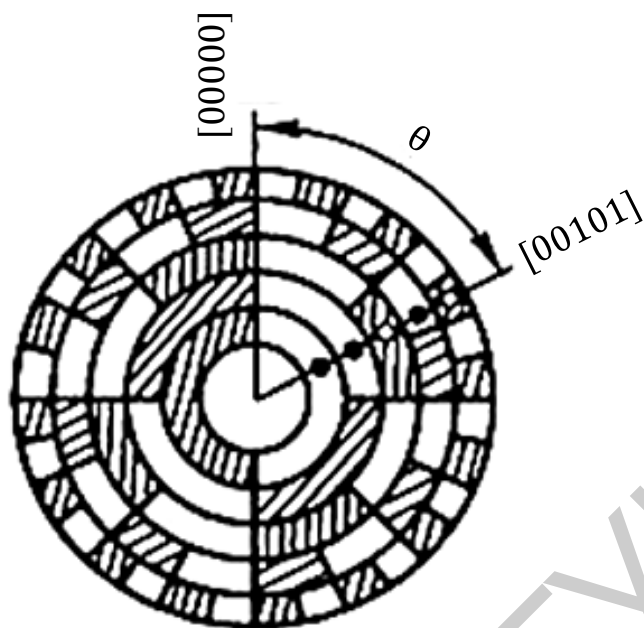


Рис. 2.8. Кодированный диск для двоичного кода

При построении *прецизионных (комбинированных)* ОДП (ПОДП) используются все способы фотоэлектрического преобразования. Высокая точность в таких системах достигается не только благодаря внедрению самых современных технологических достижений, но и применением оригинальных схемотехнических приемов. Наиболее известными решениями являются двушкальные схемы, а также одношкальные конструкции с совмещенной кодово-растровой сегментацией. В обоих случаях выделяются два канала преобразования, причем в одношкальных схемах оба канала построены на базе одной оптической шкалы. Таким образом, в двушкальных схемах канал ТО реализуется с помощью отдельной шкалы, а в одношкальных – на базе специальных дорожек или с помощью растровой интерполяции.

## 2.2. Практическая часть

Для проведения лабораторных исследований универсальный лабораторный стенд в своем составе содержит импульсный датчик положения, состоящий из диска и платы датчика положения с двумя оптопарами. Диск имеет 90 отверстий. Фотодиоды смещены относительно друг друга на расстояние, соответствующее половине шага между отверстиями в диске. Это позволяет при вращении диска получить следующие диаграммы на выходе датчика положения (рис. 2.9).

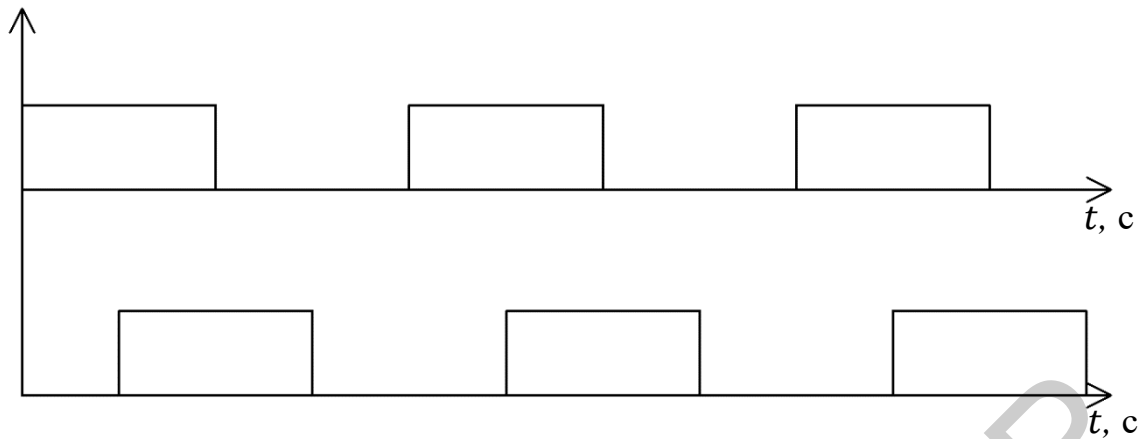


Рис. 2.9. Выходные сигналы с датчика положения

### 2.2.1. Исследование работы импульсного датчика положения и его выходных сигналов

1. Ознакомиться со схемой управления (рис. 2.10). Установить назначение органов управления, принцип работы схемы.

2. Собрать схему, как показано на рис. 2.10 и 2.11.

3. Убедиться, что схема собрана правильно:

– на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки;

– тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»).

Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, должны быть включены тумблеры SA10, SA11.

4. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

5. Вручную, очень медленно и плавно, поворачивать маховик электромашиного агрегата и контролировать изменение состояний светодиодов на плате датчика импульсного положения. При повороте диска на один шаг (от момента прохождения одного отверстия и мимо оптопары до выхода следующего отверстия на оптическую ось этой же оптопары) состояния левого и правого светодиодов меняются в следующей последовательности (табл. 2.2):

Таблица 2.2

#### Исследование последовательности состояний левого и правого светодиодов

Положение диска (относительное)	Левый светодиод	Правый светодиод
1	Не горит	Не горит
2	Горит	Не горит
3	Горит	Горит
4	Не горит	Горит
5 (1)	Не горит	Не горит
...	...	...

То есть за один шаг диска формируется четыре импульса, и затем они повторяются. Далее изменить направление вращения диска и проконтролировать очередность свечения светодиодов.

6. С помощью датчика «Панель РКУ» (нажатием его ручки) войти в главное меню. Вращая ручку датчика, установить пункт меню «POS» и нажатием ручки датчика, войти в его подменю. Вращая ручку датчика, установить пункт подменю «Start» (выбрать этот пункт нажатием ручки датчика). На правом индикаторе будет отображаться позиция диска. Медленно, вручную вращая диск, контролировать изменение показаний индикатора от 0 до 360°.

7. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

8. Повторить задания из пп. 1, 2.

Библиотека БГУИР



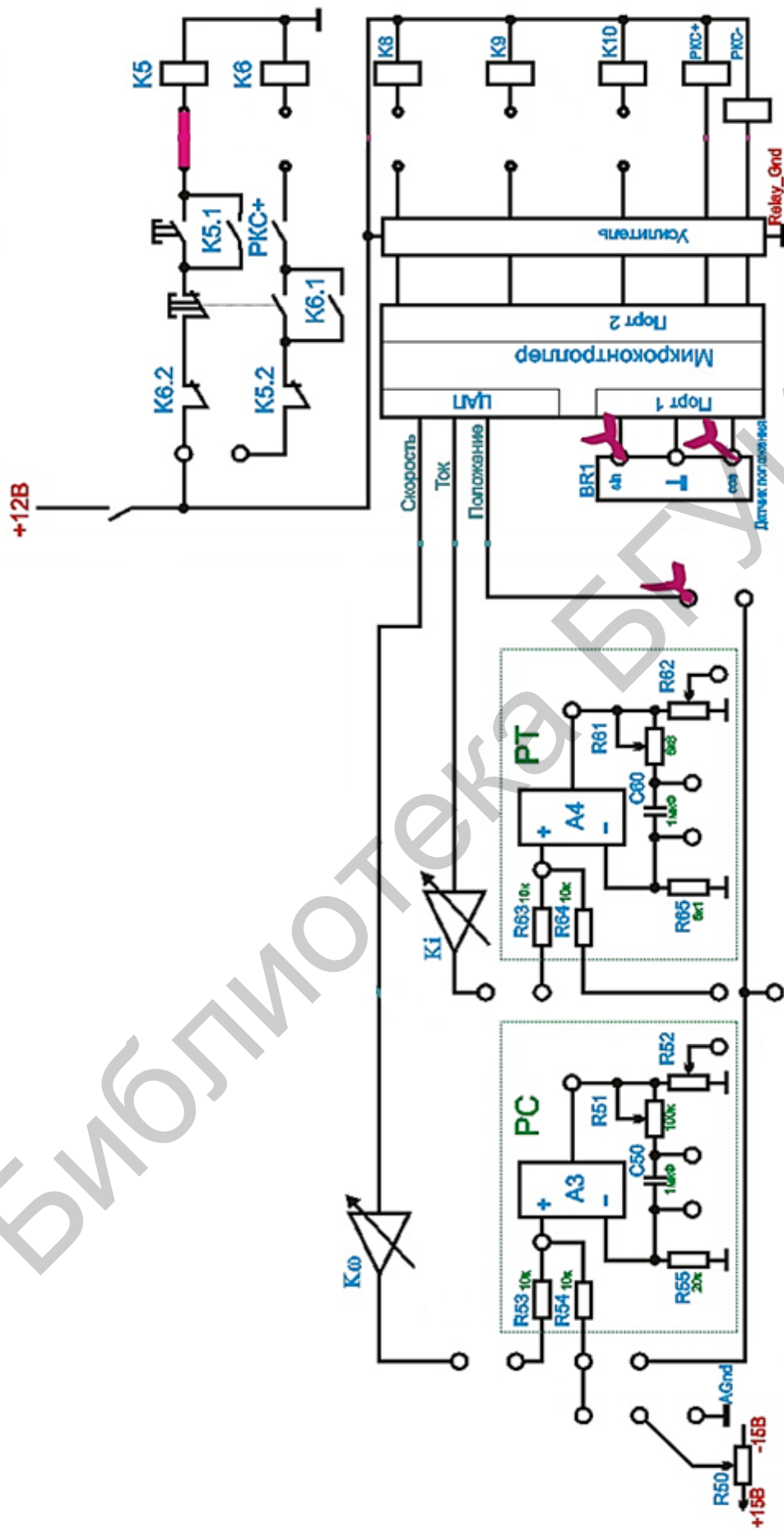


Рис. 2.10. Схема системы управления для исследования импульсного датчика положения

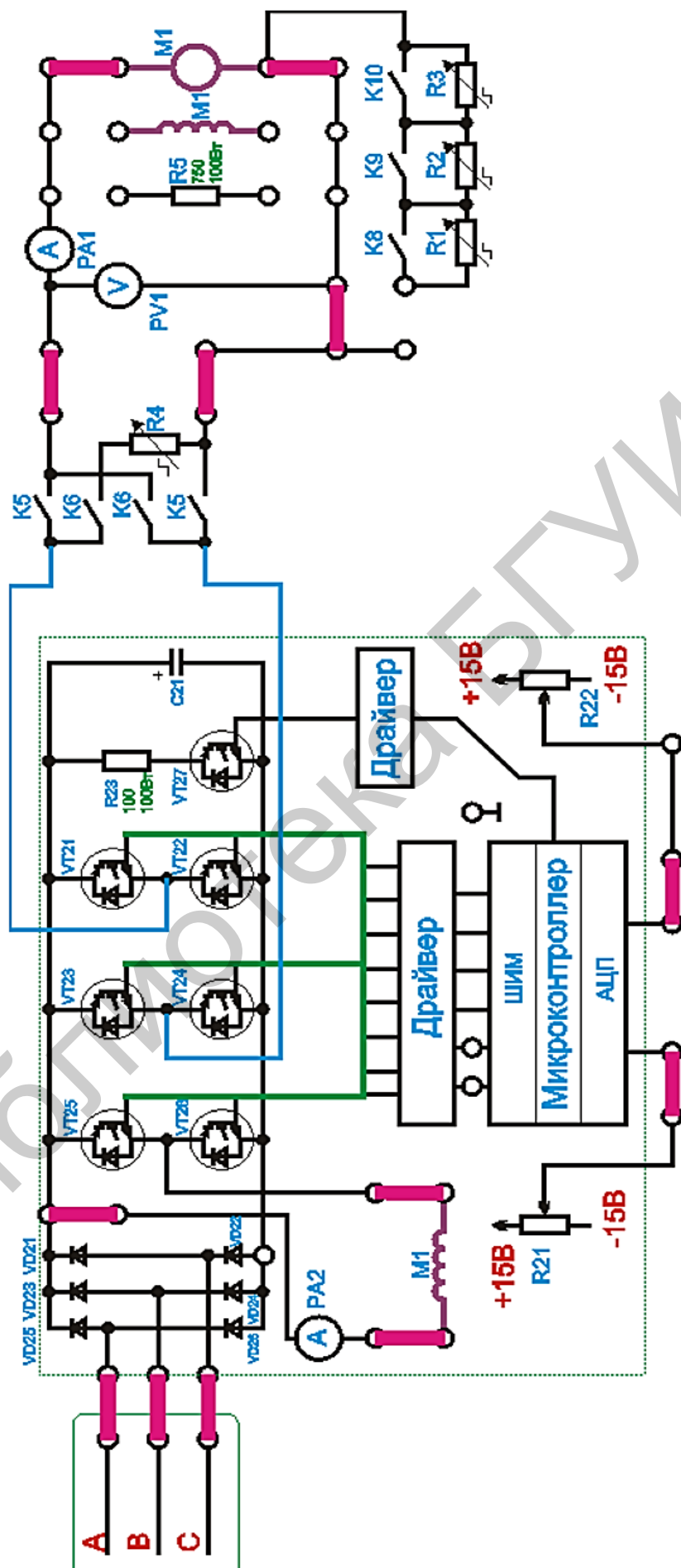


Рис. 2.11. Схема силовой части для исследования импульсного датчика положения

9. Подать напряжение на обмотку возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) – (тумблер SA23). Плавно вращая регулятор R22, установить номинальный ток возбуждения. Ток контролировать по прибору PA2.

10. Включить схему релейно-контакторного управления (тумблер SA70).

11. Подключить исследуемый ДПТ к широтно-импульсному преобразователю (ШИП) – (кнопка SB74).

12. Задать режим работы ШИП как несимметричный, для этого установить тумблер SA21 в положение «Независимый».

13. Включить ШИП (тумблер SA22).

14. Плавно изменяя скважность ШИП, с помощью регулятора задания «Скважность» (R21), увеличивать частоту вращения от 40 рад/с с шагом 10–20 рад/с до величины 120 рад/с. Для каждого значения частоты снять осциллограммы выходных сигналов импульсного датчика положения (точки подключения отмечены на схеме как Y).

15. По осциллограммам определить период следования импульсов ( $T$ , мкс).

16. Рассчитать линейную частоту следования импульсов ( $10^6/T$ , Гц). Учесть, что датчик содержит 90 отверстий (т. е. частота следования импульсов для одного отверстия будет в 90 раз меньше).

17. Определить частоту вращения двигателя ( $\omega_p$ , об/мин). Все полученные данные занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты измерений работы импульсного датчика положения и его выходных сигналов

№ п/п	$\omega$ , рад/с	$T$ , мкс	$10^6/T$ , Гц	$\omega_p$ , об/мин
1				
2				
3				
...				

18. Отключить исследуемый ДПТ от ШИП (кнопка SB73).

19. Перевести регуляторы R21, R22 в крайнее левое положение.

20. Выключить тумблеры SA21, SA22, SA23, SA70.

21. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

22. Разобрать схему.

## 2.2.2. Исследование работы схемы формирования аналогового сигнала скорости по импульсам датчика положения

1. Собрать схему, как показано на рис. 2.11 и 2.12.

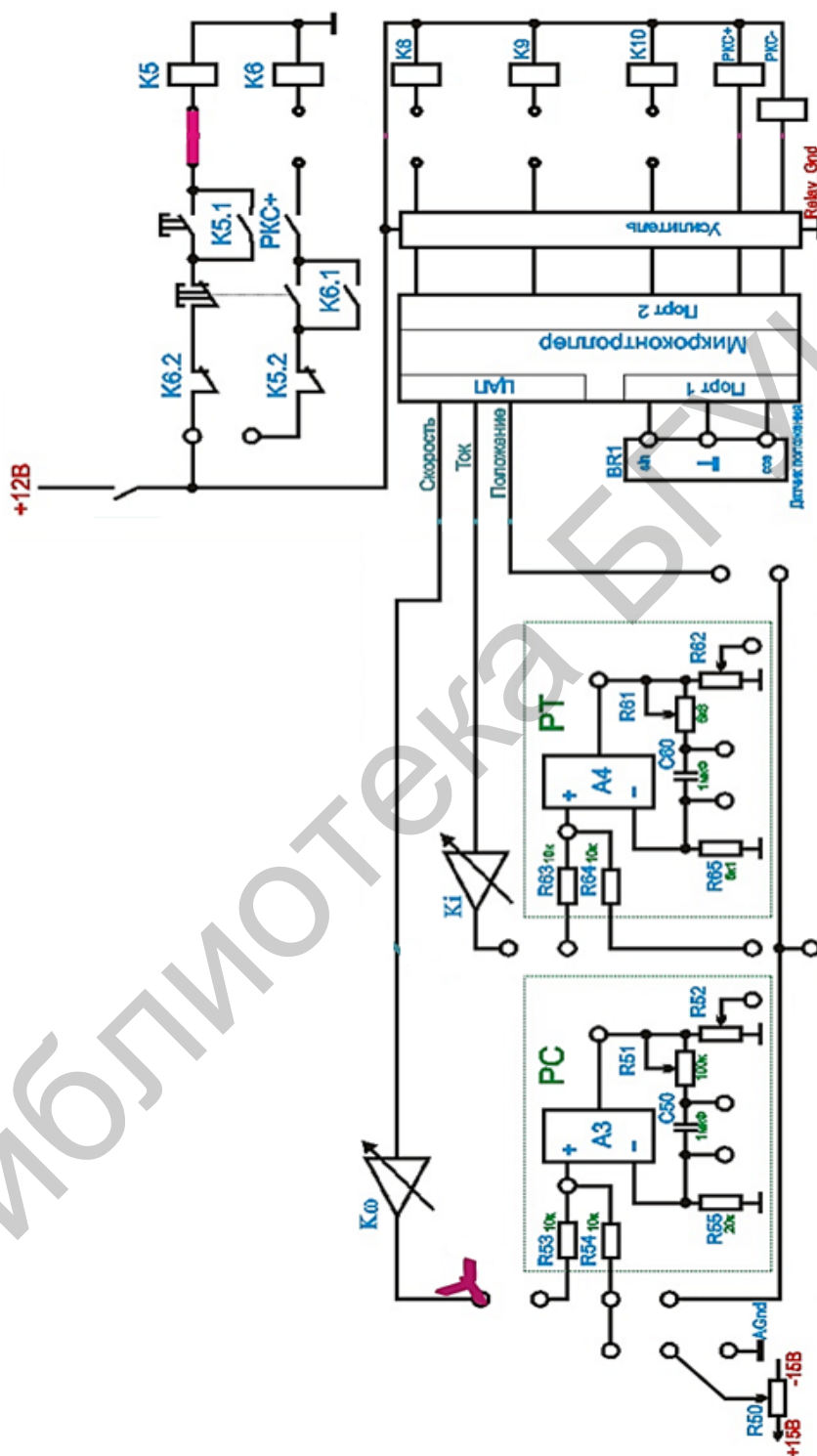


Рис. 2.12. Электрическая схема формирования аналогового сигнала скорости по импульсам датчика положения

2. Убедиться, что схема собрана правильно:

- на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки;
- тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»).

Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, должны быть включены тумблеры SA10, SA11.

3. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

4. Подать напряжение на обмотку возбуждения ДПТ (тумблер SA23). Плавно вращая регулятор R22, установить номинальный ток возбуждения. Ток контролировать по прибору PA2.

5. Включить схему релейно-контакторного управления (тумблер SA70).

6. Подключить исследуемый ДПТ к ШИП (кнопка SB74).

7. Задать режим работы ШИП как несимметричный, для этого установить тумблер SA21 в положение «Независимый».

8. Включить ШИП (тумблер SA22).

9. Плавно изменяя скважность ШИП, с помощью регулятора «Скважность» (R21) увеличивать частоту вращения от 40 рад/с с шагом 10–20 рад/с до величины 120 рад/с. Для каждого значения частоты измерить величину выходного аналогового сигнала  $U_{\text{вых}}$  после Кв. Данные занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Исследование  $U_{\text{вых}}$  и частоты вращения двигателя  $\omega$

№ п/п	Измерено	
	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В
1		
2		
3		
...		

10. Построить зависимость  $U_{\text{вых}}$  цепи «датчик положения – микроконтроллер» от частоты вращения двигателя  $\omega$ .

11. Отключить исследуемый ДПТ от ШИП (тумблер SB73).

12. Перевести регуляторы R21, R22 в крайнее левое положение.

13. Выключить тумблеры SA21, SA22, SA23, SA70.

14. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

15. Разобрать схему.

### 2.2.3. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Схемы исследования импульсного датчика положения.

4. Табличные и графические результаты измерений, осциллограммы.
5. Анализ полученных данных и вывод.

#### 2.2.4. Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы импульсного датчика с переменным магнитным сопротивлением.
2. Опишите принцип работы импульсного ОДП.
3. Каковы оптико-механические системы простейших импульсных ОДП?
4. Какова конструкция современного импульсного ОДП?
5. Назовите основные параметры и характеристики ОДП.
6. Назовите особенности импульсных ОДП.
7. Расскажите о применении ОДП.
8. Назовите достоинства и недостатки ОДП.
9. Как определить знак направления движения исполнительного органа в ОДП?
10. Назовите материалы и компоненты, применяемые для изготовления импульсных датчиков положения.

#### Список использованных источников

1. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – 3-е изд., перераб. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.
2. Егоров, В. С. Технические средства автоматизации и управления / В. С. Егоров. – М. : МГОУ, 2004. – 92 с.
3. Воротников, С. А. Информационные устройства робототехнических систем / С. А. Воротников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 384 с.
4. Датчики положения [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : <http://controlengrussia.com/nocategory/datchiki-polozhenija-1/>.
5. Импульсные оптические датчики положения [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://lib.znate.ru/docs/index-167263.html>.
6. Датчики и системы обнаружения [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://www.myshared.ru/slide/644812/>.
7. Датчики измерительных систем: В 2 ч. Ч. 1 / Ж. Аш [и др.]. – М. : Мир, 1992. – 480 с.

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ

Цель работы: изучить теорию и основные характеристики ультразвуковых датчиков измерения расстояния; исследовать погрешности измерения ультразвукового датчика в зависимости от температуры.

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

Ультразвуковые датчики относятся к бесконтактным датчикам.

Обычно под ультразвуком понимают частоты выше 20 000 Гц.

*Бесконтактный ультразвуковой датчик* – датчик, передающий и принимающий ультразвуковые сигналы в зоне чувствительности и имеющий полупроводниковый коммутационный элемент.

Принцип работы ультразвуковых датчиков основан на отсчете времени, которое проходит ультразвук от датчика к объекту.

Ультразвуковой датчик расстояния точно так же, как и оптический, получил широкое использование в автоматизации на различных производствах. В отличие от дальномеров оптического типа, этот вид датчиков обладает меньшим диапазоном измерительных значений, а также имеет значительно меньшую скорость измерений.

Ультразвуковые датчики достаточно компактны, обладают качественной конструкцией, в них отсутствуют различные подвижные детали. Кроме того, оборудование практически не требует обслуживания.

*Преимущества ультразвуковых датчиков:*

- сравнительно высокая точность прибора;
- низкая чувствительность к загрязнению воздуха окружающей среды, к окраске поверхности объектов;
- широкий диапазон температур, при которых его можно эксплуатировать;
- благодаря использованию автоматизированных и электронных процедур, можно достичь мгновенных результатов проверки и интерпретации детальных изображений;
- использование ультразвуковых волн для тестирования является безопасной операцией.

*Недостатки ультразвуковых датчиков:*

- тестирование образцов, имеющих нерегулярные размерные характеристики, затруднительно, а в некоторых случаях невозможно, поскольку может привести к более чем нескольким геометрическим эхосигналам;
- тестирование должно сопровождаться правильной чисткой рассматриваемой поверхности и удалением отслаивающейся окалины или краски, так, чтобы был контакт между зондом и объектом;

– поверхность тестирования должна быть доступна для датчика, чтобы была возможность запустить звуковые волны на объект.

### 3.1.1. Принцип работы ультразвуковых датчиков

В данной лабораторной работе описаны методы измерения расстояния посредством ультразвуковых датчиков, основанные на принципе измерения времени прохождения сигнала. Принцип работы ультразвуковых датчиков удобно показать через блок-схему (рис. 3.1) и вид сигнала чувствительного элемента ультразвукового датчика (рис. 3.2).

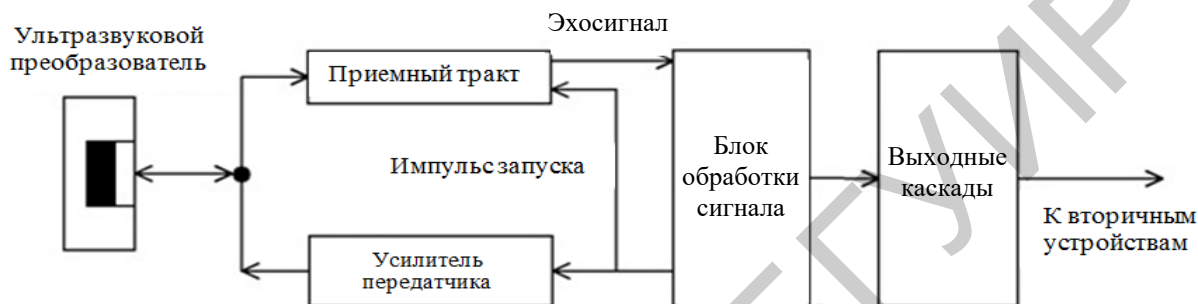


Рис. 3.1. Блок-схема ультразвукового датчика с совмещенными излучателем и приемником

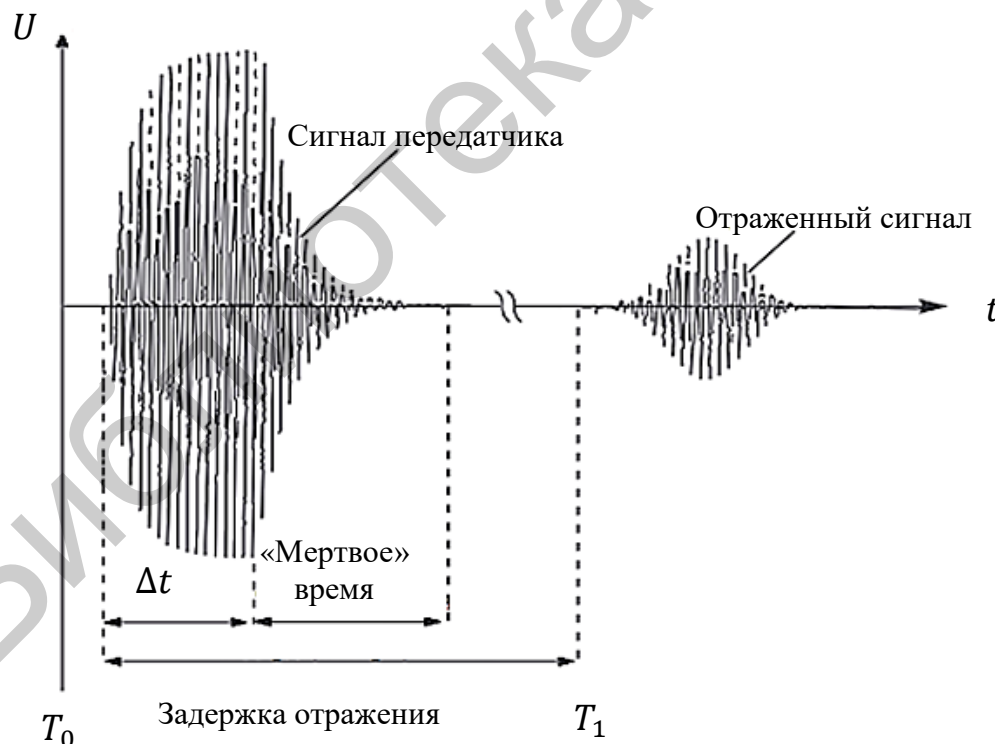


Рис. 3.2. Сигнал на чувствительном элементе ультразвукового датчика измерительной схемы с одной головкой

В момент  $T_0$  (см. рис. 3.2) ультразвуковой передатчик излучает сигнал – пачку импульсов продолжительностью  $\Delta t$ , которая распространяется в окру-



жающей среде со скоростью звука  $c$ . Когда сигнал достигает объекта, часть сигнала отражается и приходит в приемник в момент  $T_1$ . Электронная схема устройства обработки сигнала определяет расстояние до объекта, измеряя время  $T_1 - T_0$ . Для измерений расстояния может применяться как схема, использующая одну и ту же головку датчика для излучения и приема, так и схема, в которой излучение и прием производят две разные головки.

### 3.1.2. Основные параметры ультразвуковых датчиков

Основные рабочие параметры ультразвуковых датчиков таковы:

- *частота ультразвука* – частота, на которой датчик излучает ультразвуковой сигнал;
- *диапазон обнаружения* – расстояние, на котором ультразвуковой датчик еще может обнаружить предмет;
- *угол обзора* – угол, в пределах которого датчик может обнаружить предмет. Характеристика обратная углу обзора – «слепая» зона;
- *рабочая температура* – температура, при которой погрешность измерения не выходит за пределы, установленные в документации.

Также у каждой модели датчиков есть свои электрические параметры, такие как рабочий ток и напряжение.

### 3.1.3. Основные конструктивные типы и режимы работы ультразвуковых датчиков

Ультразвуковые датчики конструктивно и по режимам своей работы делятся на три группы.

Принцип работы ультразвукового датчика положения поддерживает три режима:

- *оппозиционный* – передатчик с приемником представляют собой отдельные устройства, которые устанавливаются один напротив другого;
- *диффузионный* – функционирование датчиков возможно в том случае, когда излучатель с приемником размещены в одном корпусе;
- *рефлекторный* – излучатель и приемник находятся в одном корпусе, однако, ультразвуковой луч в данном случае отражается от рефлектора.

Объекты в диапазоне обнаружения выявляются как путем измерения изменений расстояния, которое проходит ультразвуковой луч, так и путем оценки потерь на поглощение или отражение в отраженном сигнале. Звукопоглощающие предметы, а также предметы с угловыми поверхностями обнаруживаются при таком режиме работы датчика легко. Важное условие: положение опорного рефлектора не должно изменяться.

В оппозиционном режиме выход выключателя будет активизирован в том случае, если ультразвуковой пучок сталкивается с препятствием (объектом).

В оппозиционном режиме выделяют несколько особенностей:

- большой диапазон, ведь ультразвуковой пучок преодолевает сигнальное расстояние всего лишь один раз;
- достаточно быстрое переключение;
- невосприимчив к интерференции, что позволяет использовать ультразвуковой пучок в довольно трудных условиях;
- сравнительно высокая стоимость монтажных работ, потому что необходимо установить два датчика – передатчик и приемник.

В диффузионном режиме благодаря тому, что излучатель с приемником размещены в одном корпусе, стоимость монтажной работы минимальна, ведь нужно закрепить и настроить всего лишь одно устройство. Однако он характеризуется большим временем срабатывания, чем период, свойственный для датчиков, которые действуют в оппозитионном режиме.

В рефлекторном режиме (когда для радарного уровнемера характерен корпус с излучателем и приемником, но ультразвуковой луч отражается от рефлектора) измерение осуществляется не только за счет определения изменений в расстоянии, которое преодолевает ультразвуковой луч, но и посредством оценивания потерь на поглощение или отражение в отраженном сигнале. При рефлекторном режиме легко обнаруживаются звукопоглощающие объекты, а также предметы с угловыми поверхностями. Но важно помнить, что положение опорного рефлектора менять нельзя.

### 3.1.4. Влияние внешних факторов на показания датчика

#### 3.1.4.1. Влияние температуры

Ультразвуковые датчики действуют по принципу эхолокации: расстояние до объекта рассчитывается на основании измерения промежутка времени между моментами посылки и приемом звукового импульса и скорости звука в среде.

Для среды газов используется формула скорости звука ( $V$ ):

$$V = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma R (t + 273,15)}{M}},$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты: 5/3 – для одноатомных газов, 7/5 – для двухатомных (и для воздуха), 4/3 – для многоатомных;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура в кельвинах;

$m$  – молекулярная масса;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$M$  – молярная масса;

$t$  – температура в градусах Цельсия.

По порядку величины скорость звука в газах близка к средней скорости теплового движения молекул и в приближении постоянства показателя адиаба-

ты пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры. Скорость звука в газах приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Скорость звука в газах ( $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}; P = 101\,325 \text{ Па}$ )

Газ	$V, \text{ м/с}$
Азот	334
Аммиак	415
Ацетилен	327
Водород	1284
Воздух	331
Гелий	965
Кислород	316
Метан	430
Угарный газ	338
Углекислый газ	259
Хлор	206

Формула скорости звука в воздухе при давлении  $\sim 1 \text{ атм}$ :

$$V(t) = 331 \sqrt{1 + \frac{t}{273}},$$

где  $t$  – температура в градусах Цельсия.

Из зависимости видно, что скорость распространения звуковых волн снижается с понижением температуры воздуха. Большинство производителей в спецификации к ультразвуковым датчикам указывают коэффициент температурной погрешности, выраженный в процентах на один градус температуры. Тогда с учетом  $L = V \cdot t$  расстояние чувствительности может быть откорректировано.

Датчики для высоких, низких температур или для расширенных температурных диапазонов оборудованы автоматической температурной коррекцией.

#### 3.1.4.2. Зависимость от частоты звука и влажности

При распространении звука в механической среде амплитуда звукового давления снижается в результате дифракции волн, рассеивания, поглощения, необратимого превращения энергии в другие формы. Оценка объемов абсорбционных потерь и затухания используется в определении максимальной дальности действия ультразвукового датчика. Коэффициент затухания увеличивается с ростом частоты ультразвука (рис. 3.3), в то же время для любой отдельно взятой частоты существует зависимость коэффициента затухания от влажности воздуха. Степень влажности, при которой происходит максимальное затухание, различна для разных частот. Например, для частоты свыше 125 кГц максимальное затухание происходит при относительной влажности воздуха (ОВВ) 100 %, для частоты 40 кГц – при ОВВ 50 %.

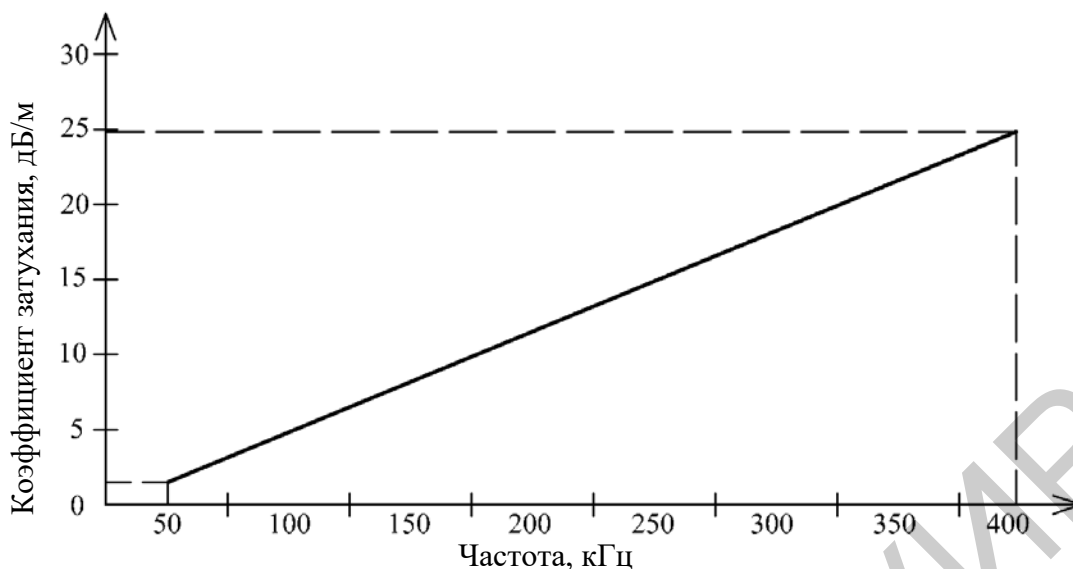


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента затухания от частоты при 20 °С, 1 атм, ОВВ 80 %

На графике (рис. 3.4) приведены экспериментальные кривые для разных частот, показывающие зависимость коэффициента затухания от влажности воздуха.

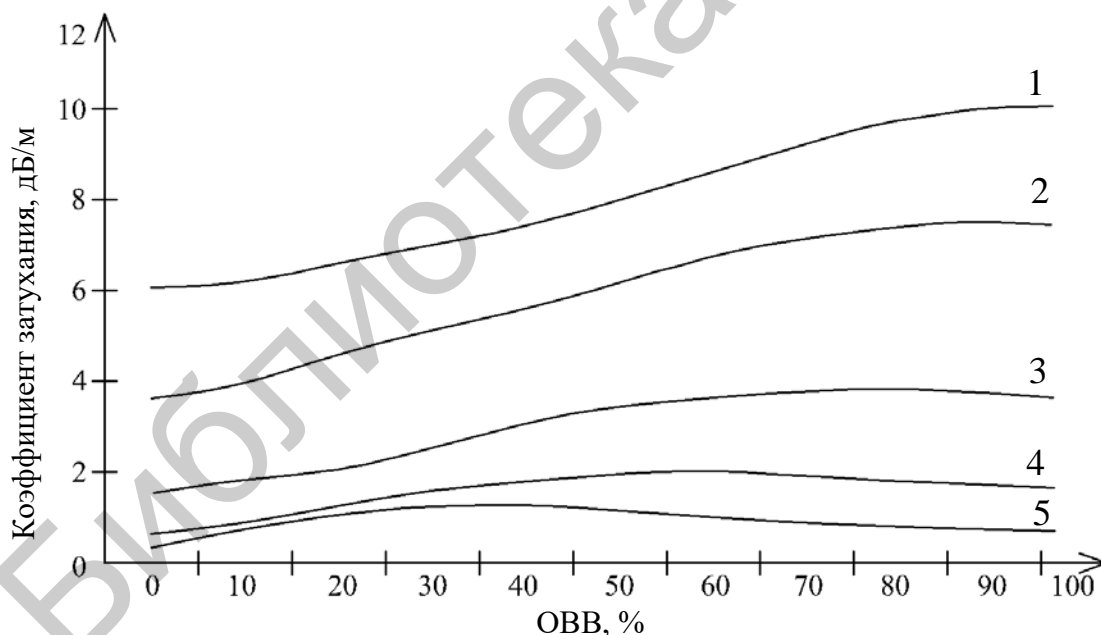


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента затухания от ОВВ для частот: 1 – 40 кГц; 2 – 60 кГц; 3 – 100 кГц; 4 – 160 кГц; 5 – 200 кГц

Определить максимальный коэффициент затухания для частот от 50 до 400 кГц можно, воспользовавшись оценочной формулой

$$a(f) = 0,066f - 1,8,$$

где  $a(f)$  – коэффициент затухания (дБ/м);

$f$  – частота ультразвука (кГц) при 20 °С, 1 атм, ОВВ 80 %.

### 3.1.4.3. Влияние внешних шумов

Чем выше частота звука, тем меньше влияние внешних шумов. Это связано с тем, что в окружающей среде присутствует незначительное количество высокочастотных шумов, а низкочастотные шумы быстро рассеиваются в атмосфере.

#### 3.1.4.4. Влияние частоты, расстояния и среды распространения звука на амплитуду звукового давления

Ультразвуковой датчик посылает звуковой сигнал короткими цугами. Различные датчики производят различное звуковое давление (*SPL* – *sound pressure level*). В акустике в силу широкого динамического диапазона звуковое давление обычно выражается в децибелах. Являясь совершенно относительной величиной, оно отвечает соотношению

$$SPL = 20 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right),$$

где  $P$  – фактическое давление в микропаскалях ( $\mu\text{Па}$ );

$P_0$  – опорное давление.

$P_0$  принимается равным  $1 \mu\text{Па}$  – минимальному уровню, воспринимаемому на расстоянии  $R_0 = 30 \text{ см}$  от датчика. Соответственно,  $R_0$  принимается как опорное расстояние.

В процессе распространения звуковой луч радиально расширяется по мере удаления от излучателя, а амплитуда звукового давления  $P$  снижается из-за затухания и рассеивания. Тогда *SPL* на расстоянии  $R$  от излучателя выражается формулой

$$SPL(R) = SPL(R_0) - 20 \lg \left( \frac{R}{R_0} \right) - a(f)R,$$

где  $R$  – фактическое расстояние от датчика;

$R_0$  – опорное расстояние;

$a(f)$  – коэффициент затухания сигнала с частотой  $f$ .

#### 3.1.4.5. Амплитуда отраженного эха от плоской поверхности для различных ультразвуковых частот

Рассмотренная в предыдущем материале формула звукового давления справедлива для прямолинейного распространения звука в среде от одной точки до другой и может применяться для датчиков с разделенным излучателем и приемником (*THRU-BEAM*). Для датчиков с диффузным отражением луча от объекта (с единственным элементом, исполняющим роль излучателя и приемника), действующим по принципу эхолокации, свойственны потери при отражении от среды другой (большей) плотности.

*Отражение звука* – явление, возникающее при падении звуковой волны на границу, разделяющую две упругие среды, и состоящее в образовании волн, распространяющихся от границы раздела в обратном направлении. Количество отраженного звука зависит от соотношения акустического сопротивления в средах ( $Z$ ).

Так как акустическое сопротивление воздуха в 1000 раз превышает сопротивление воды, а более твердых материалов – в несколько тысяч раз, ультразвуковые волны на границе раздела отражаются почти полностью. В случае прямолинейного отражения луча от плоской поверхности можно пренебречь взаимодействием звука с твердым телом и воспользоваться формулой Френеля:

$$V = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)},$$

где  $V$  – коэффициент отражения;

$Z_2$  и  $Z_1$  – акустическое сопротивление материалов.

Для границы воздух/вода коэффициент отражения  $V$  равен 0,99.

Тогда звуковое давление отраженного эха можно выразить формулой

$$SPL(2R) = V \left( SPL(R_0) - 20 \lg \left( \frac{2R}{R_0} \right) - 2a(f)R \right),$$

где  $R$  – расстояние от датчика до объекта;

$R_0$  – опорное расстояние;

$a(f)$  – коэффициент затухания сигнала с частотой  $f$ ;

$V$  – коэффициент отражения ( $\sim 1$ ).

### 3.1.5. Применение ультразвуковых датчиков

Ультразвук, звук частотой более 20 кГц, человек не воспринимает. Тем не менее скорость его распространения в воздушной среде известна и составляет 344 м/с. Располагая данными о скорости звука и времени его распространения, можно вычислить точное расстояние, которое прошла ультразвуковая волна. Этот принцип положен в основу работы ультразвуковых датчиков.

Ультразвуковые датчики широко применяются в самых разных сферах производства и в некотором роде являются универсальным средством решения многих задач автоматизации технологических процессов. Такие датчики применяются для определения удаленности и местонахождения различных объектов.

Определение уровня жидкости (например, расхода топлива на транспорте), обнаружение этикеток, в том числе и прозрачных, контроль передвижения объекта, измерение расстояния – вот лишь некоторые из возможных применений ультразвуковых датчиков.

Как правило, на производствах немало источников загрязнения, что может стать проблемой для многих механизмов. Но ультразвуковой датчик, в силу особенностей его работы, абсолютно не боится загрязнений, поскольку корпус датчика при необходимости может быть надежно защищен от возможных механических воздействий.

### 3.1.5.1. Ультразвуковые расходомеры

В устройствах данного типа используется свойство звуковых волн изменять скорость своего распространения в подвижной среде. Если установить источник  $A$  и приемник  $B$  ультразвука со смещением (рис. 3.5), то о скорости потока можно судить по изменению скорости распространения звуковой волны вдоль отрезка  $AB$ .

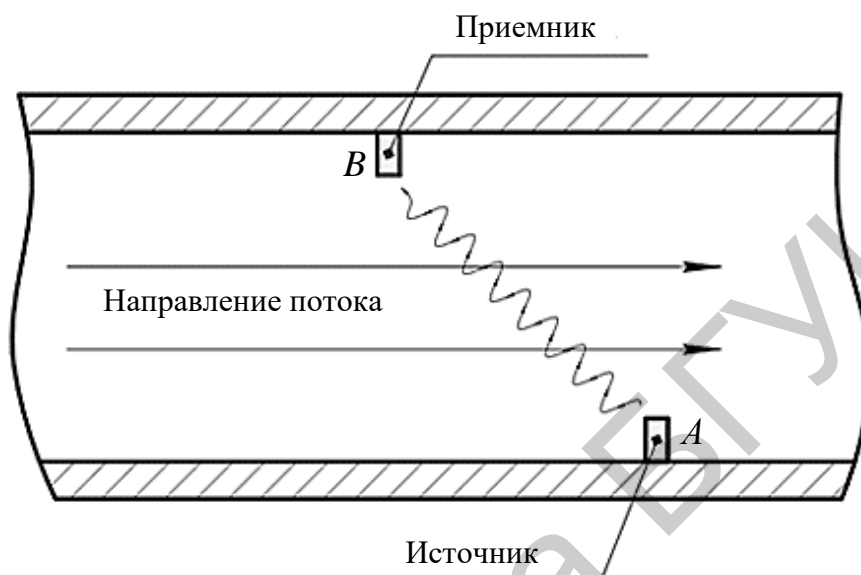


Рис. 3.5. Общая схема расположения ключевых элементов ультразвукового расходомера

Кроме того, для измерения локальной скорости потока может быть использован эффект Доплера. Для этого источник и приемник располагаются так, как показано на рис. 3.6. Исходный сигнал, а также сигнал с приемника отправляются на смеситель. Частота ультразвука, которую фиксирует приемник, изменяется в зависимости от скорости потока, исходная частота остается неизменной. Частота сигнала на выходе из смесителя является разностью частот исходного и принятого сигналов. По этой величине можно судить о локальной скорости вещества в потоке.

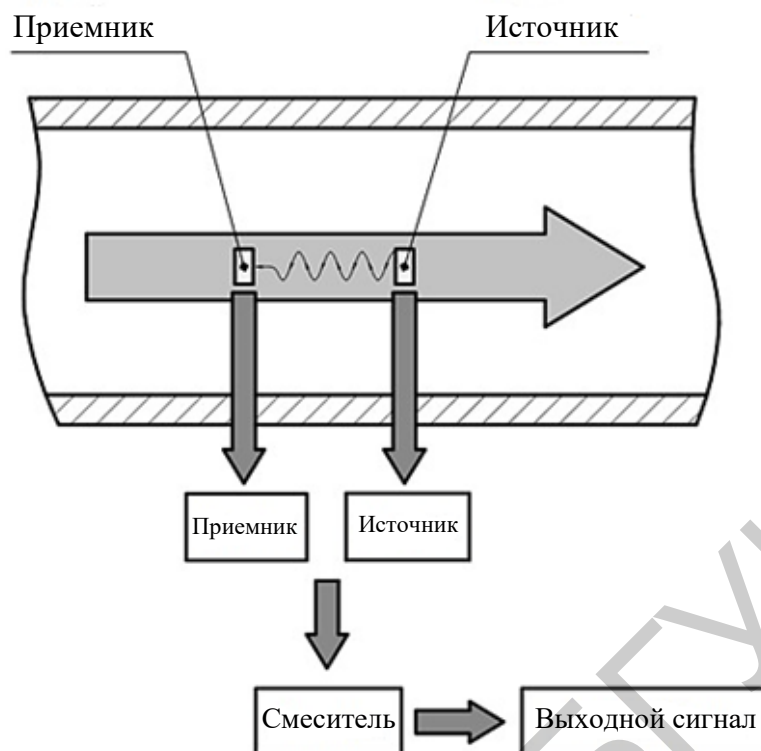


Рис. 3.6. Общая схема расположения ключевых элементов расходомера на эффекте Допплера

### 3.1.5.2. Ультразвуковые датчики сквозного луча

Ультразвуковые датчики сквозного луча (рис. 3.7) всегда состоят из двух отдельных компонентов: излучателя и приемника. Электронные компоненты, отвечающие за контроль и переключение выхода, находятся в приемнике.

Излучатель и приемник монтируются друг напротив друга. Когда объект разрывает звуковой пучок между излучателем и приемником, активируется переключающий выход датчика.

Чувствительность приемника можно отрегулировать в соответствии с расстоянием между излучателем и приемником и/или размером объекта путем программирования или с помощью потенциометра.

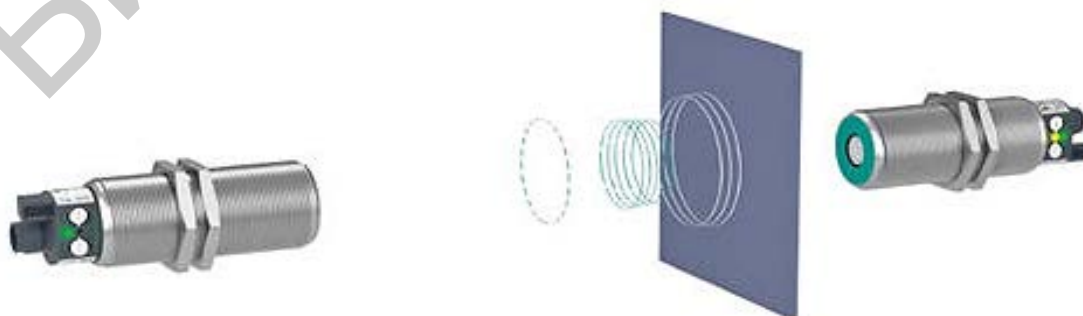


Рис. 3.7. Ультразвуковой датчик сквозного луча



### 3.1.5.3. Датчики двойного листа

Задача контроля слипания листов первоначально появилась в полиграфической промышленности. В этой отрасли быстрое и надежное обнаружение слипания листов бумаги имеет большое значение. Датчик непрерывно контролирует длину листа, когда он проходит между излучателем и приемником. Благодаря своей особой конструкции *датчики слипания листов* (рис. 3.8) *идеально подходят для использования в следующих областях:*

- определение подачи нескольких листов бумаги, пластмассы (например, винила), металла;
- обнаружение этикеток;
- обнаружение склейки.

*Датчики слипания листов идеально подходят для распознавания:*

- промежутков одного, двух и более листов;
- промежутков материала подложки, материала подложки с нанесенной наклейкой;
- промежутков одного слоя материала, двух слипшихся слоев материала;
- промежутков одной, двух и более пластин (например, листового металла).

*Возможности датчиков слипания листов:*

- контроль тонкой бумаги плотностью 10 г/м<sup>2</sup> до картона плотностью 2000 г/м<sup>2</sup>;
- обнаружение тонких пластмассовых или металлических пленок;
- программирование для различных материалов;
- возможность использования с глянцевыми и прозрачными материалами;
- автоматическая регулировка пороговых значений переключения в соответствии с изменением окружающих условий;
- высокая скорость обработки;
- нечувствительность к пыли и грязи.

*Области применения датчиков слипания листов:*

- печатные станки, в которых ультразвуковые датчики слипания листов защищают сложные механизмы от повреждения, предотвращая подачу двух листов или определяя замятие листа в машине;
- контроль клейких пленок в машинах для нанесения этикеток, включая подсчет этикеток;
- устройства вскрытия конвертов, которые проверяют, что открытые конверты полностью пусты;
- машины счета квитанций;
- упаковочное оборудование, в котором склейки определяют начало нового листа и конец предыдущего;
- распознавание промежутков, одинарных и слипшихся листов в бумагоперерабатывающем оборудовании.

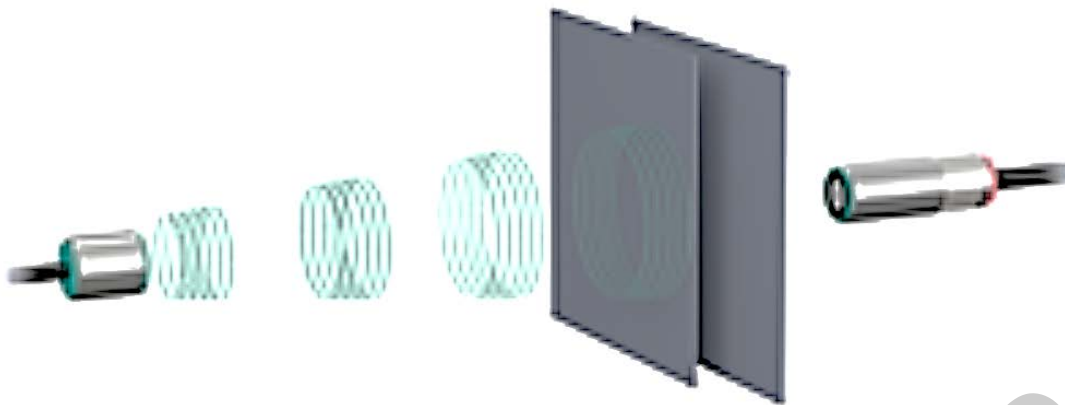


Рис. 3.8. Ультразвуковой датчик двойного листа

### 3.1.5.4. Ультразвуковой датчик расстояния *HC-SR04*

В данной лабораторной работе ультразвуковые датчики рассматриваются на примере датчика *HC-SR04* (рис 3.9). Данный датчик работает в диффузионном режиме.



Рис. 3.9. Внешний вид датчика *HC-SR04*

Бесконтактный направленный датчик *HC-SR04*, используя ультразвуковые волны, измеряет расстояние до объекта или просто обнаруживает препятствие на пути движения подвижной конструкции. На плате модуля размещены пьезоизлучатель ультразвука и воспринимающий отраженную волну микрофон. В отличие от инфракрасных дальномеров на ультразвуковой датчик *HC-SR04* не влияют источники света или цвет препятствия. Могут возникнуть затруднения при определении расстояния до пушистых или тонких объектов. Обращаем внимание, что скорость звука в воздухе зависит от температуры, что влияет на точность датчика. Типичными областями применения являются парковочные датчики, контроллеры уровня, устройства мониторинга местности и другие.

*Характеристики датчика HC-SR04:*

- 1) напряжение питания 5 В;
- 2) ток потребления в режимах:
  - а) ожидания до 2 мА;
  - б) работы 15 мА;

- 3) частота ультразвука 40 кГц;
- 4) угол обзора 15°;
- 5) рабочие температуры от – 15 до 70 °С;
- 6) измеряемое расстояние от 0,03 до 5 м с разрешающей способностью 3 мм.

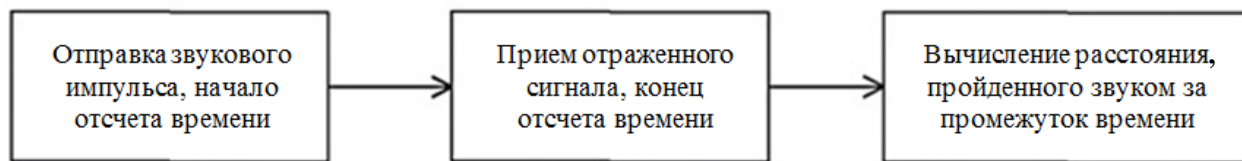


Рис. 3.10. Принцип работы HC-SR04

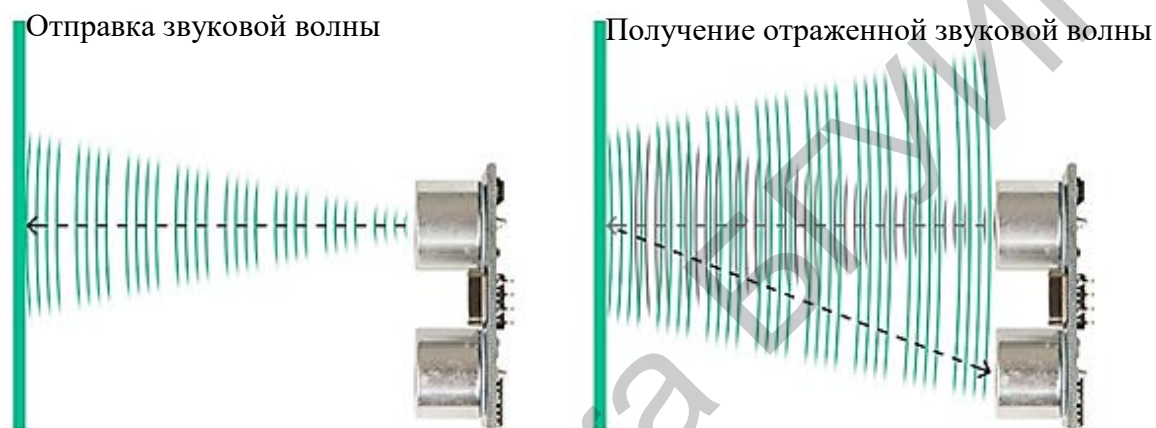


Рис. 3.11. Ход звуковых волн в HC-RS04

Расстояние вычисляется умножением скорости на время (в данном случае скорости распространения звуковой волны  $V$  на время ожидания эха  $T_{Echo}$ ). Но, таким образом, звуковая волна проходит расстояние от датчика до объекта и обратно, а нас интересует расстояние только до объекта, поэтому результат делим на два:

$$L = V \cdot \frac{T_{Echo}}{2},$$

где  $L$  – расстояние от датчика до предмета (м);

$V$  – скорость звука в воздухе (м/с);

$T_{Echo}$  – время ожидания эха (с).

Скорость звука в воздухе, в отличие от скорости света, – величина непостоянная и сильно зависит от температуры:

$$V^2 = \frac{\gamma R T}{M},$$

где  $V$  – скорость звука в воздухе (м/с);

$\gamma$  – показатель адиабаты воздуха (ед.),  $\gamma = 7/5$ ;

$R$  – универсальная газовая постоянная (Дж/моль·К),  $R = 8,3144598(48)$ ;

$T$  – абсолютная температура воздуха (К),  $T = t \text{ °C} + 273,15$ ;

$M$  – молекулярная масса воздуха (кг/моль),  $M = 0,02898$ .

Подставив в формулу известные значения  $\gamma$ ,  $R$ ,  $M$ , получим

$$V \approx 20,04158 \sqrt{T},$$

где  $T$  – абсолютная температура воздуха (К),  $T = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15$ .

Объединяя формулы вычисления  $V$  и  $L$ , переводим  $L$  из метров в сантиметры,  $T_{Echo}$  – из секунд в микросекунды,  $T$  – из кельвинов в градусы Цельсия, получаем

$$L \approx T_{Echo} \sqrt{(t + 273,15) / 1002,1},$$

где  $L$  – расстояние (см);

$T_{Echo}$  – время ожидания эха (мкс);

$t$  – температура воздуха ( $^\circ\text{C}$ ).

### 3.2. Практическая часть

#### 3.2.1. Исследовать зависимость относительной погрешности ультразвукового датчика от температуры

1. Изучить лабораторный стенд.
2. Установить температуру на датчике, соответствующую нормальным условиям (293 К). Тумблер «Вниз» стимулирует уменьшение температуры, тумблер «Вверх» – увеличение температуры, двойное нажатие приводит к изменению температуры сразу на пять градусов.
3. Установить мишень на некотором расстоянии.
4. Изменяя стимулируемую на датчике температуру, снять зависимость относительной погрешности датчика от температуры (в пределах рабочих температур) и заполнить табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений зависимости относительной погрешности ультразвукового датчика от температуры

$T, \text{ } ^\circ\text{C}$	$L, \text{ см}$	$\varepsilon, \%$
-15		
...		
70		

Здесь  $\varepsilon$  – отклонение показаний датчика от показаний при нормальных условиях, которое рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{L_0}{L_T},$$

где  $L_T$  – расстояние, измеряемое датчиком при определенной температуре.

5. Пользуясь полученными данными, построить графики измерения расстояния (зависимого от температуры и по отклонениям показаний датчика от температуры).

### 3.2.2. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Табличные и графические результаты измерений.
4. Анализ полученных данных и вывод.

### 3.2.3. Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки ультразвуковых датчиков расстояния.
2. Опишите оппозиторный, диффузионный и рефлекторный режимы работы ультразвуковых датчиков.
3. Назовите преимущества и недостатки оппозиторного и диффузионного режимов работы ультразвуковых датчиков расстояния.
4. Опишите принцип работы ультразвукового датчика расстояния *HC-SR04*.
5. Расскажите о влиянии температуры на точность измерения ультразвуковых датчиков расстояния.
6. Расскажите о влиянии относительной влажности воздуха на точность измерения ультразвуковых датчиков.
7. Расскажите о влиянии частоты, расстояния и среды распространения звука на амплитуду звукового давления.
8. Как можно измерить реальную комнатную температуру с помощью линейки и датчика?

### Список использованных источников

1. ГОСТ Р МЭК 60050–441–2012. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и предохранители. Глава 441. Термины и определения. – Введ. 2013–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 2013.
2. Ультразвуковой датчик расстояния [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://elektrik24.net/elektrooborudovanie/datchiki/rasstoyaniya>.
3. Ультразвуковой датчик *HC-SR04* [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа : <https://arduino-kit.ru/catalog/id/ultrazvukovoy-datchik-hc-sr04>.
4. Ультразвуковой датчик измерения расстояния *HC-SR04* [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа : <http://wiki.iarduino.ru/page/ultrazvukovoy-datchikizmereniya-rasstoyaniya-hc-sr04/>.
5. Ультразвуковые датчики [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/automation/1548-ultrazvukovye-datchiki>.
6. Ультразвуковые датчики. Особенности применения и выбора [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://mega-sensor.ru/articls/ultrazvukovye-datchiki-osobennosti-primeneniya-i-vybora>.
7. Ультразвуковые датчики [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : [https://www.pepperl-fuchs.com/russia/ru/classid\\_182](https://www.pepperl-fuchs.com/russia/ru/classid_182).

8. ГОСТ Р 50030.5.2–99. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 5-2. Аппараты и коммутационные элементы цепей управления. Бесконтактные датчики. – Введ. 2002–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2002.

9. Ультразвуковые датчики для систем управления [Электронный ресурс]. – 2003. – Режим доступа : <https://www.cta.ru>.

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить теорию и основные характеристики индуктивных преобразователей, а также методы определения основных параметров индуктивных преобразователей.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

##### 4.1.1. Однотактный индуктивный датчик

Индуктивные датчики (измерители-преобразователи) предназначены для измерения сравнительно малых угловых или линейных механических перемещений и их преобразования в электрический сигнал переменного тока. В основу работы индуктивного измерительного преобразователя положено свойство дросселя с воздушным зазором изменять индуктивность при изменении величины воздушного зазора. Простейший индуктивный датчик состоит из ярма 1, на котором помещается обмотка 2, и якоря 3, удерживаемого пружинами (рис. 4.1, а). Ярмо и якорь выполняются из шихтованного магнитомягкого материала, обмотка наматывается медным проводом с малым активным сопротивлением.

На обмотку 2 через сопротивление нагрузки  $R_H$  подается напряжение питания переменного тока с частотой от 50 Гц до нескольких килогерцев. Ток, протекающий в цепи обмотки, будет равен

$$I = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{(R_H + r_d)^2 + (\omega L)^2}},$$

где  $r_d$  – активное сопротивление дросселя;

$\omega$  – частота питающего напряжения;

$L$  – индуктивность обмотки датчика.

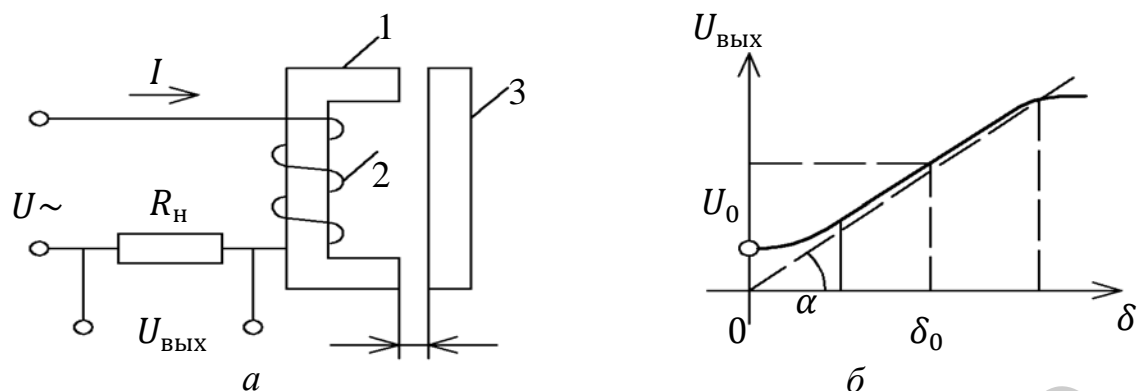


Рис. 4.1. Однотактный индуктивный датчик:  
*a* – индуктивный преобразователь; *б* – характеристика преобразователя

Поскольку активное сопротивление  $R = R_H + r_d$  представляет собой постоянную величину, то изменение тока  $I$  может происходить только за счет изменения индуктивной составляющей сопротивления  $x_l = \omega xL$ , которая, в свою очередь, зависит от величины воздушного зазора  $\delta$ .

Таким образом, каждому значению зазора  $\delta$  соответствует вполне определенное значение тока  $I$ , создающего падение напряжения на резисторе  $R_H U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot R_H$ , представляющее собой выходной сигнал измерительного преобразователя.

В практически создаваемых измерительных преобразователях активное сопротивление обмотки  $r_d$ , а также сопротивление нагрузки намного меньше индуктивного сопротивления, поэтому

$$U_{\text{ВЫХ}} \cong \frac{5U_{\sim} \cdot R_H \cdot 10^8}{\mu_0 \cdot S \cdot W^2 \cdot \omega} \cdot \delta = K_d \cdot \delta,$$

где  $U_{\sim}$  – входное напряжение;

$R_H$  – сопротивление нагрузки;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$S$  – площадь поперечного сечения катушки;

$W$  – количество витков катушки;

$\omega$  – частота питающего напряжения;

$\delta$  – величина воздушного зазора;

$K_d = \text{const}$ , так как все входящие величины, кроме  $\delta$ , остаются постоянными.

Таким образом, напряжение на выходе датчика при изменении зазора изменяется по линейному закону, т. е. статическая характеристика представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом наклона  $\alpha = \text{arctg}(k)$  к оси абсцисс (см. рис. 4.1, *б*). Это идеальная статическая характеристика. Реальная характеристика приведена на рис. 4.1, *б* сплошной линией. Отклонение ее от идеальной при малых значениях  $\delta$  объясняется допущением того, что  $R_{\text{м.ж}} \ll R_{\text{м.в}}$ . Если  $\delta$  достаточно мало, то магнитное сопротивление железа ( $R_{\text{м.ж}}$ ) становится соизмеримым с магнитным сопротивлением воздуш-

ного зазора ( $R_{м.в}$ ), и, следовательно, такое допущение вносит соответствующую погрешность. Отклонение реальной характеристики от линейной функции при больших значениях  $\delta$  связано с другим допущением, согласно которому сопротивление нагрузки  $R_H$  считается пренебрежимо малым по сравнению с индуктивным сопротивлением. Но при больших значениях  $\delta$  величина индуктивности  $L$  становится малой, поэтому индуктивная составляющая  $W \cdot L$  соизмерима с величиной  $R_H + r_d$ , что и определяет искажение характеристики.

Анализ принципа действия и статической характеристики однотактного индуктивного измерительного преобразователя позволяет отметить *следующие его недостатки*:

- фаза выходного сигнала не зависит от направления перемещения якоря;
- для измерения перемещения в обоих направлениях необходим начальный зазор  $\delta_0$ , что приводит к наличию начального значения напряжения  $U_0$ ;
- на якорь постоянно действует электромагнитная сила, стремящаяся притянуть его к ядру. При большой мощности сигнала выходной цепи она может принимать весомые значения, что требует введения компенсирующих сил, создаваемых противодействующими пружинами, а это значительно усложняет устройство.

В силу указанных недостатков однотактные индуктивные измерительные преобразователи используются только в качестве вспомогательных элементов систем. В основных цепях систем управления применяют двухтактные индуктивные измерительные преобразователи.

#### **4.1.2. Двухтактный индуктивный датчик**

Существуют две основные схемы включения двухтактных индуктивных измерительных преобразователей: дифференциальная и мостовая.

##### **4.1.2.1. Дифференциальная схема**

Дифференциальная схема включения индуктивного измерительного преобразователя предполагает наличие трансформатора со средней точкой (рис. 4.2). Обе обмотки измерительного преобразователя имеют одинаковое число витков  $W$ . Сердечники обмоток идентичны по своим характеристикам. Сопротивление нагрузки включается между средней точкой обмотки трансформатора и средней точкой обмоток измерительного преобразователя.



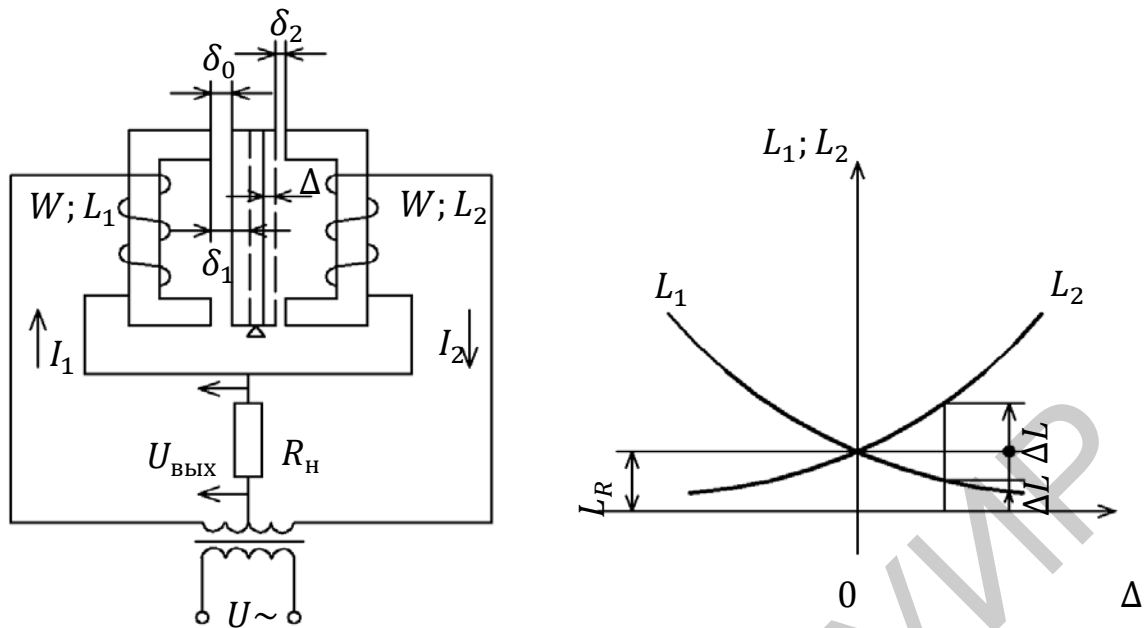


Рис. 4.2. Дифференциальная схема двухтактного индуктивного датчика

При таком включении ток, протекающий по сопротивлению нагрузки, равен разности токов правой и левой половин схемы:

$$I_{\text{вых}} = I_1 - I_2,$$

а выходное напряжение определяется как

$$U_{\text{вых}} = (I_1 - I_2) \cdot R_{\text{н}}.$$

В исходном положении зазоры между якорем и ярмом одинаковы:  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$ . Тогда индуктивности каждой половины датчика, определяемые величиной зазоров,  $L_1 = L_2 = L_0$ . Следовательно, токи  $I_1$  и  $I_2$  равны по модулю, но противоположны по фазе, а ток нагрузки равен нулю. Значит, и выходное напряжение датчика равно нулю.

Таким образом, двухтактный индуктивный датчик обеспечивает равенство нулю выходного сигнала ( $U_{\text{вых}} = 0$ ) при нулевом сигнале на ходе ( $\Delta = 0$ ).

При перемещении якоря на величину  $\Delta$  ширина зазоров изменяется: один увеличивается, а второй уменьшается на одну и ту же величину, а именно:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta,$$

$$\delta_2 = \delta_0 - \Delta.$$

Это приводит к изменению индуктивностей, так как магнитное сопротивление первого зазора растет, а второго падает, что соответствует уменьшению индуктивности  $L_1$  и увеличению индуктивности  $L_2$ . При небольших перемещениях индуктивность изменяется почти по линейному закону. На рис. 4.2 изображен график зависимости  $L = f(\Delta)$  для обеих половин индуктивного датчика. В соответствии с графиком  $L_1 = L_0 - \Delta_l$ ,  $L_2 = L_0 + \Delta_l$ . Изменение индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  приведет к нарушению балансов токов: ток  $I_1$  возрастет, а ток  $I_2$  уменьшится. В нагрузке потечет результирующий ток, создающий выходное напряжение.

#### 4.1.2.2. Мостовая схема

Мостовая схема двухтактного индуктивного датчика приведена на рис. 4.3. Если в дифференциальной схеме исследовалась разность токов в нагрузке, то в мостовой схеме следует рассматривать разность падений напряжений на плечах моста, которая определяет выходное напряжение двухтактного индуктивного датчика, а именно:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}} &= U_1 - U_2, \\ U_1 &= I_1 \cdot Z, \\ U_2 &= I_2 \cdot Z. \end{aligned}$$

Принцип действия мостовой схемы включения аналогичен принципу действия дифференциальной схемы.

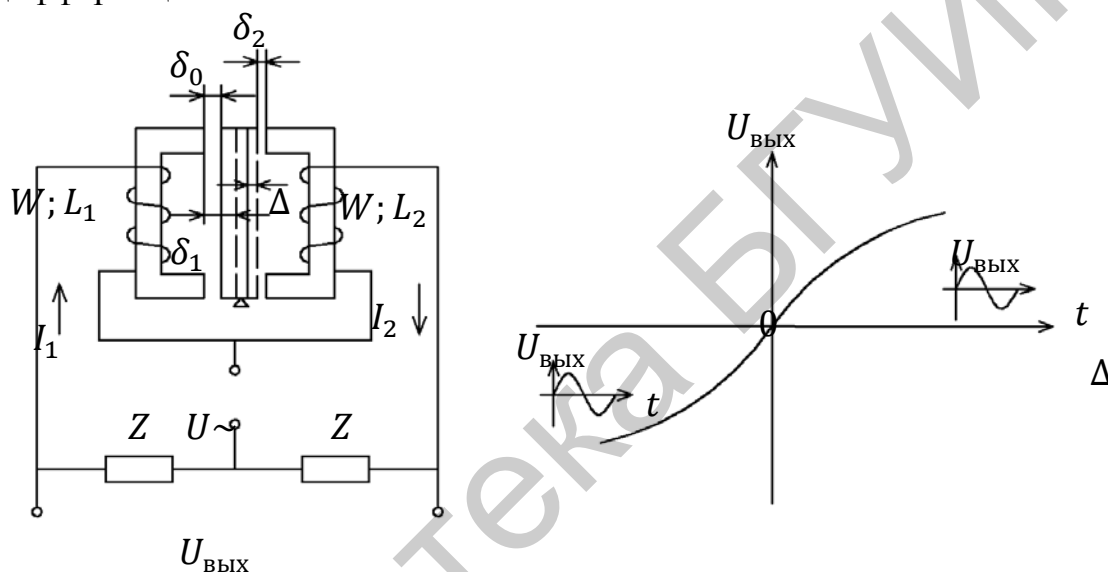


Рис. 4.3. Мостовая схема двухтактного индуктивного датчика

Статическая характеристика двухтактного индуктивного измерительного преобразователя представляет собой функцию вида  $U_{\text{ВЫХ}} = k \cdot \Delta$ , что соответствует прямой, проходящей через начало координат под углом  $\alpha = \arctg(k)$  к оси абсцисс (см. рис. 4.3). При изменении знака приращения входной координаты  $\Delta$  фаза выходного сигнала меняется на противоположную. С некоторого значения  $\Delta$  реальная статическая характеристика индуктивного датчика не совпадает с линейной характеристикой вследствие того, что индуктивность одного из плеч измерителя-преобразователя становится малой, а индуктивное сопротивление  $W \cdot L$  соизмеримо с сопротивлением нагрузки  $r$ , в связи с чем появляется завал линейной характеристики. В результате этого статическая характеристика двухтактного индуктивного измерительного преобразователя при некоторой ее идеализации может быть представлена нелинейностью типа «насыщение».

Чувствительность измерительного преобразователя зависит от напряжения и частоты источника питания, сопротивления нагрузки, индуктивности дросселя и начального зазора между якорем и ярмом.

С повышением питающего напряжения чувствительность датчика повышается, но это влечет за собой увеличение его габаритных размеров и массы. Уменьшение начального зазора  $\delta_0$  также приводит к повышению чувствительности измерительного преобразователя, однако в целях предотвращения замыкания якоря с ярмом накладываются ограничения на минимальную величину зазора  $\delta_0$ , согласно которым последний должен быть вдвое больше максимального хода якоря:

$$\delta_0 = 2 \cdot \Delta_{\max}.$$

Разрешающая способность (чувствительность) некоторых измерительных преобразователей при тщательной экранировке и балансировке схемы в нейтральном положении якоря составляет сотые доли микрометра. Выходная мощность индуктивных датчиков может достигать десятков ватт. Однако с увеличением выходной мощности возрастают габаритные размеры датчиков.

Снижение габаритов достигается увеличением частоты, при этом входное усилие уменьшается. Но при больших значениях частоты начинают влиять межвитковые емкости, что затрудняет балансировку датчика в нейтральном положении.

Двухтактные индуктивные измерительные преобразователи с плоскопараллельным воздушным зазором используются при изменении малых перемещений от долей микрометра до 3–5 мм.

#### 4.1.3. Трансформаторные индуктивные измерительные преобразователи

Расширить диапазон измеряемых перемещений можно путем применения датчиков, конструктивное исполнение которых приведено на рис. 4.4.

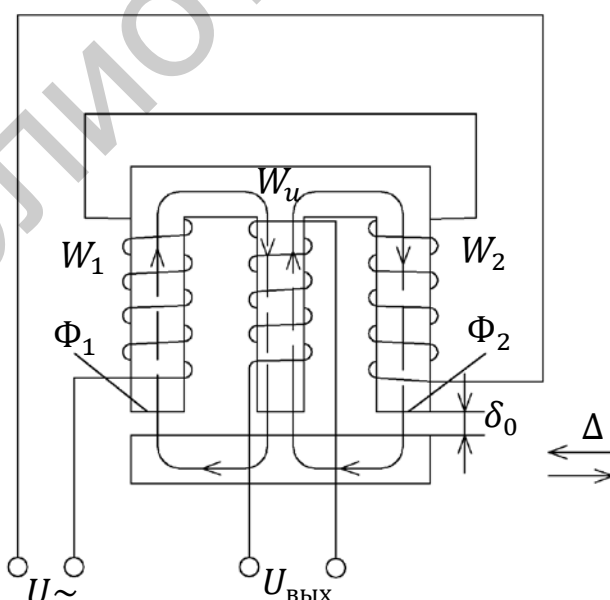


Рис. 4.4. Трансформаторный индуктивный датчик

Такие измерительные преобразователи допускают измерение перемещений до нескольких десятков сантиметров. Включение их может производиться как по мостовой, так и по дифференциальной схемам.

Трансформаторные индуктивные измерительные преобразователи, или индукционные датчики, предназначены для измерения регулируемой координаты положения, представляющие собой механическое перемещение малых и больших диапазонов.

Принцип действия трансформаторных индуктивных измерительных преобразователей основан на использовании изменения взаимной индуктивности между обмотками при перемещении якоря (см. рис. 4.4, а).

Обмотки цепи питания  $W_1$  и  $W_2$  включаются встречно и имеют одинаковое число витков, т. е.  $W_1 = W_2 = W$ .

Так как зазор  $\delta_0$  постоянен, то на величину индуктивности оказывает влияние только площадь перекрытия сердечника  $S$ , которая изменяется при перемещении якоря.

В нейтральном положении, когда  $\Delta = 0$ , площади перекрытия  $S_1$  и  $S_2$  равны.

При перемещении якоря на величину  $\Delta$  происходит изменение площадей перекрытия крайних сердечников на  $\Delta \cdot S$ .

Учитывая, что приращение площади  $\Delta \cdot S$  пропорционально перемещению якоря  $\Delta$ , определяем:

$$U_{\text{вых}} = k \cdot \Delta.$$

Таким образом, статическая характеристика трансформаторного индуктивного измерительного преобразователя в рабочем диапазоне представляет собой линейную зависимость.

*К преимуществам индуктивных измерительных преобразователей следует отнести:*

- отсутствие скользящих контактов (за исключением ферромагнитного датчика);
- высокую чувствительность;
- высокую разрешающую способность;
- надежность конструкции;
- малую массу и габариты при питании напряжением высокой частоты;
- более высокий КПД по сравнению с потенциометрическими измерительными преобразователями.

*Недостатками индуктивных измерительных преобразователей являются:*

- трудность регулирования, т. е. трудность получения нулевого значения выходного напряжения при нейтральном положении якоря;
- возможность работы только на переменном токе;
- ограниченность диапазона линейности статической характеристики за счет краевого эффекта, насыщения и других нелинейных свойств магнитопровода;

– зависимость коэффициента преобразования от частоты и напряжения питания, т. е. необходимость экранировки обмоток дросселя.

## 4.2. Практическая часть

### 4.2.1. Исследование индуктивного датчика

1. Изучить лабораторный стенд.
2. Измерить сопротивление нагрузок R31 и R32, результаты занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений сопротивления нагрузок R31 и R32

Параметры	R, Ом
R31	
R32	

3. Собрать схему, как показано на рис. 4.5.

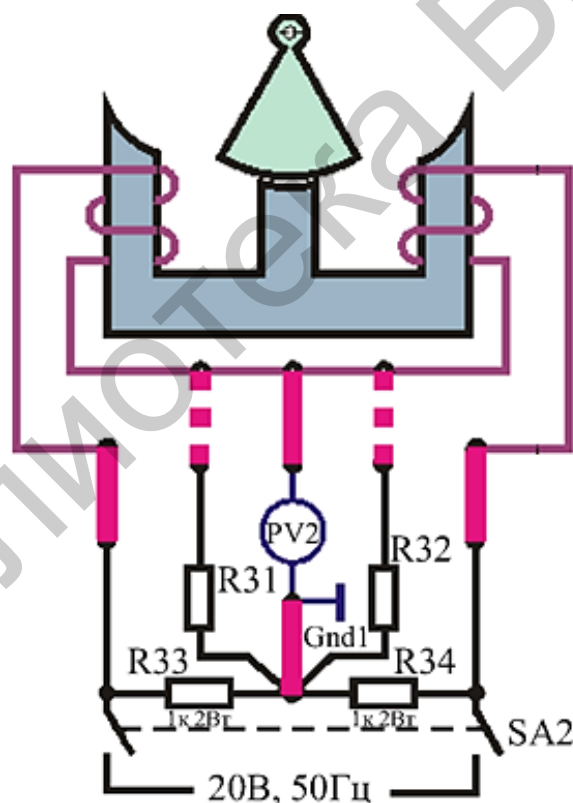


Рис. 4.5. Схема индуктивного датчика

4. Убедиться, что схема собрана правильно:
  - на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки;
  - тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»);

– регуляторы R21, R22 установить в крайнее левое положение.

Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, тумблеры SA10, SA11 установить в положение «Измерение».

5. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

6. Включить переключатели SA2, SA3.

7. Плавно вращая ручку  $BL$  вправо и влево от нуля, определить диапазон угла поворота, при котором  $U_{\text{вых}}$  нарастает от нуля до максимума. Выбрать в полученном диапазоне пять – шесть точек угла  $\varphi$ , данные занести в табл. 4.2.

8. Плавно поворачивая ручку датчика BC, снять статическую характеристику  $U_{\text{вых}} = f(\varphi)$  в режиме холостого хода. Данные занести в табл. 4.2.

9. Плавно поворачивая ручку датчика BC, снять статическую характеристику  $U_{\text{вых}} = f(\varphi)$  при подключении нагрузки R31, R32. Данные занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений  $U_{\text{вых}}$  индуктивного датчика

$\varphi, ^\circ$	$U_{\text{вых}}, \text{В (х.х)}$	$U_{\text{вых}}, \text{В (R31)}$	$U_{\text{вых}}, \text{В (R32)}$
0			
...			
max			

10. Выключить переключатели SA2, SA3.

11. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

12. Разобрать схему.

13. Пользуясь данными из табл. 4.2, построить характеристики  $U_{\text{вых}} = f(\varphi)$  для всех случаев.

#### 4.2.2. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема исследования индуктивного датчика.
4. Табличные и графические результаты.
5. Анализ полученных данных и вывод.

#### 4.2.3. Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы индуктивных датчиков.
2. Опишите принцип работы индукционных датчиков.
3. Каковы виды индуктивных датчиков?
4. Какова конструкция индуктивного датчика угла?
5. Каковы основные параметры и характеристики индуктивных и индукционных датчиков?
6. Расскажите об особенностях применения датчиков.

7. Опишите схемы включения двухтактных датчиков.
8. Каковы достоинства и недостатки индуктивных датчиков?
9. Опишите принцип действия тахометрического преобразователя.
10. Каковы пути увеличения точности измерения углов?
11. Опишите способы уменьшения погрешности датчиков.

### **Список использованных источников**

1. Воробьев, Е. А. Датчики. Датчики – преобразователи информации : учеб. пособие / Е. А. Воробьев. – СПб. : ГУАП, 2001. – 43 с.
2. Боднер, В. А. Измерительные приборы / В. А. Боднер, А. В. Алферов. – М. : Изд. стандартов, 1986. – 390 с.
3. Измерение электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие / Н. Н. Евтихий [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Евтихьева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин : учеб. пособие / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М. : Высш. шк., 1998. – 447 с.
5. Миловидов, С. С. Детали машин и приборов : учеб. пособие / С. С. Миловидов. – М. : Высш. шк., 1971. – 488 с.
6. Электрические измерения неэлектрических величин / П. В. Новицкий [и др.]; под ред. П. В. Новицкого. – Ленинград : Энергия, 1975. – 576 с.
7. Преимущества и недостатки индуктивных измерительных преобразователей [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://wikipage.com.ua/1x1c45.html>.
8. Математические основы теории автоматического регулирования : учеб. пособие. В 2 т. Т. 1 / Иванов В. А. [и др.]; под ред. Б. К. Чемоданова. – М. : Высш. шк., 1977. – 366с.
9. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Н. П. Попов. – М. : Наука, 1966. – 992с.
10. Виглеб, Г. Датчики / Г. Виглеб ; пер. с нем. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
11. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий; под ред. П. В. Новицкого. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1975. – 576 с.
12. Кукуш, В. Д. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие / В. Д. Кукуш. – М. : Радио и связь, 1985. – 368 с.
13. Электрические измерения / Л. И. Байда [и др.]; под ред. А. В. Фремке, Е. М. Душина. – 5-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергия, 1980. – 392 с.
14. Электрические измерения / под ред. В. Н. Малиновского. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 245 с.
15. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин [и др.]; под ред. П. В. Новицкого. – Ленинград : Энергия, 1975. – 576 с.
16. Мирский, Г. Л. Электронные измерения / Г. Л. Мирский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

## Лабораторная работа №5

### ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить методы измерения температуры на основе аналоговых сигналов при помощи операционных усилителей.

#### 5.1. Краткие теоретические сведения

##### 5.1.1. Общие сведения

*Температура* – это физическая величина, характеризующая степень нагрева предмета, измеряемую в градусах по шкалам Цельсия, Фаренгейта, Кельвина и др.

Температура может измеряться контактным и бесконтактным способами. *Для измерения температуры контактным методом применяют термометры:*

- сопротивления (использующие зависимость электрического сопротивления вещества от его температуры);
- термоэлектрические (основанные на измерении возникающей термоэлектродвижущей силы в месте контакта двух разнородных проводников);
- расширения (измеряющие температуру по тепловому расширению жидкостей или твердых тел);
- манометрические (использующие зависимость давления газа или насыщенных паров жидкости от температуры).

*Для измерения температуры бесконтактным методом используют пирометры:*

- яркостные (измеряющие температуру по яркости накаливаемого тела в заданном узком диапазоне длин волн);
- радиационные (измеряющие температуру по тепловому действию суммарного излучения нагретого тела во всем диапазоне длин волн);
- цветовые (принцип действия которых основан на измерении отношения энергий, излучаемых телом в разных спектральных диапазонах).

*По характеру получения информации различают пирометры* для локального измерения температуры в данной точке объекта и для анализа температурных полей.

##### 5.1.2. Термисторы термосопротивления

Термин «термистор» образовался в результате соединения двух слов: «тепловой» и «резистор». Термисторы относятся к классу датчиков абсолютной температуры, показания которых соответствуют абсолютной температурной шкале. Все термисторы делятся на две категории:



– с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (*NTC*-термисторы);

– с положительным температурным коэффициентом сопротивления (*PTC*-термисторы);

У *PTC*-термисторов с ростом температуры растет их сопротивление; у *NTC*-термисторов увеличение температуры приводит к падению их сопротивления.

Термисторы изготавливаются на основе полупроводникового оксида металлов, спрессованного для получения заданной формы. Механическая прочность и защита от воздействий окружающей среды обеспечивается с помощью металлического корпуса или защитного изолирующего слоя. Термисторы имеют нелинейную вольт-амперную характеристику и очень высокую температурную чувствительность по сравнению с другими типами датчиков температуры.

Основные параметры термисторов с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) приведены в табл. 5.1, а с отрицательным – в табл. 5.2. Следует учесть, что  $R_n$  – номинальное сопротивление,  $P_{max}$  – максимально допустимая мощность рассеивания,  $B$  – коэффициент температурной чувствительности,  $\tau$  – постоянная времени.

Таблица 5.1

Параметры *PTC*-термисторов

Тип СТ	Диапазон $R_n$ при 20 °С, кОм	$P_{max}$ , Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Диапазон температур ТКС > 0, °С	ТКС при 20 °С, %/°С	Кратность изменения сопротивления в области ТКС > 0	$\tau$ , с
5-1	0,02–0,15	0,7	–20...+200	100–200	20	1000	20
6-1 А	0,04–0,4	1,1	–60...+155	40–155	10	1000	20
6-4 Г	5–25	0,8	–60...+125	–20...+125	2–6	5–15	40
10-1	30–300	0,5	–60...+175	100–175	–	–	–
5-2-127 В	15–35	3	–60...+60	60–150	15	10 000	–
5-2-220 В	20–50	3	–60...+85	60–150	15	10 000	–

Параметры NTC-термисторов

Тип	Диапазон $R_H$ при 20 °С, кОм	Допуск, %	$P_{max}$ , Вт	Диапазон рабочих температур, °С	ТКС при 20 °С, %/°С	$B$ , К	$\tau$ , с
КМТ-1	22–1000	$\pm 20$	1000	–60...+180	4,2–8,4	3600– –7200	85
КМТ-8	0,1–10	$\pm 10, \pm 20$	600	0–125	4,2–8,4	3600– –7200	909
КМТ-10	100–3300	$\pm 20$	250 (в 2 с)	0–125	>4,2	>3600	75
КМТ-12	0,1–10	$\pm 30$	700	–60...+125	4,2–8,4	3600– –7200	–
ММТ-1	12–220	$\pm 20$	500	–60...+125	2,4–5,0	2060– –4300	85

Термисторы в целом можно классифицировать на следующие:

- термисторы низкотемпературного класса (рабочая температура ниже 170 К);
- термисторы среднетемпературного класса (рабочая температура от 170 до 510 К);
- термисторы высокотемпературного класса (рабочая температура от 570 К и выше);
- отдельный класс высокотемпературных термисторов (рабочая температура от 900 до 1300 К).

Основными параметрами термисторов являются:

- 1)  $R_{20}$  – холодное сопротивление термистора, определяющее сопротивление тела полупроводника при температуре окружающей среды 20 °С;
- 2)  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, который выражает процентное изменение сопротивления полупроводника при изменении температуры на 1 °С, отнесенное к величине холодного сопротивления:

$$\alpha = \frac{R_{19,5} - R_{20,5}}{R_{20}}$$

где  $R_{19,5}$  и  $R_{20,5}$  – сопротивления тела полупроводника при температуре 19,5 и 20,5 °С соответственно;

- 3)  $\tau$  – постоянная времени, характеризующая тепловую инерционность термистора в воздухе. Она соответствует времени, в течение которого температура термосопротивления изменяется на 63 % от разности температур самого термистора и окружающей среды;

- 4)  $H$  – постоянная рассеивания, измеряемая в мВт/1 °С и численно равная мощности, рассеиваемой термистором, при разности температур между окружающей средой и телом термистора в 1 °С;

5)  $C$  – теплоемкость, измеряемая в джоулях на  $1\text{ }^\circ\text{C}$  и соответствующая количеству тепла, которое необходимо сообщить термистору для повышения его температуры на  $1\text{ }^\circ\text{C}$ ;

б)  $G$  – коэффициент энергетической чувствительности, численно равный приращению мощности, рассеиваемой на термисторе, при уменьшении его сопротивления на  $1\%$ .

Часто для термосопротивлений известна или может быть рассчитана математическая зависимость сопротивления от температуры, однако при проведении прецизионных измерений или при работе в широком температурном диапазоне термосопротивления ее необходимо индивидуально калибровать. В процессе калибровки измеряется сопротивление термистора при помещении его в среду с точно известной температурой, при необходимости эта процедура выполняется при разных температурах (градуировка шкалы). Качество проведенной калибровки зависит от точности эталонного термометра. В зависимости от заданного уровня точности калибровка термистора может проводиться на основе одной из известных аппроксимационных моделей.

Термисторы широко применяются в многочисленных областях электроники, особенно там, где важен точный контроль за температурным процессом. Это актуально для аппаратуры передачи данных, компьютерной техники, высокопроизводительных центральных процессорных устройств (ЦПУ) и промышленного оборудования высокой точности.

### 5.1.3. Температурные сенсоры в интегральных микросхемах

Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода является температурочувствительной. Выражение для идеального диода представлено ниже:

$$i_d = i_s \left[ \exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) - 1 \right],$$

где  $i_d$  – суммарный ток, текущий через диод;

$i_s$  – обратный ток насыщения  $p$ - $n$ -перехода;

$e$  – абсолютное значение заряда электрона;

$V_d$  – приложенное к диоду напряжение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура (К).

Преобразование дает

$$V_d = \frac{kT}{e} \left( \frac{i_d}{i_s} + 1 \right).$$

Таким образом, если используется источник тока, обеспечивающий постоянный  $i_d$ , то напряжение  $V_d$  будет пропорционально температуре. Из экспериментальных данных установлено для температурной зависимости прямого падения напряжения на переходе (приблизительно  $0,7\text{ В}$  при  $25\text{ }^\circ\text{C}$  для кремниевого прибора), что реальный отклик отличается от предсказанного. Можно определить температурную чувствительность по формуле

$$\frac{dV_d}{dT} = \frac{k}{e} \ln \left( \frac{i_d}{i_s} + 1 \right).$$

Если взять прямой ток в  $10^3$  раз больше обратного тока насыщения, то получим теоретическую температурную чувствительность порядка +0,6 мВ/К. Эмпирический результат – это константа: 2 мВ/К в диапазоне от 50 до 400 К. Данное несоответствие является следствием зависимости обратного тока насыщения от температуры.

Переход база – эмиттер в биполярном транзисторе может быть использован так же, как диод. И он обладает лучшими характеристиками. На практике транзистор с «закороченными» выводами коллектора и базы является наилучшим прибором. В целом приборы на *p-n*-переходе относят к температурно-зависимым устройствам, пропорциональным абсолютной температуре.

Для улучшения характеристик два идентичных транзистора формируются на одном чипе, и они работают в режиме постоянного значения отношения плотности коллекторного тока  $r$ . При этих условиях разница между падением напряжения база – эмиттера каждого транзистора может быть представлена в виде

$$\Delta V_{BE} = \left( \frac{kT}{e} \right) \ln r,$$

где  $\Delta V_{BE}$  – разница между падением напряжения базы – эмиттера,

$r$  – плотность коллекторного тока.

С таким типом конструкций обычно ассоциируются температурно-зависимые устройства.

Тонкопленочные резисторы с низким температурным коэффициентом сопротивления конвертируют напряжение в ток с помощью устройств «пропорциональной абсолютной температуры».

Изменение линейного выхода по току в 1 мкА соответствует диапазону температур от 55 до 150 °С. Ошибка в устройствах с положительным температурным коэффициентом может быть 0,25 °С при комнатной температуре и 0,75 °С во всех других диапазонах. Эти устройства изготавливаются в металлических или пластиковых восьмивыводных корпусах, что делает их пригодными при установке на плату для обеспечения температурной компенсации или сигнализации. Они также могут быть установлены на трубы и жилые помещения (с использованием термопроводящего цемента). Устройства применялись также для измерения потоков, анемометрии и уровня жидкости. Защита от влаги осуществляется простой влагозащитной оплеткой. При их применении в более сухих условиях могут понадобиться обшивка или покрытие.

Параметры датчиков температуры с аналоговым выходом можно сравнить в сводной табл. 5.3.

Таблица 5.3

Параметры датчиков температуры с аналоговым выходом

Наименование	Температурный диапазон, °С	Точность, ±°С	Чувствительность, мВ/°С	$U_{пит}$ , В	$I_{пит}$ , мКА
<i>LM19C</i>	-55...+130	3,5	-11,7	2,4-5,5	10,0
<i>LM20S</i>	-40...+125	3,5	-11,7	2,4-5,5	10,0
<i>LM35</i>	-55...+150	1,5	10,0	4,0-30,0	105,0
<i>LM50B</i>	-25...+100	2,0	10,0	4,5-10,0	180,0
<i>LM60B</i>	-25...+125	3,0	6,25	2,7-10,0	125,0
<i>LM135A</i>	-55...+150	1,3	10,0	-	>400,0
<i>LM94021</i>	-50...+150	1,5	-5,5...-13,6, регулируется	1,5-5,5	9,0

Основные технические параметры датчиков температуры с цифровым выходом приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Параметры датчиков с цифровым выходом

Наименование	Температурный диапазон, °С	Точность, °С	Разрешение, бит	Разрешение, °С	$U_{пит}$ , В	$I_{пит}$ , мКА
<i>LM70</i>	-55...+150	+3,5/-2	11	0,125	2,65-5,5	260
<i>LM71</i>	-40...+150	+3,5/-2	14	0,03125	2,65-5,5	300
<i>LM74</i>	-55...+150	±3	13	0,0625	2,65-5,5	265
<i>LM76</i>	-55...+150	±1	13	0,0625	3,0-5,5	250
<i>LM92</i>	-55...+150	±1,5	13	0,0625	2,7-5,5	350
<i>LM95010</i>	-20...+125	±2	10	0,25	3,0-3,6	500
<i>LM95071</i>	-40...+150	±2	14	0,03125	2,4-5,5	280

#### 5.1.4. Термопары

Термопары – это термоэлектрические контактные датчики, которые состоят из двух разных по физическим свойствам проводников и соединений этих проводников (пар). Термопары не требуют внешнего источника питания и сами вырабатывают напряжение в зависимости от изменения температуры. Это надежные и недорогие датчики температуры, широко используемые в различных измерительных системах. Термопары имеют высокую линейность и точность измерений.

Принцип действия термопары основан на явлении возникновения контактной разности потенциалов при соприкосновении двух различных металлов. Причиной этого являются неодинаковые значения работ выхода электронов и различные значения концентрации свободных электронов в соприкасающихся металлах.

Термопара состоит из двух металлов, сваренных на одном конце. Эта ее часть помещается в месте замера температуры. Два свободных конца подключаются к измерительной схеме (милливольтметру).

Если спай двух металлов *A* и *B* (термопара) имеет температуру  $T_1$ , а свободные (неспаянные) концы – температуру  $T_2$ , причем  $T_1 > T_2$ , то между свободными концами возникает термоЭДС:

$$\varepsilon = \alpha_{A-B}(T_1 - T_2),$$

где  $\alpha_{A-B} = k/e \cdot \ln(n_1/n_2)$  – коэффициент термоЭДС или относительная удельная термоЭДС;

$k$  – постоянная Больцмана;

$e$  – заряд электрона;

$n_1, n_2$  – концентрации свободных электронов в соприкасающихся металлах.

Наиболее распространены термопары платино-платинородиевые, хромель-алюминиевые, хромель-копелевые, железо-константановые, алюминиевые. Термопары пригодны для измерения температур в диапазоне от 0 до 2300 °С, и в области низких температур – до –200 °С.



Рис. 5.1. Термопара

В табл. 5.5 приведены основные термопары, их температурный диапазон применения, а также коэффициенты преобразования в милливольты.

Таблица 5.5

Стандартные термоэлектрические преобразователи – термопары

Название термопары	Условное обозначение	Диапазон длительного (кратковременного) применения, °С	Коэффициент преобразования, мВ/°С · 10 <sup>3</sup>
Вольфрамрений-вольфрамрениевые	ТВР (А)	0–2200 (2500)	12,1–9,2
		0–1800 (2500)	11,8–11,4
		0–1800 (2500)	11,9–11,3
Платинородий-платинородиевые	ТПР (В)	300–1600 (1800)	3,1–5,9
Платинородий-платиновые	ТПП (S, R)	0–1300 (1600)	0–1300 (1600)
Хромель-алюмелевые	ТХА (К)	–200...+1000 (1300)	–200...+1000 (1300)
Хромель-копелевые	ТХК (L)	–200...+600 (800)	28,5–87,8
Хромель-константановые	ТХК (E)	–200...+700 (900)	26,3–79,8
Никросил-нисиловые	ТНН (N)	–270...+1300(1300)	0,9–36,2
Медь-константановые	ТМК (T)	–200...+700 (900)	16,4–61,7
Железо-константановые	ТЖК (J)	–200...+700 (900)	23,1–62,0

В табл. 5.6 приведены статические характеристики наиболее распространенных термопар: ТХА, ТХК, ТПП.

Таблица 5.6

Номинальные статические характеристики термоэлектрических термопар

$t, ^\circ\text{C}$	Термопара $E$ , мВ			$t, ^\circ\text{C}$	Термопара, $E$ , мВ		
	ТПП ( $S$ )	ТХА ( $K$ )	ТХК ( $L$ )		ТПП ( $S$ )	ТХА ( $K$ )	ТХК ( $L$ )
-240	–	-6,344	–	650	5,751	27,022	53,484
-200	–	-5,892	-9,488	700	6,274	29,128	57,856
-160	–	-5,141	-8,207	750	6,805	31,214	62,200
-120	–	-4,138	-6,575	800	7,345	31,277	66,469
-80	–	-2,92	-4,431	850	7,892	35,314	–
-40	–	-1,527	-2,500	900	8,448	37,325	–
0	0,000	0,000	0,000	950	9,012	39,310	–
50	0,299	2,022	3,306	1000	9,585	41,269	–
100	0,645	4,095	6,860	1050	10,165	43,202	–
150	1,029	6,137	10,621	1100	10,754	45,108	–
200	1,440	8,137	14,557	1150	11,348	46,985	–
250	1,873	10,151	18,639	1200	11,947	48,828	–
300	2,323	12,207	22,839	1250	12,550	50,633	–
350	2,786	14,292	27,132	1300	13,155	52,398	–
400	3,260	16,395	31,488	1400	14,368	–	–
450	3,743	18,513	35,882	1500	15,576	–	–
500	4,234	20,640	40,292	1600	16,771	–	–
550	4,732	22,772	44,700	1700	17,942	–	–
600	5,237	24,902	49,098	–	–	–	–

Схемы подключения термопар к измерительному прибору показаны на рис. 5.2. В реальной практике в большинстве случаев используют вторую схему (рис. 5.2, б), где измерительный прибор включается в разрыв одного из термоэлектродов. Подобное подключение позволяет компенсировать ненужную термоЭДС, возникающую в точках подключения термоэлектродов к проводам, ведущим к прибору. Эти точки в случае первой схемы хотя и находятся при одинаковой температуре, но соединяют разные по физическим свойствам проводники (например, медь-железо и медь-константан, если соединительные провода медные), в результате чего в них может возникать дополнительная некомпенсированная термоЭДС, влияющая на результаты измерения. Термопара на основе такой схемы подключения называется дифференциальной (рис. 5.3).

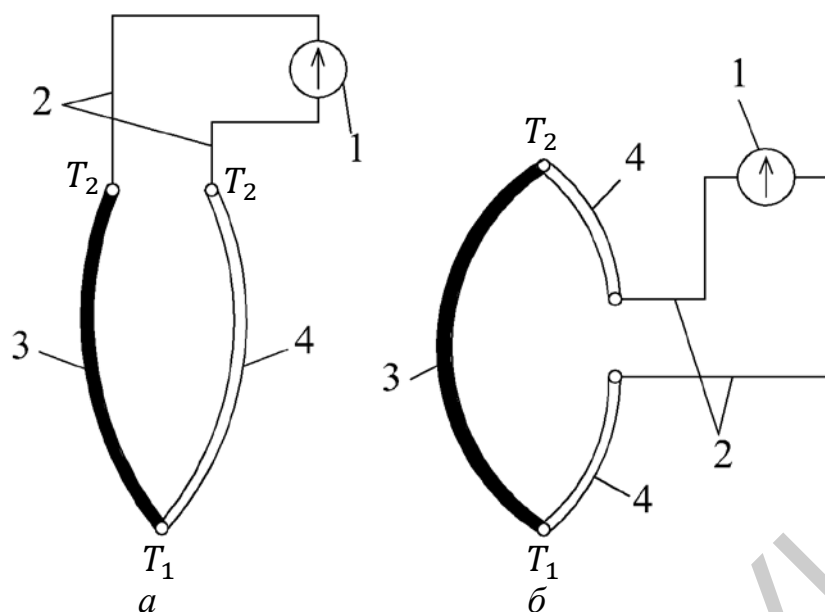


Рис. 5.2. Способы подключения термопары:

*a* – подключение к концам термоэлектродов, *б* – подключение в разрыв одного из электродов:

1 – измерительный прибор; 2 – соединительные провода; 3, 4 – «горячий» и «холодный» термоэлектроды соответственно;  $T_1$ ,  $T_2$  – температура «горячего» и «холодного» спаев термопары

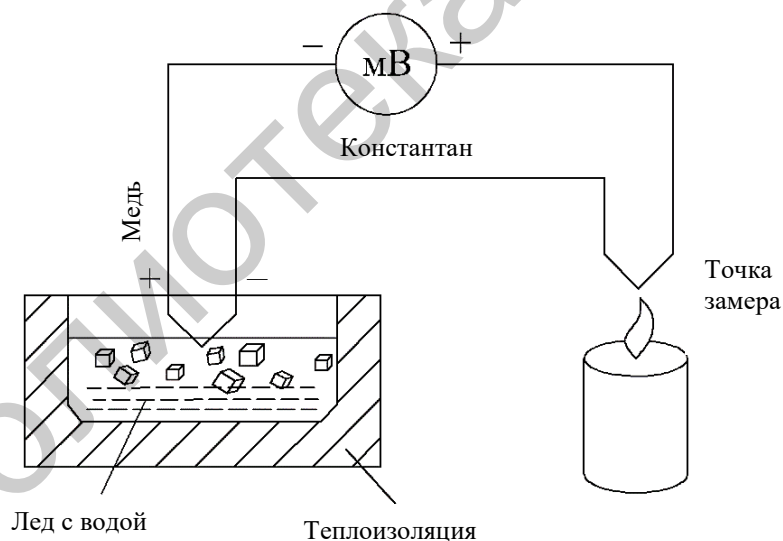


Рис. 5.3. Схема дифференциальной термопары

Следует отметить, что схема подключения может содержать и большее количество спаев, чем два. Такие схемы могут использоваться для измерения, например, средней температуры объекта по нескольким точкам замера.

Для расчета суммарной термоЭДС в цепи дифференциальной термопары необходимо знать как минимум температуру одного из спаев. Раньше холодные спаи опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (отсюда появилось название «холодные спаи»), но это очень неудобно, а для многих практических схем и вовсе невозможно. Сейчас обычно



температура холодного спая контролируется дополнительным детектором (например, терморезистором).

Зависимость сопротивления металлического термометра от температуры, также как и величины ЭДС термопары от температуры, нелинейна в широком диапазоне температур, но на определенном участке ее можно считать линейной и использовать для расчетов.

### **5.1.5. Области применения датчиков**

В автоматизированных системах управления датчики могут выступать в роли иницилирующих устройств, приводя в действие оборудование и программное обеспечение. Показания датчиков в таких системах, как правило, записываются на запоминающее устройство для контроля, обработки, анализа и вывода на дисплей или печатающее устройство. Огромное значение датчики имеют в робототехнике, где они выступают в роли рецепторов, посредством которых роботы и другие автоматические устройства получают информацию из окружающего мира и своих внутренних органов.

В радиоэлектронике датчики температуры имеют огромное влияние на точность проектирования различных электронных компонентов. В частности, датчик температуры, благодаря своему колоссальному быстродействию, помогает системе оперативно реагировать на изменения температуры при проведении какого-либо процесса (даже касательно процессов создания интегральных микросхем, требующих отличного контроля качества на каждом этапе изготовления). Также термодатчики широко используются в компьютерной технике. Они жизненно необходимы для управления электропитанием компонентов компьютера и поддержания их работы в штатном режиме или же для их вывода из нештатных режимов работы (например, при перегреве) путем передачи информации на управляющую систему и дальнейшего снижения напряжения или вовсе отключения.

Как видно, современное оборудование, применяемое на производстве или в быту, не может обходиться без датчиков температуры. Поэтому их развитие является одним из необходимых условий развития электроники.

## **5.2. Практическая часть**

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде НТЦ 09.12.1 «Автоматизация производственных процессов и автоматика».

Внешний вид стенда с лабораторной работой «Измерение температуры на основе аналоговых сигналов с операционного усилителя» представлен на рис. 5.4.

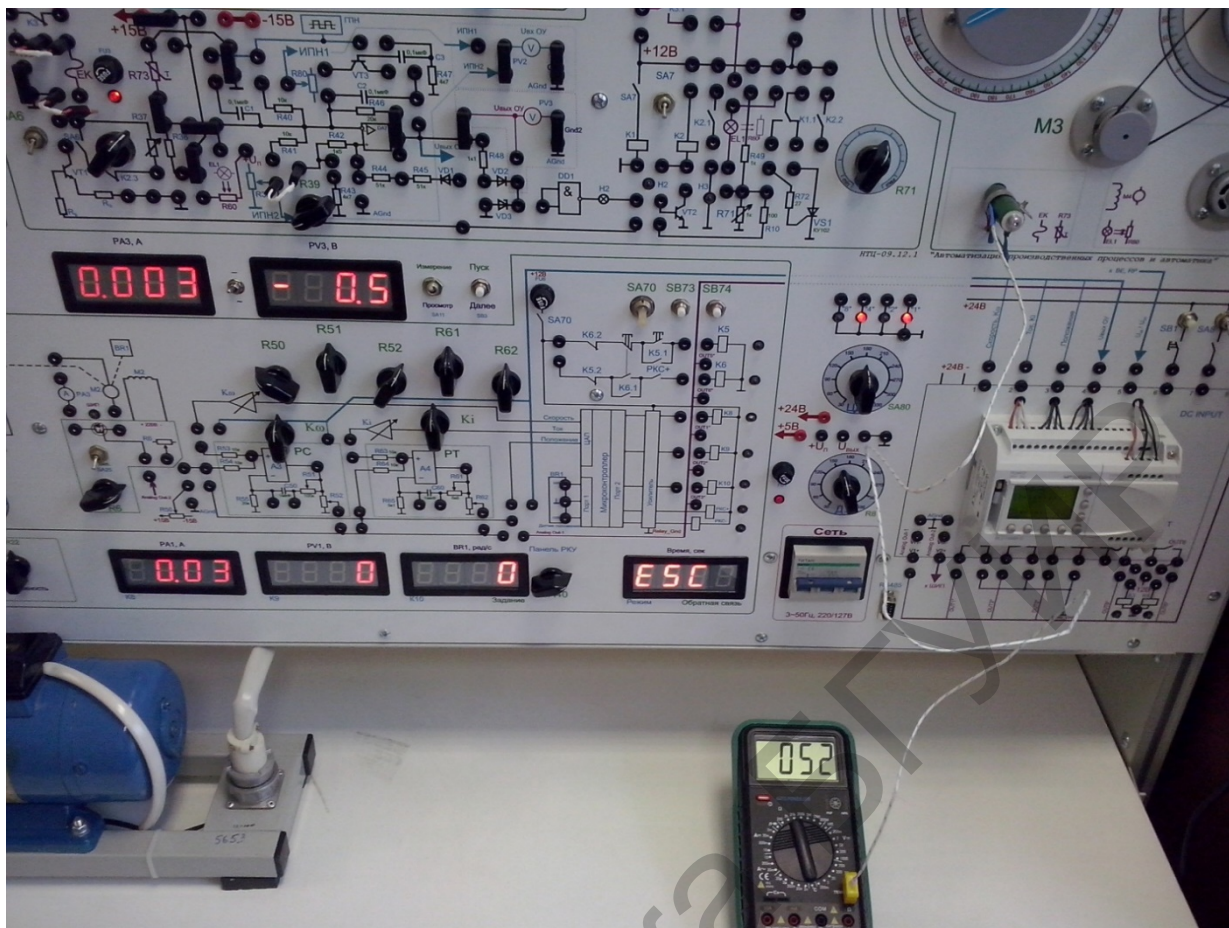


Рис. 5.4. Внешний вид стенда с лабораторной работой «Измерение температуры с операционного усилителя на основе аналоговых сигналов»

В качестве дополнительного оборудования к стенду в указанной лабораторной работе используется мультиметр *МУ-62* с встроенной функцией измерения температуры.

## 5.2.1. Измерение температуры на основе аналоговых сигналов с операционного усилителя

1. Собрать схему, как показано на рис. 5.5.

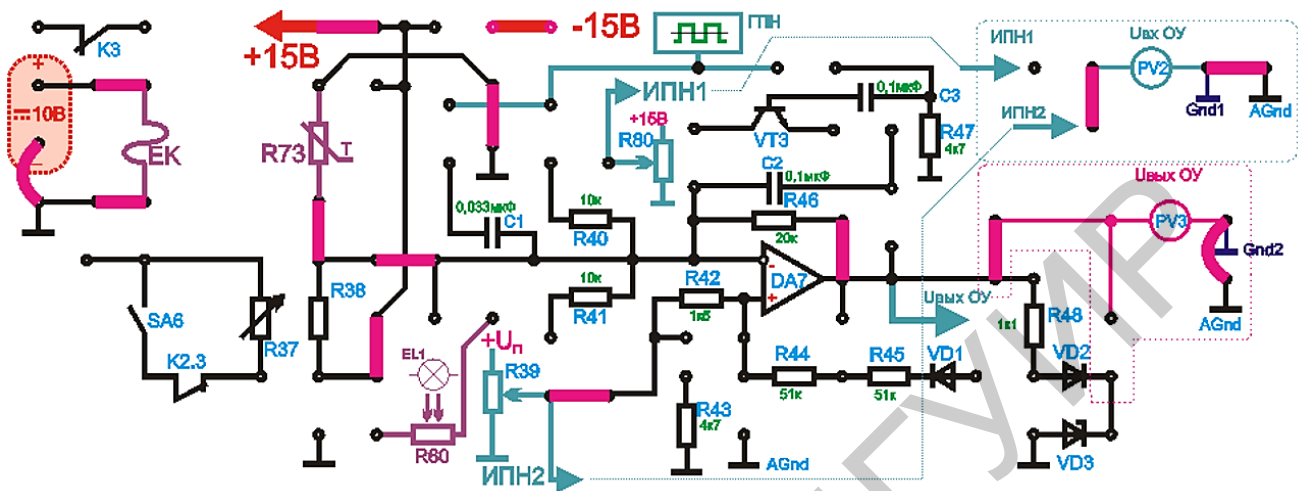


Рис. 5.5. Схема аналогового измерения температуры

2. Убедиться, что схема собрана правильно:

- на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки;
- тумблеры SA2, SA3, SA5, SA6, SA7, SA8, SA22, SA23, SA25, SA70 находятся в нижнем положении («Выключено»);
- регуляторы R21, R22 установить в вертикальное положение.

Если необходимо использовать измерительные приборы на панели стенда, то тумблеры SA10, SA11 установить в положение «Измерение».

3. Подключить внешний мультиметр МУ-62, содержащий функцию измерения температуры, к объекту нагрева ЕК. Для этого поставить круговой переключатель прибора в положение «°C», а прилагаемую термопару подключить к гнездам прибора «TEMP» и объекту нагрева ЕК.

4. Обесточить цепь питания объекта нагрева ЕК от источника 10 В: для этого снять одну из трех переключек, питающих ЕК.

5. Включить питание стенда (три автоматических выключателя «Сеть»).

6. Установить по прибору PV-2 с помощью регулятора R39 значение опорного напряжения для операционного усилителя DA7, равное 0,5 В.

7. Зафиксировать начальные значения:  $U_{\text{вых ОУ}}$  (PV3),  $T_{\text{С min EK}}$  (показания температуры по прибору МУ-62),  $U_{\text{оп ОУ}}$  (PV2).

8. Подать напряжение от источника 10 В на ЕК (установить переключку ЕК).

9. По мере нагрева ЕК и изменений показаний PV3 отследить момент прекращения изменений показаний PV3 (режим насыщения DA7) и по его наступлению обесточить питание ЕК, сняв одну из трех переключек ЕК.

10. По мере охлаждения ЕК (вследствие снятия питающего напряжения), снять зависимость  $U_{\text{вых ОУ}} = f(T_{\text{°C}})$  в диапазоне линейных значений выхода ОУ, исключив участки его насыщения.

11. Повторить задания пп. 6–10 для значений опорного напряжения: 1,0 В; 1,5 В. Данные занести в таблицу 5.7.

Таблица 5.7

Результаты измерений температуры на основе аналоговых сигналов с операционного усилителя

$U_{\text{оп.ОУ}}, \text{ В}$	№ п/п	$U_{\text{вых.ОУ}}, \text{ В}$	$T, \text{ °C}$
0,5	1		
0,5	2		
0,5	3		
0,5	...	и др.	...
1,0	1		
1,0	2		
1,0	3		
1,0	...	...	...
1,5	1		
1,5	2		
1,5	3		
1,5	и др.	...	...

10. Пользуясь данными табл. 5.7, определить диапазон измерений температуры в зависимости от значения опорного напряжения операционного усилителя.

12. Выключить питание (три автоматических выключателя «Сеть»).

13. Разобрать схему.

### 5.2.2. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Схема исследования датчика температуры.
4. Табличные и графические результаты измерений.
5. Анализ полученных данных и вывод.

### 5.2.3. Контрольные вопросы

1. Опишите принцип работы термистора.
2. Опишите принцип работы термопары.
3. Расскажите об особенностях применения термопар, приведите примеры.
4. Какова конструкция индуктивного датчика угла?
5. Каковы основные параметры и характеристики датчика угла?

6. Расскажите об особенностях применения сельсинов.
7. Почему необходимо контролировать температуру интегральной микросхемы?
8. Каковы достоинства электронных датчиков температуры по сравнению с традиционными термометрами?
9. Назовите положительные стороны уменьшения физических размеров датчиков температуры.
10. Каковы пути увеличения точности измерения углов?

#### **Список использованных источников**

1. Аш, Ж. Датчики измерительных систем. В 2 кн. Кн. 1 / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 480 с.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 589 с.
3. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
4. Датчики теплотехнических и механических величин : справочник / сост. А. Ю. Кузин [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 128 с. : ил.
5. Что такое термистор и где он применяется [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/electronica/1707-chto-takoe-termistor-i-pozistor.html>.
6. Характеристики, параметры термисторов [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.elel.ru/termistor2.html>.
7. Интегральные датчики температуры National Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.compel.ru/lib/ne/2007/10/6-integralnyie-datchiki-temperaturuyi-national-semiconductor>.
8. Термопара – термоэлектрический преобразователь. Теория, устройство, характеристики, принцип работы термопар [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа : [http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_503.html](http://www.eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_503.html).

## Содержание

### **Лабораторная работа №1**

Исследование потенциметрических измерительных преобразователей  
в составе автоматизированного оборудования ..... 3

### **Лабораторная работа №2**

Исследование импульсных датчиков положения ..... 20

### **Лабораторная работа №3**

Исследование ультразвуковых датчиков измерения расстояния ..... 39

### **Лабораторная работа №4**

Исследование индуктивных измерительных преобразователей ..... 54

### **Лабораторная работа №5**

Исследование аналоговых сигналов датчиков температуры ..... 64

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Мадвейко** Сергей Игоревич  
**Будько** Геннадий Петрович  
**Чураков** Андрей Владимирович

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ И КОМПОНЕНТЫ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. В. Иванюшина*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Касабуцкий*

Подписано в печать 11.02.2018. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,77. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 30. Заказ 235.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6