

**В.И. Бойков, С.В. Быстров, С.М. Власов,  
В.В. Григорьев, Н.А. Николаев, О.С. Нуйя**

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**



**Санкт-Петербург  
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.И. Бойков, С.В. Быстров, С.М. Власов,  
В.В. Григорьев, Н.А. Николаев, О.С. Нуйя**  
**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ  
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

УЧЕБНО -МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 15.03.06, 27.03.04  
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
бакалавриата



Санкт-Петербург  
2020

Бойков В.И., Быстров С.В., Власов С.М., Григорьев В.В., Николаев Н.А., Нуйя О.С. Преобразователи информации в системах управления. Часть 1 – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 65 с.

Рецензент(ы):

Герасимов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО.

В пособии приведены методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу "Преобразователи информации в системах управления". Рассмотрены принципа действия и приведены основные технические характеристики изучаемых датчиков, необходимые для выполнения лабораторных работ, варианты заданий и методические указания к выполнению. Лабораторные работы выполняются на стендах «Промышленные датчики» (ПД-СР-3) ООО ТД «ПРОФОБРАЗОВАНИЕ».

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по программе бакалавриата направлений подготовки 15.03.04 – «Мехатроника и робототехника» и 27.03.04 – «Управление в технических системах». При изложении материала предполагалось, что студенты знакомы с основами электротехники и электроники.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020  
© Бойков В.И., Быстров С.В., Власов С.М., Григорьев В.В.,  
Николаев Н.А., Нуйя О.С., 2020

## Содержание

Введение .....	5
Лабораторная работа № 1 Измерение цифрового датчика угловой скорости ..	6
Лабораторная работа № 2 Исследование аналогового датчика угловой скорости .....	11
Лабораторная работа № 3 Исследование цифрового датчика углового перемещения .....	20
Лабораторная работа № 4 Исследование потенциометрического датчика углового перемещения .....	23
Лабораторная работа № 5 Исследование синусно-косинусного вращающегося трансформатора .....	29
Лабораторная работа №6 Исследование терморезистора как датчика температуры .....	36
Лабораторная работа №7 Исследование датчиков температуры с электронными преобразователями сигнала.....	42
Лабораторная работа №8 Исследование бесконтактных датчиков приближения .....	48
Лабораторная работа №9 Исследование ультразвукового датчика приближения .....	58
Литература .....	63

## Введение

Лабораторный практикум по дисциплине «Преобразователи информации систем управления» направлен на выработку у студентов начальных навыков применения преобразователей информации для измерения физических величин. Наличие таких навыков способствует формированию профессиональных компетенций, связанных со способностью выполнять проектирование блоков и устройств автоматики, разрабатывать программное обеспечение, необходимое для решения задач управления и обработки информации.

Лабораторный практикум содержит 9 работ, выполняемых на специальных учебных стендах. Лабораторные работы выполняются на стендах «Промышленные датчики» (ПД-СР-3) ООО ТД «ПРОФОБРАЗОВАНИЕ» [9]. Перед началом выполнения работы студенты должны изучить принцип действия исследуемых датчиков, познакомиться со схемой включения и используемыми измерительными средствами. Обработку результатов измерений рекомендуется выполнять в соответствии с методическими указаниями [3].

Трудоемкость выполнения каждой лабораторной работы составляет два часа.

## Лабораторная работа № 1

### Измерение цифрового датчика угловой скорости

**Цель работы:** Изучение цифрового датчика угловой скорости на примере инкрементального энкодера E50S8.

#### Теоретические сведения

В средствах автоматизации, промышленной робототехнике, средствах числового программного управления и в электромеханических системах управления различного назначения широко используются датчики угловой скорости вращения и угла поворота вала. Для этих целей широко используют энкодеры.

Энкодеры делятся на инкрементальные и абсолютные. Инкрементальный энкодер на выходе выдает за один оборот определенное количество импульсов, а абсолютный энкодер выдает цифровую информацию о текущем угле поворота.

По принципу действия энкодеры могут быть оптическими, резисторными и магнитными. Они могут обеспечивать передачу информации по цифровым линиям связи на значительные расстояния.

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения угла поворота и скорости вращения объекта измерения. На их выходе формируется последовательность электрических импульсов. Количество импульсов за один оборот для конкретного энкодера есть величина постоянная. По количеству импульсов можно определить угол поворота, а по их количеству за единицу времени – угловую скорость вращения. Выход энкодера обычно имеет два канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты на  $90^\circ$  относительно друг друга (т.е. формируются парафазные импульсы), что позволяет определять направление вращения (см. Рисунок 1.1). Зачастую имеется и дополнительный (третий) импульсный выход для формирования нулевой метки. Этот сигнал позволяет определить абсолютное начальное положение вала.

Если вал останавливается, то прекращается и передача импульсов. При выключении электропитания текущая информация об угле поворота вала обычно теряется.

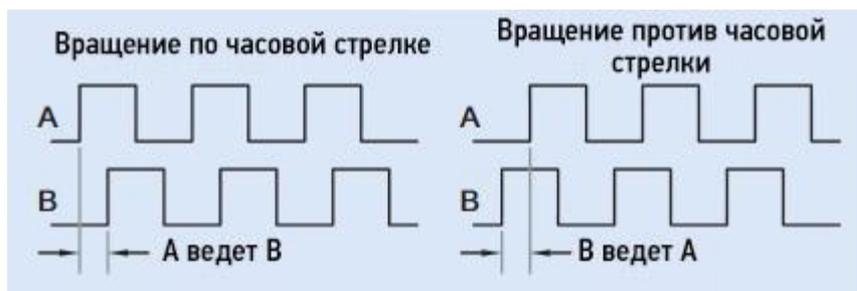


Рисунок 1.1 – Использование сигналов каналов A и B для определения направления вращения

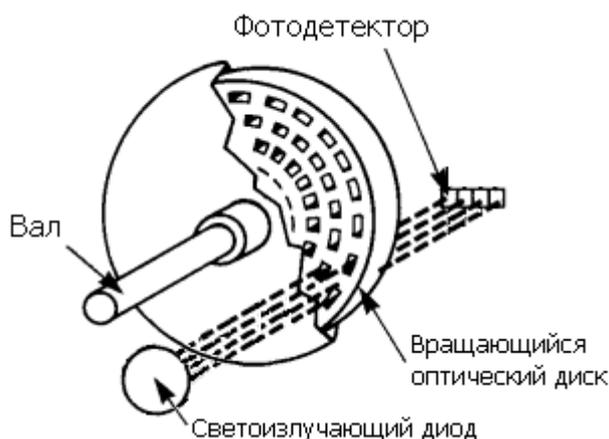


Рисунок 1.2 – Состав оптического инкрементального энкодера

Инкрементальный оптический энкодер, как правило, состоит из пяти компонентов (см. Рисунок 1.2): источника света, кодового оптического диска, маски, фотодетекторной сборки и сигнального процессора. Внутри энкодера жестко с валом закреплен стеклянный кодовый диск с равномерно нанесенными непрозрачными рисками. Источник света и фотодетекторы расположены по разные стороны от диска. Количество света, приходящего на фотодетекторы, меняется в зависимости от положения рисок. Электронная схема преобразует сигналы от фотодетекторов в импульсные выходные сигналы.

Количество рисок на оптическом диске определяет количество выходных импульсов за оборот вала энкодера. В результате, подсчитывая количество импульсов, сформировавшихся на выходе энкодера, легко определить угол поворота вала. К примеру, если на диске нанесено 1000 рисок, а на выходе энкодера появилось 250 импульсов, то вал повернулся на 90 градусов.

Такая простая и стабильная зависимость количества выходных импульсов от угла поворота вала определила широкое применение энкодеров в измерительной технике.

На Рисунке 1.3 показан внешний вид инкрементального энкодера марки **E50S8-3600-6-L-5**.



*Рисунок 1.3 – Инкрементальный энкодер E50S8*

Технические характеристики инкрементального энкодера E50S8-3600-6-L-5:

- Диаметр корпуса: 50 мм;
- Диаметр вала: 8 мм;
- Количество импульсов на оборот вала: 3600;
- Выходной сигнал: дифференциальный, парафазный;
- Напряжение питания энкодера: 5 В постоянного тока.

### **Экспериментальная часть**

#### **Описание лабораторной установки**

Внешний вид блока «Датчики частоты вращения» лабораторного стенда представлен на Рисунке 1.4. Блок содержит приводной двигатель постоянного тока, оптический энкодер и тахогенератор постоянного тока, соединенные ременными передачами. В блоке индикаторов (Рисунок 1.5) расположен потенциометр для плавного регулирования скорости вращения вала приводного двигателя от 0 до 2500-3000 об/мин. Частоту вращения следует считывать с табло, которое находится справа от потенциометра.

На лицевую панель блока «Датчики частоты вращения» выведены парафазные сигналы А, В и сигнал Z нулевой метки энкодера.



Рисунок 1.4



Рисунок 1.5

### Порядок выполнения работы:

- 1) Проанализировать паспортные данные исследуемого энкодера, изучить его характеристики. Вычислить угловое разрешение изучаемого энкодера.
- 2) Включить стенд выключателем “Пит”.
- 3) Определить угловую скорость вращения при помощи инкрементального энкодера:
  - 3.1) Подключить выходы А, В и «Общ» энкодера к входам двухканального осциллографа.
  - 3.2) Установить скорость вращения вала около 100 об/мин (по цифровому индикатору). Синхронизировать изображение сигналов на экране осциллографа. Будут наблюдаться последовательности импульсов аналогичных тем, что приведены на Рисунке 1.1. Изменяя направление вращения вала, наблюдать за изменением фазового сдвига между сигналами каналов А и Б.
  - 3.3) По осциллограмме определить частоту вращения ротора двигателя.
- 4) Снять статическую характеристику энкодера как датчика скорости:
  - 4.1) Плавно изменяя скорость приводного двигателя с помощью ручки регулятора скорости (Блок индикации), снять не менее 10 точек в сторону увеличения скорости. Данные занести в Таблицу 1.1. Пересчитать данные

частоты вращения в угловую скорость и занести их в ту же таблицу.

- 4.2) Построить зависимость  $F_{\text{вых}} = f(\omega)$ . Используя линейную аппроксимацию зависимости, определить коэффициент передачи энкодера [3]. Оценить погрешность полученного значения.

Таблица 1.1

№	Параметр	1	2	3
1	Частота вращения по цифровому индикатору, об/мин			
2	Частота импульсов энкодера по осциллографу (выход А), Гц			
3	Частота импульсов энкодера по осциллографу (выход В), Гц			
4	Угловая скорость вращения ротора двигателя, вычисленная по данным с энкодера, рад/с			

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- график статической характеристики;
- вычисленные значения погрешностей измерения скорости и коэффициента передачи энкодера;
- сравнение полученных данных с паспортными;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование аналогового датчика угловой скорости

**Цель работы:** Изучение датчиков угловой скорости вращения, исследование статических характеристик тахогенератора постоянного тока ТПП-3.

#### Теоретические сведения

В средствах автоматизации, промышленной робототехнике, средствах числового программного управления и в электромеханических системах управления различного назначения широко используются датчики угловой скорости вращения. Самыми популярными и конкурирующими между собой являются тахогенераторы и энкодеры. Тахогенераторы могут быть постоянного и переменного тока, синхронные и асинхронные. В данной работе исследуется тахогенератор постоянного тока.

Тахогенератор постоянного тока – это машина постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением или возбуждением постоянными магнитами (Рисунок 2.1), работающая в генераторном режиме.

Тахогенераторы используются в качестве датчиков скорости в различных измерительных устройствах и системах автоматического управления. Кроме того они могут быть использованы для выполнения операций дифференцирования и интегрирования в электромеханических счетно-решающих устройствах. Условные графические обозначения тахогенераторов показаны на Рисунке 2.1.

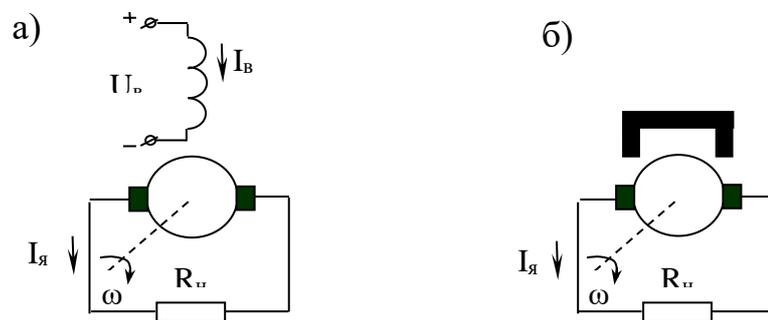


Рисунок 2.1 – Тахогенераторы постоянного тока а) с электромагнитным независимым возбуждением; б) с магнитоэлектрическим возбуждением (от постоянного магнита)

Как измерители скорости вращения тахогенераторы должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Должны быть обеспечены линейность и крутизна статической характеристики.
- 2) Остаточное напряжение при нулевой скорости вращения у тахогенераторов переменного тока и зона нечувствительности у тахогенераторов постоянного тока должны быть сведены к минимуму.
- 3) Должен быть минимальный уровень пульсаций выходного напряжения у тахогенераторов постоянного тока и синусоидальность выходного напряжения с минимальной фазовой погрешностью у тахогенераторов переменного тока.
- 4) Должны быть небольшие габариты и масса, при которых бы обеспечивались малые значения момента инерции ротора и момента трения.

Нужно отметить, что тахогенераторы с магнитоэлектрическим возбуждением получили наибольшее распространение в силу ряда преимуществ, которые дает отсутствие обмотки возбуждения:

- простота конструкции;
- меньшие габариты;
- нет необходимости в стабилизированном источнике питания обмотки возбуждения, постоянство магнитного потока обеспечивается автоматически;
- нет необходимости учитывать непостоянство сопротивления цепи возбуждения при изменении температуры обмотки.

### **Статическая характеристика тахогенератора постоянного тока**

Аналитическое выражение статической характеристики может быть получено из уравнения электрической цепи якоря тахогенератора, которое имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = E_{\text{я}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{щ}}, \quad (2.1)$$

где  $E_{\text{я}}$  – ЭДС якоря,  $R_{\text{я}}$  – активное сопротивление обмотки якоря,  $I_{\text{я}}$  – ток якоря,  $\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения на щетках.

Если рабочий магнитный поток  $\Phi$  генератора постоянен, то ЭДС якоря является линейной функцией угловой скорости:

$$E_{\text{я}} = c_e \Phi \omega. \quad (2.2)$$

Однако даже при магнитоэлектрическом возбуждении магнитный поток нельзя считать строго постоянным, так как ток якоря создает м.д.с. реакции якоря, что влечет за собой уменьшение потока машины на величину потока реакции якоря:

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_p, \quad (2.3)$$

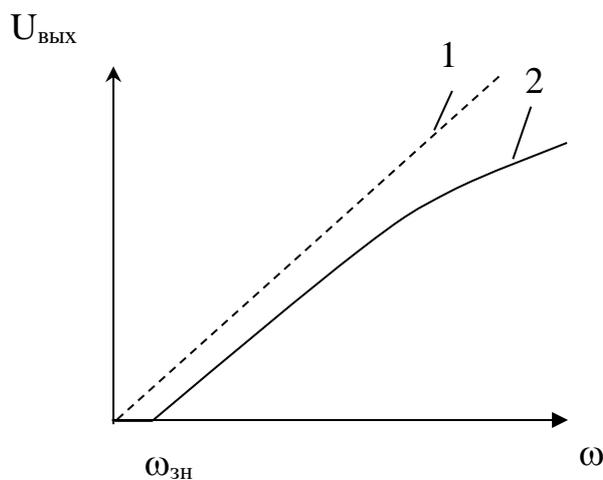
где  $\Phi_0$  – поток от системы возбуждения,  $\Phi_p = cU_{\text{ВЫХ}}/R_H$  – поток реакции якоря. Тогда, с учетом влияния реакции якоря, можно записать выражение

$$U_{\text{ВЫХ}} = c_e \Phi_0 \omega - \frac{c_e c \omega U_{\text{ВЫХ}}}{R_H} - \frac{U_{\text{ВЫХ}} R_{\text{я}}}{R_H} - \Delta U_{\text{Щ}}. \quad (2.4)$$

Решив его относительно  $U_{\text{ВЫХ}}$ , получим окончательное выражение для статической характеристики тахогенератора:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{c_e \Phi_0 \omega - \Delta U_{\text{Щ}}}{1 + (c_e c \omega + R_{\text{я}})/R_H}. \quad (2.5)$$

Таким образом, если учитывать основные негативные факторы, напряжение на выходе тахогенератора является нелинейной функцией угловой скорости. Статическая характеристика потенциометрического датчика имеет вид, показанный на Рисунке 2.2.



*Рисунок 2.2 - Статические характеристики тахогенератора постоянного тока (1 – идеальная, 2- реальная)*

Проанализировав выражение 5, можно убедиться в том, что на отклонение характеристики от линейного вида влияет падение напряжения на щетках и непостоянство магнитного потока. Так, падение напряжения на щеточном контакте обуславливает зону нечувствительности (до некоторого значения угловой скорости  $\omega_{\text{ЗН}}$  выходное напряжение остается равным нулю). Для уменьшения данной погрешности применяют металлографитовые щетки, на которых падение напряжения минимально, а в особо прецизионных устройствах щетки изготавливают с серебряными и

золотыми напайками. При использовании таких щеток падением напряжения на них можно пренебречь. Для обеспечения постоянства магнитного потока в генераторе нужно ослабить реакцию якоря. При магнитоэлектрическом возбуждении это делается либо применением добавочных полюсов, либо за счет увеличения воздушного зазора между якорем и статором, для чего целесообразно использовать полый или гладкий якорь. В машинах с электромагнитным возбуждением рекомендуется обеспечивать работу в режиме, близком к насыщению. При этом реакция якоря не оказывает существенного влияния на рабочий поток машины. Кроме того, не будут сказываться и небольшие изменения тока возбуждения. Однако для обеспечения такого режима необходимо увеличивать размеры обмотки, а, следовательно, размеры и массу всего тахогенератора. В ряде случаев для стабилизации тока возбуждения последовательно обмотке возбуждения включают терморезистор или добавочное сопротивление с сопротивлением нагрузки больше номинала. Линейность характеристики в значительной степени определяется сопротивлением нагрузки. Это видно из выражения 5: когда  $R_n \rightarrow \infty$  знаменатель выражения упрощается и в пределе стремится к единице, что обеспечивает линейность характеристики.

Тахогенераторы постоянного тока могут иметь еще и конструктивные погрешности, к которым относятся асимметрия и пульсации выходного напряжения. Асимметрия выходного напряжения появляется из-за технологической неточности установки щеток на геометрической нейтрали. При этом величины напряжения различны при вращении якоря с одинаковой угловой скоростью, но в противоположных направлениях. Это объясняется тем, что при сдвиге щеток с геометрической нейтрали возникает продольная составляющая потока якоря, которая при одном направлении вращения совпадает с потоком возбуждения, а при другом – противоположна ему. Следовательно, результирующие потоки будут различны, значит, будут отличаться и ЭДС якоря. Асимметрию выходного напряжения вычисляют как отношение разности выходных напряжений при вращении якоря с номинальной угловой скоростью вращения в обоих направлениях к полусумме этих напряжений. В зависимости от класса точности тахогенераторов амплитудная погрешность из-за асимметрии при номинальной скорости вращения составляет 0.5–3 %. Пульсации выходного напряжения обусловлены зубчатой структурой якоря и механической коммутацией на коллекторе. Влияние первого фактора ослабляют скосом пазов или использованием беспазового якоря; действие второго фактора – увеличением числа коллекторных пластин и соответствующим выбором

материала коллекторных пластин и щеток. Амплитуды пульсаций у тахогенераторов различных классов точности составляют 0.1–3 % от среднего значения выходного напряжения.

Достоинствами тахогенераторов постоянного тока являются:

- малые габариты и масса при относительно большой выходной мощности;
- отсутствие фазовой погрешности, что обусловлено работой на активную нагрузку;
- отсутствие необходимости в дополнительном источнике питания (для устройств с магнитоэлектрической системой возбуждения).

Основные недостатки:

- сложность конструкции;
- пульсации напряжения;
- радиопомехи, возникающие в результате коммутации тока щетками;
- относительно высокая стоимость.

### Передаточная функция тахогенератора постоянного тока

По характеру изменения выходного напряжения при изменении угловой скорости вращения якоря судят о динамических свойствах тахогенератора. Если пренебречь размагничивающим действием реакции якоря, то уравнение переходного процесса принимает вид:

$$u_{\text{ВЫХ}} = e_{\text{я}} - i_{\text{я}}R_{\text{я}} - L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}. \quad (2.6)$$

Если на выходе подключить нагрузку  $R_{\text{н}}$ , а на входе рассматривать угол поворота якоря то, мгновенное значение тока якоря может быть определено как  $i_{\text{я}} = u_{\text{ВЫХ}}/R_{\text{н}}$ , а скорость изменения тока  $\frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{1}{R_{\text{н}}} \cdot \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt}$ , ЭДС якоря  $e = kd\alpha/dt$ . ( $k = c_e \Phi$ )

После подстановки полученных значений в выражение (2.6) и некоторых преобразований можно получить выражение

$$\frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}+R_{\text{н}}} \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + u_{\text{ВЫХ}} = \frac{kR_{\text{н}}}{R_{\text{я}}+R_{\text{н}}} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2.7)$$

и, если принять, что  $\frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}+R_{\text{н}}} = T$  – постоянная времени тахогенератора, а  $\frac{kR_{\text{н}}}{R_{\text{я}}+R_{\text{н}}} = K_{\text{ТГ}}$  – коэффициент передачи тахогенератора при наличии нагрузки, то получим

$$T \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{ТГ}} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (2.8)$$

Вводя оператор дифференцирования, запишем выражение в виде

$$T p u_{\text{ВЫХ}}(p) + u_{\text{ВЫХ}}(p) = K_{\text{ТГ}} p(\alpha). \quad (2.9)$$

Передаточная функция будет иметь вид

$$W(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{\alpha(p)} = \frac{K_{\text{ТГ}}p}{Tp+1}. \quad (2.10)$$

Таким образом, если входным параметром является угол поворота вала, то тахогенератор представляет собой реальное дифференцирующее звено. Часто к тахогенераторам предъявляют требования по минимальной постоянной времени, т.е  $T \approx 0$ , тогда

$$W(p) = K_{\text{ТГ}}p, \quad (2.11)$$

т.е. тахогенератор можно описывать идеальным (безынерционным) дифференцирующим звеном. Если же на входе рассматривать скорость вращения, то передаточная функция будет иметь вид

$$W(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{\omega(p)} = K_{\text{ТГ}}. \quad (2.12)$$



Рисунок 2.3 – Тахогенератор постоянного тока ТГП-3

Таблица 2.1 – Технические характеристики тахогенератора ПТ ТГП-3

Частота вращения	9000 об/мин
Омическая нагрузка, не менее	10000 Ом
Статический момент трения при температуре окружающей среды +20°C±5°C при нормальном атмосферном давлении, не более	15 г·см
Крутизна характеристики выходного напряжения тахогенератора при нагрузке внешним сопротивлением 10000 Ом должна быть на каждые 1000 оборотов якоря в минуту, не менее *допускается колебание выходного напряжения на 0,25% в пределах допуска на величину симметрии.	4В
Допустимое расхождение величин выходного напряжения тахогенератора в вольтах при правом и левом вращении якоря с одним и тем же числом оборотов в минуту, не более	1%
Максимальное отклонение от линейности, не более	±0,5%
Вес, не более	0,07кг

## Экспериментальная часть

### Описание лабораторной установки

Внешний вид блока «Датчики частоты вращения» лабораторного стенда представлен на Рисунке 1.4. Блок содержит приводной двигатель постоянного тока, оптический энкодер и тахогенератор постоянного тока, соединенные ременными передачами. В блоке индикаторов (Рисунок 1.5) расположен потенциометр для плавного регулирования скорости вращения вала приводного двигателя от 0 до 2500-3000 об/мин. Частоту вращения следует считывать с табло, которое находится справа от потенциометра.

На лицевой панели блока «Датчики частоты вращения» тахогенератор представлен условным графическим изображением с обозначением BR. Внешний вид тахогенератора показан на Рисунке 2.3. Его технические характеристики сведены в Таблицу 2.1. На лицевую панель блока «Датчики частоты вращения» выведены выходные сигналы тахогенератора BR.

### Порядок выполнения работы:

- 1) Проанализировать паспортные данные исследуемого тахогенератора, изучить его технические характеристики.
- 2) Включить стенд выключателем Пит.
- 3) Снять статическую характеристику тахогенератора постоянного тока на холостом ходу, для этого:
  - 3.1) Подключить мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения к выходам тахогенератора. Плавно изменяя скорость приводного двигателя с помощью ручки регулятора скорости, снять не менее 10 точек в сторону увеличения скорости. Значение скорости приводного двигателя отсчитывать на Блоке индикации. Данные занести в Таблицу 2.2. Пересчитать данные частоты вращения в угловую скорость и занести их в ту же таблицу.

Таблица 2.2

$n$ , об/мин				
$\omega$ , рад/с				
$U_{\text{вых}}$ , В				

- 3.2) Построить зависимость  $U_{\text{вых0}} = f(\omega)$ . Используя линейную аппроксимацию зависимости, определить коэффициент передачи тахогенератора на холостом ходу [3]. Оценить погрешность полученного значения.

- 4) Снять статические характеристики тахогенератора постоянного тока при различных значениях сопротивления нагрузки:
- 4.1) В качестве нагрузки использовать один из переменных резисторов стенда. Перед его подключением к выходу тахогенератора установить с помощью мультиметра нужное значение его сопротивления (равное или близкое значению, указанному в Таблице 2.3). Записать установленное значение.
- 4.2) Подключить нагрузку  $R_{\text{нагр}}$  к выходам тахогенератора. Плавно изменяя скорость приводного двигателя с помощью ручки регулятора скорости, снять не менее 10 значений выходного напряжения тахогенератора. Значение скорости приводного двигателя отсчитывать на Блоке индикации.
- 4.3) Выполнить пункты 3.1, 3.2 при различных сопротивлениях нагрузки (в соответствии с табличными значениями). Данные занести в Таблицу 2.3. Пересчитать все данные частоты вращения в угловую скорость и занести их в ту же таблицу.

Таблица 2.3

Нагрузка, Ом	200	$n$ , об/мин					
		$\omega$ , рад/с					
		$U_{\text{вых}}$ , В					
	400	$n$ , об/мин					
		$\omega$ , рад/с					
		$U_{\text{вых}}$ , В					
	600	$n$ , об/мин					
		$\omega$ , рад/с					
		$U_{\text{вых}}$ , В					
	800	$n$ , об/мин					
		$\omega$ , рад/с					
		$U_{\text{вых}}$ , В					
1000	$n$ , об/мин						
	$\omega$ , рад/с						
	$U_{\text{вых}}$ , В						

- 4.4) Построить все зависимости  $U_{\text{вых}} = f(\omega)$  с указанием сопротивления нагрузки на одном графике с характеристикой холостого хода  $U_{\text{вых0}} = f(\omega)$ .
- 5) По построенным экспериментальным характеристикам  $U_{\text{вых}} = f(\omega)$  определить максимальные значения абсолютных и

относительных погрешностей [3], обусловленные только нелинейностью характеристик  $U_{\text{вых}} = f(\omega)$ . За идеальную характеристику  $U_{\text{вых}} = f(\omega)$  необходимо принять линеаризованную характеристику, соответствующую  $R_{\text{нагр}} = \infty$ .

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики статических характеристик;
- вычисленные значения погрешностей измерения скорости и коэффициентов передачи для каждого проведенного эксперимента;
- сравнение полученных данных с паспортными;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа № 3

### Исследование цифрового датчика углового перемещения

**Цель работы:** Изучение датчиков углового перемещения, исследование статических характеристик инкрементального энкодера E50S8 как датчика угла поворота.

#### Теоретические сведения

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения угла и скорости поворота вращающихся объектов. На их выходе формируется последовательность импульсов. Количество импульсов за один оборот для конкретного энкодера есть величина постоянная. По количеству импульсов можно определить угол поворота, а по их количеству за единицу времени – угловую скорость вращения. Выходной сигнал имеет два канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты на  $90^\circ$  относительно друг друга (парафазные импульсы), что позволяет определять направление вращения (см. Рисунок 1.1). Имеется также дополнительный импульсный выход нулевой метки, который позволяет определить абсолютное начальное положение вала.

Инкрементальный оптический энкодер, как правило, состоит из пяти компонентов (см. Рисунок 1.2): источника света, кодового диска, маски, фотодетекторной сборки и платы с электроникой. Внутри энкодера жестко с валом закреплен прозрачный диск с непрозрачными рисками. Источник света и фотодетекторы расположены по разные стороны от диска. Количество света, приходящего на фотодетекторы, меняется в зависимости от положения рисок. Электронная плата преобразует сигналы от фотодетекторов в импульсные выходные сигналы. Количество рисок определяет количество импульсов на выходе, формируемых за один оборот вала. К примеру, если на диске нанесено 1000 рисок, тогда после поворота вала на  $90$  градусов на выходе энкодера сформируется 250 импульсов.

На Рисунке 1.3 показан внешний вид инкрементального энкодера марки E50S8-3600-6-L-5.

Технические характеристики инкрементального энкодера E50S8-3600-6-L-5:

- Диаметр корпуса: 50 мм;
- Диаметр вала: 8 мм;
- Количество импульсов на оборот вала: 3600;
- Выходной сигнал: дифференциальный, парафазный;
- Напряжение питания энкодера: 5 В постоянного тока.

## Экспериментальная часть

### Описание лабораторной установки

Блок «Датчики углового положения» лабораторного стенда представлен на Рисунке 3.1. В состав блока входят оптический энкодер, потенциометрический датчик угловых перемещений и вращающийся трансформатор, соединенные между собой ременными передачами. Угол поворота задается ручкой, установленной на вал потенциометрического датчика. Количество импульсов на выходе энкодера подсчитывается блоком индикации и отображается на нижнем информационном табло «Угол поворота» (см. Рисунок 1.5).



Рисунок 3.1 - Блок «Датчики углового положения»

### Порядок выполнения работы

- 1) Снять статическую характеристику инкрементального энкодера. Для снятия статической характеристики подключить входы А, В и «Общ» Блока индикации соответственно к выходам А, В и Общ энкодера. Вращая ручку задатчика угла от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , выполнить не менее 10 измерений углового положения вала, включая точки  $0^\circ - 90^\circ - 180^\circ - 360^\circ$ . Считывать значение угла поворота с индикатора в режиме «0 ... 360°» и сразу фиксировать число импульсов на том же индикаторе, переключив его в режим «n (0 ... 2000)». Данные занести в Таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$\alpha$ , град					
$N$ , число импульсов					

- 2) Построить зависимость  $N = f(\alpha)$ .
- 3) По полученной зависимости  $N = f(\alpha)$  определить значение коэффициента передачи энкодера, используя линейную аппроксимацию. Вычислить погрешность полученного значения.

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- график статической характеристики;
- вычисленное значение коэффициента передачи энкодера;
- сравнение полученных данных с паспортными;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа № 4

### Исследование потенциометрического датчика углового перемещения

**Цель работы:** Изучение датчиков углового положения, исследование статических характеристик потенциометрического датчика ПТП5К1.

#### Теоретические сведения

Потенциометрический измерительный преобразователь или датчик представляет собой реостат, величина выходного напряжения которого зависит от положения подвижного токосъемного контакта.

Потенциометрические датчики предназначены для измерения и преобразования линейных и угловых перемещений в электрический сигнал, а также для воспроизведения простейших функциональных зависимостей в автоматических и вычислительных устройствах непрерывного типа. В сопряжении с чувствительным элементом потенциометр применяется как преобразовательный элемент.

Потенциометрические датчики – реохорды вторичных измерительных приборов, реостаты обратной связи исполнительных механизмов. Они используются в устройствах дистанционной передачи показаний и устройствах дистанционного управления, а также в качестве преобразователей перемещения различных механизмов и устройств, например, гироскопах, автопилотах, гироскопах.

Принцип действия датчика углового перемещения состоит в следующем: к зажимам потенциометра прикладывается напряжение постоянного или переменного тока неизменной величины (амплитуды). При перемещении движка (щетке) потенциометра выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  меняется пропорционально входной величине  $\alpha$ . Каркас углового потенциометрического датчика имеет тороидальную форму (см. Рисунок 4.1). Такие потенциометрические датчики по траектории движения скользящего контакта относятся к круговым, так как скользящий контакт вращается без ограничения угла поворота. Однако следует помнить, что рабочая зона потенциометра ограничена, т.е.  $\alpha_{\text{max}} < 360^\circ$ . Вне рабочей зоны выходное напряжение потенциометра не определено.

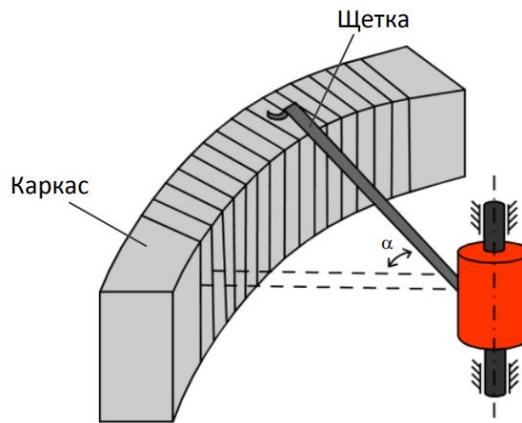


Рисунок 4.1 – Потенциометрический преобразователь углового перемещения

Для режима холостого хода статическая характеристика датчика линейна:

$$U_{\text{вых0}} = \frac{U}{R} \cdot r, \quad (4.1)$$

где  $U$  – напряжения питания потенциометра,  $R$  – сопротивление обмотки,  $r$  – сопротивление части обмотки, приходящейся на угол поворота  $\alpha$  движка потенциометра (см. Рисунок 4.2 а),

Учитывая, что  $\frac{r}{R} = \frac{\alpha}{l}$ , где  $l$  – общая длина обмотки, получим:

$$U_{\text{вых0}} = \frac{U}{l} \cdot \alpha = k\alpha, \quad (4.2)$$

где  $k$  – коэффициент преобразования потенциометра.

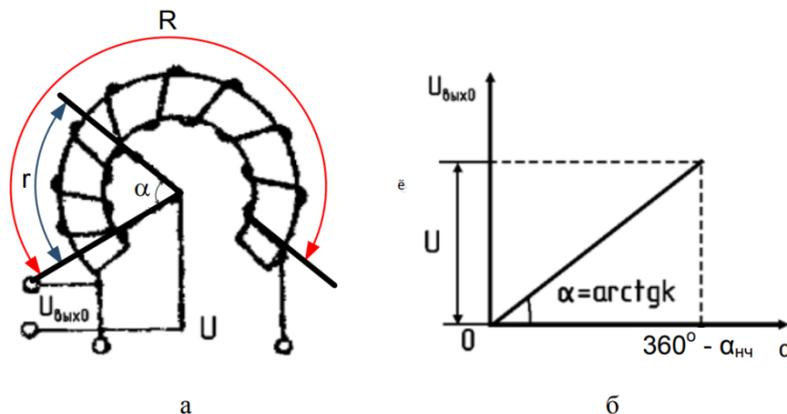


Рисунок 4.2 – а - Потенциометрический датчик углового перемещения, б - статическая характеристика датчика

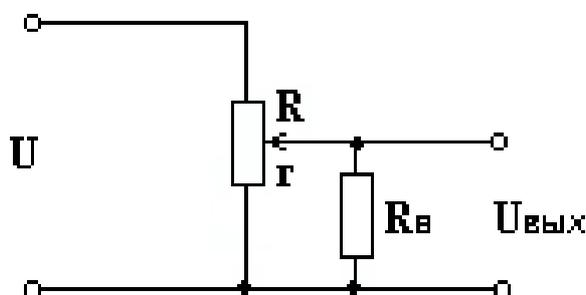
Полученное выражение показывает, что статическая характеристика угловых потенциометров при отсутствии нагрузки представляет прямую, проходящую через начало координат, с коэффициентом наклона  $\alpha$  (Рисунок 4.2 б). При приближении к  $360^\circ$  возникает падение сопротивления,

обусловленное началом нового оборота вращения токосъемника, за счет чего возникает  $\alpha_{нч}$ .

Приведенная статическая характеристика позволяет заключить, что рассмотренные потенциметрические измерители – преобразователи не реагируют на знак входного сигнала, т.е. они относятся к классу однополярных элементов. Однако на основе однополярных потенциметров можно построить двухполярные измерители – преобразователи, реагирующие на знак входного сигнала. Некоторые потенциометры для этого содержат дополнительный электрод – вывод средней точки резистивного элемента.

Идеальные характеристики потенциметрических датчиков могут сильно отличаться от реальных за счет наличия различного рода погрешностей, которые необходимо учитывать при проектировании систем автоматизации. Различают следующие погрешности датчиков:

- зона нечувствительности;
- неравномерность статической характеристики;
- погрешность от люфта;
- погрешность от трения;
- погрешность от нагрузки (при схеме включения, показанной на Рисунке 4.3)



*Рисунок 4.3 – Схема нагруженного потенциметрического датчика*

Потенциометры теплостойкие прецизионные проволочные типа ПТП предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока частотой до 400 Гц. Потенциометры прецизионные изготавливают по ГОСТ В20.39.404-81. Внешний вид потенциометра марки ПТП показан на Рисунке 4.4, его технические характеристики приведены в Таблице 4.1.



Рисунок 4.4 – Внешний вид потенциметрического датчика марки ПТП

Таблица 4.1 – Технические характеристики потенциометра ПТП5К1

Вид характеристики	линейная
Допустимое отклонение от линейности	$\pm 0,1\%$
Номинальное сопротивление постоянному току	2 кОм
Допустимое отклонение по сопротивлению	$\pm 2\%$
Допустимая рассеиваемая мощность	1 Вт
Рабочий угол поворота вала	$\pm 170$ град.
Вес, не более	0,03кг

### Экспериментальная часть

#### Описание лабораторной установки

Блок «Датчики углового положения» лабораторного стенда представлен на Рисунке 3.1. В состав блока входят: оптический энкодер, потенциметрический датчик угловых перемещений и вращающийся трансформатор, соединенные между собой ременными передачами.

Угол поворота задается ручкой потенциметрического датчика, его величина в градусах или количестве импульсов энкодера считывается на Блоке индикации с нижнего информационного табло «Угол поворота» (см. Рисунок 1.5). Для этого следует соединить выходы А, В и Общ энкодера с аналогичными входами нижнего информационного табло Блока индикации. Переключатель режима работы табло установить в положение  $0 \dots 360^\circ$ . Выходные электрические сигналы потенциметрического датчика фиксируются с помощью мультиметра или осциллографа.

#### Порядок выполнения работы

- 1) Снять статическую характеристику потенциметрического датчика угла поворота на холостом ходу ( $R_H = \infty$ ).
  - 1.1) Подключить мультиметр к выходным клеммам ( $U_{\text{вых}}$ ) потенциметрического датчика. Мультиметр настроить на измерение напряжения постоянного тока.

- 1.2) Вращая ручку задатчика в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , снять не менее 10 значений выходного напряжения. Результаты измерений занести в Таблицу 4.2.
- 2) Снять статическую характеристику потенциметрического датчика угла поворота под нагрузкой.
  - 2.1) Выставить значение сопротивления нагрузки в пределах 100– 200 Ом, контролируя значение сопротивления при помощи мультиметра, работающего в режиме измерения сопротивления. Записать выставленное значение сопротивления нагрузки.
  - 2.2) Для снятия экспериментальной характеристики подключить мультиметр к клеммам потенциметра  $U_{\text{ВЫХ}}$ . К этим же клеммам подключить нагрузочное сопротивление  $R_{\text{нагр1}}$ .
  - 2.3) Вращая ручку потенциметра в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , снять не менее 10 значений выходного напряжения потенциметрического датчика. Результаты измерений занести в Таблицу 4.2.
  - 2.4) Повторить измерения по пп. 2.1-2.3 для разных значений сопротивления нагрузки в пределах 800–1000 Ом. Записать выставленное значение сопротивления нагрузки. Результаты измерений занести в Таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Угол поворота $\alpha$ , град									
$R_{\text{н0}}=\infty$	$U_{\text{вых}}, B$								
$R_{\text{н1}}=$	$U_{\text{вых}}, B$								
$R_{\text{н2}}=$	$U_{\text{вых}}, B$								

- 3) На одном графике построить все полученные зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$ .
- 4) Для каждой зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$  определить значение коэффициента передачи потенциметрического датчика, используя линейную аппроксимацию. Вычислить погрешность полученного значения.
- 5) По построенным экспериментальным характеристикам  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$  определить максимальные абсолютные и относительные погрешности, обусловленные влиянием нагрузки и проявляющимися в отклонении от характеристики  $U_{\text{ВЫХ}} =$

$f(\alpha)$ , при  $R_{н0} = \infty$ . За идеальную характеристику  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\omega)$  необходимо принять линеаризованную характеристику.

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- график статической характеристики;
- вычисленные значения погрешностей измерения скорости и коэффициента передачи потенциометрического датчика;
- сравнение полученных данных с паспортными;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа № 5

### Исследование синусно-косинусного вращающегося трансформатора

**Цель работы:** Изучение датчиков углового положения, работающих на переменном токе; исследование статических характеристик синусно-косинусного вращающегося трансформатора ВТМ-1М.

#### Теоретические сведения

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) – электрические микромашины переменного тока, предназначенные для преобразования угла поворота ротора  $\theta$  в напряжение, пропорциональное синусу или косинусу этого угла (СКВТ) или самому углу поворота ротора (ЛВТ). Для всех указанных случаев используется один и тот же тип ВТ при различных схемах подключения его обмоток.

Вращающиеся трансформаторы применяются в электромеханических вычислительных устройствах, предназначенных для решения геометрических и тригонометрических задач, выполнения различных математических операций, преобразования координат, разложения и построения векторов. В системах автоматического управления их используют в качестве датчиков угла рассогласования.

На статоре и роторе вращающегося трансформатора размещают по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, сдвинутые между собой в пространстве на  $90^\circ$  (см. Рисунок 5.1).

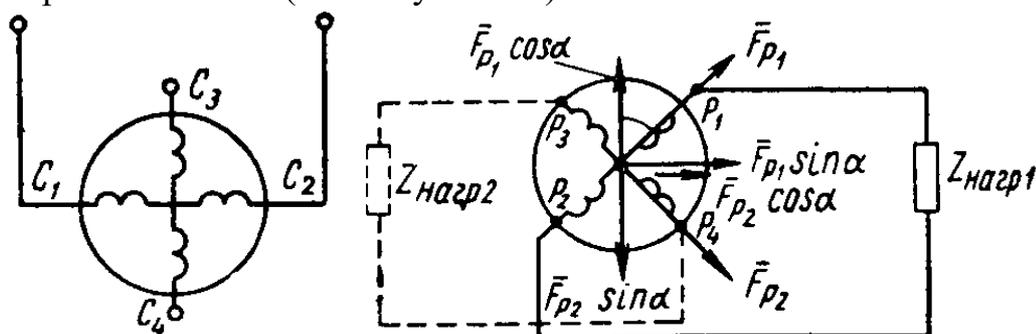


Рисунок 5.1 – Условное графическое обозначение синусно-косинусного вращающегося трансформатора

На статоре главная обмотка  $C_1C_2$  является обмоткой возбуждения, вспомогательная обмотка  $C_3C_4$  называется квадратурной. На роторе две вторичные обмотки — синусная  $P_1P_2$  и косинусная  $P_3P_4$ . Угол поворота ротора принято отсчитывать от оси вспомогательной обмотки  $C_3C_4$  до оси синусной обмотки ротора  $P_1P_2$ . Магнитопровод обычно выполнен из изолированных друг от друга листов электротехнической стали или пермолоя. Конструкция трансформатора обеспечивает синусоидальное

изменение взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора. Но из-за наличия зубцов на статоре и роторе мдс обмоток имеет ступенчатое распределение, а значит, содержит высшие гармоники. Кроме того, из-за нелинейности кривой намагничивания возникают гармоники насыщения. Все перечисленные факторы приводят к отклонениям от формы синусоидального пространственного распределения индукции. Чтобы ослабить высшие гармоники и в итоге повысить точность преобразования, применяют следующие меры:

- используют специальное исполнение обмоток ротора и статора с укороченным шагом (на роторе помещают обмотки, укороченные на  $1/3$  полюсного деления, а на статоре – на  $1/5$ , что устраняет 3-ю и 5-ю гармоники);
- используют скос пазов (для устранения зубцовой составляющей);
- обеспечивают ненасыщенный режим работы трансформатора;
- выдерживают жесткий допуск на эксцентриситет ротора.

ВТ подразделяют на четыре класса точности:

- нулевой, с погрешностью  $0,05\%$ ;
- первый, с погрешностью в пределах  $0,05–0,1\%$ ;
- второй –  $0,1–0,25\%$ ;
- третий –  $> 0,25\%$ .

В режиме СКВТ обмотка возбуждения статора подключается к источнику переменного тока, а одна из обмоток ротора (синусная или косинусная) – к нагрузке. При повороте ротора взаимная индуктивность обмоток будет изменяться по синусоидальному закону. При больших сопротивлениях нагрузки ( $Z_H \rightarrow \infty$ ) ЭДС в данной обмотке ротора будет изменяться в соответствии с законом

$$E_{sin} = E_{sin.m} \sin \theta , \quad (5.1)$$

где  $\theta$  – угол поворота ротора;  $E_{sin.m}$  – максимальное значение ЭДС в обмотке ротора (при  $\theta = 90^\circ$ ). Кроме того, максимальная ЭДС в обмотке ротора связана через коэффициент трансформации  $k_m$  с напряжением питающей сети (на обмотке возбуждения) выражением

$$E_{sin.m} = k_T U_B, \quad (5.2)$$

а коэффициент трансформации определяется отношением числа витков обмотки ротора и статора ( $k_m = W_p/W_c$ ).

Если  $Z_H < \infty$ , то по обмотке ротора потечет ток, который создаст магнитный поток  $\Phi$ , направленный вдоль оси обмотки. Его можно разложить на две составляющие – продольную  $\Phi_d$ , направленную вдоль оси

обмотки статора, и поперечную –  $\Phi_q$ , направленную перпендикулярно оси обмотки статора. Продольная составляющая действует навстречу потоку обмотки возбуждения и компенсируется увеличением тока в этой обмотке. Поперечная же составляющая, которая не может быть скомпенсирована со стороны статора, индуцирует в обмотке ротора ЭДС самоиндукции, которая искажает результирующее напряжение на нагрузке. Закон изменения результирующего напряжения уже не будет строго синусоидальным во всем диапазоне изменения угла поворота. Для синусной обмотки результирующее напряжение будет иметь вид

$$U_{с.рез} = \frac{E_{sin.m} \sin \theta}{1+b \cos^2 \theta}, \quad (5.3)$$

а для косинусной обмотки –

$$U_{с.рез} = \frac{E_{cos.m} \cos \theta}{1+b \sin^2 \theta}, \quad (5.4)$$

где  $b$  – комплексная величина, зависящая от параметров обмотки и сопротивления нагрузки. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем большее отклонение результирующего напряжения от синусоидального (косинусоидального).

Для устранения погрешности, возникающей из-за влияния поперечной составляющей магнитного потока, используют первичное и вторичное симметрирование. При первичном симметрировании квадратурную обмотку статора замыкают на малое сопротивление. При этом поперечный поток, направление которого совпадает с осью квадратурной обмотки, индуцирует в ней ЭДС. Эта ЭДС порождает электрический ток в цепи и магнитный поток. Результирующий магнитный поток по поперечной оси определяется суммарной МДС, создаваемой токами в обмотке ротора и квадратурной обмотке статора. Так как сопротивление, на которое замкнута квадратурная обмотка, мало, то система обмоток представляет собой трансформатор, работающий в режиме близком к короткому замыканию. При этом вследствие размагничивающего действия короткозамкнутой обмотки результирующий поток по поперечной оси уменьшается и не влияет на работу СКВТ. К недостатку первичного симметрирования относят непостоянство тока в обмотке возбуждения (зависимость его от угла поворота), а значит, при заданном  $U_B$  будет изменяться и результирующее выходное напряжение. В результате будет появляться дополнительная погрешность. Первичное симметрирование применяют лишь для ВТ, непосредственно подключенных к питающей сети, или совместно с вторичным симметрированием.

При вторичном симметрировании к одной из обмоток ротора

подключается нагрузка, а к другой – сопротивление, равное по величине сопротивлению нагрузки. Поперечные составляющие потоков, создаваемые этими обмотками, оказываются равными и противоположно направленными. В результате они взаимно компенсируются. Ток в обмотке возбуждения, расположенной на статоре, остаётся неизменным (не зависит от угла поворота ротора).

В лабораторной работе исследуется вращающийся трансформатор ВТМ-1М. Внешний вид машины показан на Рисунке 5.2. Основные технические характеристики приведены в Таблице 5.1.



Рисунок 5.2 – Вращающийся трансформатор ВТМ-1М

Таблица 5.1 – Технические характеристики вращающегося трансформатора ВТМ-1М

Характеристика	Показатель
Номинальное напряжение возбуждения	26В±1,3В
Номинальная частота напряжения возбуждения	400Гц
Ток холостого хода	43мА
Погрешность воспроизведения синусной зависимости	1,0 %
Температура окружающей среды	-60°С до +50°С
Относительная влажность воздуха	до 98% при 20°С
Атмосферное давление пониженное	5,46 кПа;
Вибрационные нагрузки в диапазоне частот	10Гц-200Гц с ускорением 58,8м/с <sup>2</sup>

## Экспериментальная часть

### Описание лабораторной установки

Блок «Датчики углового положения» лабораторного стенда представлен на Рисунке 3.1. В состав блока входят: оптический энкодер,

потенциометрический датчик угловых перемещений и вращающийся трансформатор, соединенные между собой ременными передачами. Угол поворота задается ручкой, установленной на валу потенциометрического датчика. Его величина в градусах или количестве импульсов энкодера отображается на нижнем информационном табло «Угол поворота» блока индикации (см. Рисунок 1.5). Выходные электрические сигналы устройства фиксируются с помощью мультиметра и осциллографа.

### Порядок выполнения работы

- 1) Исследовать работу синусно-косинусного вращающегося трансформатора с нагрузкой
  - 1.1) Подключить вольтметр к зажимам синусной обмотки  $U_{sin}$ . Входы А, В и Общ индикатора подключить соответственно к выходам А, В и Общ энкодера. Установить тумблером режим индикации «0 ... 360°».
  - 1.2) Выставить при помощи мультиметра значение сопротивления нагрузки  $R_{нагр1}$  в диапазоне 200-300 Ом. Записать выставленное значение сопротивления.
  - 1.3) Подключить нагрузку к синусной обмотке вращающегося трансформатора, установив соответствующие переключки. Мультиметр подключить к гнездам  $U_{sin}$ .
  - 1.4) Вращая ручку задатчика угла в диапазоне 0–360°, сделать не менее 20 измерений напряжения  $U_{sin} = f(\alpha)$  при данной нагрузке. Результаты измерений занести в Таблицу 5.2.
  - 1.5) Установить значение сопротивления нагрузки  $R_{нагр2}$  из диапазона 600–900 Ом. Вращая ручку задатчика угла в диапазоне 0–360°, сделать не менее 20 измерений напряжения  $U_{sin} = f(\alpha)$ , аналогично п.1.4. Результаты измерений занести в Таблицу 5.2.
  - 1.6) Зафиксировать  $U_{sin}$  при  $\alpha = 90^\circ$  и вычислить значение  $U_{Asin M}$  – максимальное значение выходного сигнала, несущего информацию о величине угла поворота.
- 2) Выполнить обработку полученных данных
  - 2.1) Максимальное значение выходного сигнала определяет идеальную форму статической характеристики  $U_{sin} = f(\alpha)$  по формуле:

$$U_{\text{вых}} = U_{Asin M} \cdot \sin \alpha.$$

По экспериментальным данным определить абсолютную и относительную ошибки  $\Delta U_A$  и  $\Delta U_0\%$  для каждого значения угла поворота по формулам:

$$\Delta U_A = |U_{Asin} - U_{ВЫХ}|,$$

$$\Delta U_0\% = (\Delta U_A)/U_{Asin M} \cdot 100.$$

Результаты занести в Таблицу 5.2.

Таблица 5.2

$R_{H1} =$	$\alpha$ , град								
	$U_{sin}$ , В								
	$U_{Asin}$ , В								
	$U_{вых}$ , В								
	$\Delta U_A$ , В								
	$\Delta U_0\%$								
$R_{H2} =$	$\alpha$ , град								
	$U_{sin}$ , В								
	$U_{Asin}$ , В								
	$U_{вых}$ , В								
	$\Delta U_A$ , В								
	$\Delta U_0\%$								

- 2.2) По результатам измерений и вычислений построить графики  $U_{Asin} = f(\alpha)$ , а также расчетные кривые  $U_{ВЫХ} = f(\alpha)$ , для двух значений нагрузки.
- 3) Выполнить пункты 1 и 2 для исследования с косинусной обмоткой. Результаты исследований занести в таблицу, аналогичную 5.2.
- 4) Снятие характеристик ВТ при первичном симметрировании
- 4.1) Собрать при помощи перемычек схему первичного симметрирования ВТ, соединив накоротко гнезда К1 и К2. К синусной обмотке ротора подключить нагрузку, установив  $R_{нагр1 sin} = 900 \text{ Ом}$ .
- 4.2) Повторить п.п. 1 и 2. Данные занести в таблицу, аналогичную по форме таблице 5.2
- 5) Снятие характеристик ВТ при вторичном симметрировании
- 5.1) Собрать при помощи перемычек схему ВТ со вторичным симметрированием, установив  $R_{нагр1 sin} = R_{нагр2 cos} = 900 \text{ Ом}$ .
- 5.2) Повторить п.п. 1 и 2. Данные занести в таблицу, аналогичную по форме таблице 5.2

- б) Сравнить полученные результаты по абсолютным и относительным ошибкам.

### **Содержание отчета**

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики снятых характеристик;
- сравнение характеристик вращающегося трансформатора с первичным и вторичным симметрированием;
- сравнение полученных данных с паспортными;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа №6

### Исследование терморезистора как датчика температуры

**Цель работы:** Изучение специфики использования терморезисторов в датчиках температуры, снятие и линеаризация статической характеристики датчика.

#### Теоретическая часть

Датчики температуры широко используются в различных технических системах. С их помощью обеспечивается измерение, контроль, стабилизация, индикация температуры газов, жидкостей, твердых объектов, расплавленных металлах и т.д.

Все датчики температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. Данная работа посвящена изучению контактных датчиков температуры. К их числу относят:

- терморезисторы на проводниках и полупроводниках;
- термопары;
- интегральные датчики температуры.

#### Термисторы

Термисторы – полупроводниковые терморезисторы, изготовленные с применением методов порошковой металлургии, имеющие форму трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок с размерами от 1-10 мкм до 1-2 см. Для термистора характерно большое значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Этот коэффициент в десятки раз превышает значение этого коэффициента у металлов. Конструктивная простота устройства, способность работать в условиях воздействия различных внешних возмущений (температура, влажность, вибрации и т.д.) при значительных механических нагрузках, а также стабильность характеристик во времени обеспечивают термисторам лидирующие позиции по использованию в различных технических системах.

Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

Электрическое сопротивление термистора существенно убывает или возрастает с ростом температуры. Различают термисторы с отрицательным (NTC - Negative Temperature Coefficient) и положительным ТКС (PTC - Positive Temperature Coefficient). Кроме того, они могут отличаться по рабочему температурному диапазону:

- низкотемпературные рабочий диапазон температур – ниже 170 К;
- среднетемпературные в диапазоне – (170 – 510) К;
- высокотемпературные в диапазоне – свыше 510 К.

Широкий температурный диапазон и способность работать в сильных магнитных полях относят к основным достоинствам термисторов. К недостаткам можно отнести плохую повторяемость характеристик от образца к образцу одного типа и нелинейность статической температурной характеристики.

Статическую характеристику NTC в рабочем диапазоне температур (зависимость сопротивления термистора от температуры) можно с высокой точностью описать выражением

$$R_T = R_N \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)}, \quad (6.1)$$

где  $R_T$  – сопротивление рабочего тела термистора при данной температуре  $T$ , Ом;  $R_N$  – номинальное сопротивление термистора при температуре  $T_N$ , Ом;  $T$ ,  $T_N$  – температура, К;  $B$  – коэффициент, постоянный для данного экземпляра термистора (из паспортных данных), К.

Значение коэффициента  $B$  определяется материалом датчика и характеризует чувствительность термистора к изменению температуры.

При использовании терморезисторов в датчиках температуры стараются линеаризовать нелинейную зависимость (6.1). Для этих целей применяются различные способы, например, подключение параллельно терморезистору низкоомного постоянного резистора. В современных цифровых датчиках используют также программную линеаризацию характеристики по заранее снятым градуировочным таблицам.

### **Интегральные датчики температуры**

Современная электронная промышленность выпускает датчики температуры [4], объединяющие полупроводниковый чувствительный элемент и электронную схему обработки сигнала в одной микросхеме. Такие датчики обладают линейной статической характеристикой, откалиброванной на заводе-изготовителе, и позволяют достаточно просто и точно измерять температуру. Датчики очень компактны, поэтому их удобно встраивать в приборы. Кроме того, они экономичны в производстве, что обеспечивает их низкую стоимость. По этому показателю интегральные датчики имеют преимущества перед термопарами и платиновыми термометрами сопротивления. Недостаток интегральных датчиков – относительно низкие рабочие температуры, не более 150°C.

Специальная электронная схема обработки сигнала чувствительного элемента обеспечивает высокую линейность и стабильность статической характеристики интегрального термодатчика. Поэтому в данной работе интегральный датчик температуры используется в качестве эталонного (опорного) измерителя температуры объекта.

### **Термостат**

Термостат - устройство для поддержания стабильной температуры объекта. Поддержание стабильной температуры обеспечивается либо за счёт использования автоматических терморегуляторов, либо с использованием подходящего физического явления, например фазового перехода состояния вещества – таяние льда. Для уменьшения потерь энергии термостаты, как правило, теплоизолируют [5].

В термодинамике термостатом часто называют систему, обладающую столь большой теплоёмкостью, что подводимое к ней тепло медленно меняет её температуру. Термостаты можно классифицировать по диапазону рабочих температур:

- термостаты высоких температур (300...1200°C);
- термостаты средних температур (-60...500°C);
- термостаты низких температур (менее -60 °C (200 К )) – криостаты.

Термостаты можно классифицировать по точности поддержания температуры [2]:

- 5-10 градусов и хуже, как правило, достигается без перемешивания, за счёт естественной конвекции теплоносителя;
- 1-2 градуса (хорошая тепловая стабильность для воздушных, очень посредственная для жидкостных), как правило, с принудительным перемешиванием теплоносителя;
- 0,1 градуса (очень хорошая тепловая стабильность для воздушных, на уровне лучших образцов, средняя для жидкостных);
- 0,01 градуса (как правило, достигается в жидкостных термостатах специальной конструкции), практически невозможно получить в воздушном термостате с вентилятором.

Можно выделить два основных способа работы термостатов:

- В термостате поддерживается постоянной температура теплоносителя, заполняющего термостат. Исследуемое тело при этом находится в контакте с теплоносителем и имеет его температуру. В качестве теплоносителя обычно используют воздух, спирт (-110 ... 60°C),

воду (10...95°C), масло (-10...300°C) и др.

- Исследуемое тело поддерживается при постоянной температуре в адиабатических условиях (теплоноситель отсутствует). Подвод или отвод теплоты осуществляется специальным тепловым ключом (в термостатах низких температур) или же используются электропечи с терморегулятором и массивным металлическим блоком, в который помещается исследуемое тело (в термостатах высоких температур).

Для обеспечения стабильности измерений термостат делается инерционным. Обычное время нагрева рабочего вещества термостата до стабильного значения составляет не менее 30 минут.

### Экспериментальная часть

#### Описание лабораторной установки

Блок для изучения датчиков температуры расположен в левом верхнем углу лабораторного стенда. Лицевая панель блока показана на Рисунке 6.1.

В лабораторной работе исследуется термистор NTC. В качестве эталонного используется интегральный датчик температуры LM235A фирмы Texas Instrument.

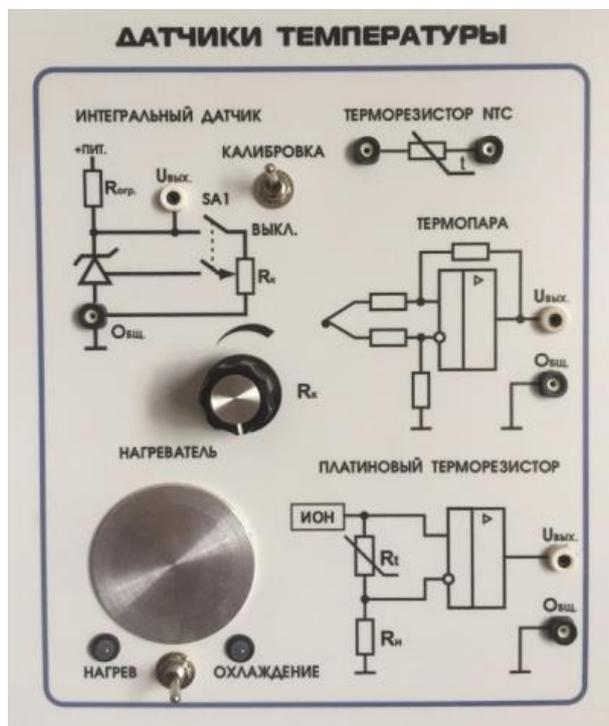


Рисунок 6.1

В качестве объекта для измерения температуры используется термостат В-1009N, наружная поверхность которого в виде диска из

алюминия располагается на лицевой панели. Включение и выключение нагрева производится с помощью тумблера SA1.

Температура внутри термостата, где расположены исследуемые датчики, измеряется с помощью интегрального датчика температуры LM235A. Этот датчик позволяет измерять температуру в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Выходное напряжение датчика линейно зависит от абсолютной температуры, коэффициент передачи  $K_n = 0,01 \text{ В}/^{\circ}\text{K}$ . Простое включение датчика по типовой схеме обеспечивает на выходе напряжение  $+2,98 \pm 0,01 \text{ В}$  при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$  (т.е. абсолютной температуре  $+298,2 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ). При необходимости значение выходного напряжения может быть откалибровано при помощи внешнего калибровочного переменного резистора номиналом  $10 \text{ кОм}$  до значения  $+2,982 \text{ В}$  при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ .

### Порядок выполнения лабораторной работы

- 1) Снять зависимость сопротивления терморезистора от температуры в режимах нагрева и охлаждения. Для проведения испытаний необходимо выполнить следующие действия:
  - 1.1) подсоединить один из мультиметров в режиме измерения сопротивления к выходным клеммам датчика NTC;
  - 1.2) второй мультиметр в режиме измерения напряжений подключить к выходу интегрального датчика температуры (ИДТ);
  - 1.3) тумблер SA1 переключить в положение «НАГРЕВ»;
  - 1.4) снимать показания мультиметров с интервалом в 1 минуту в течение 12 - 15 минут;
  - 1.5) заносить показания мультиметров в Таблицу 6.1;
  - 1.6) отключить нагрев и в том же темпе снимать показания в режиме охлаждения;
  - 1.7) показания заносить в таблицу по той же форме.

Пересчитать выходное напряжение ИДТ в температуру, используя коэффициент  $K_n = 0,01 \text{ В}/^{\circ}\text{K}$ .

Таблица 6.1

Датчик		Выходное напряжение (при нагреве) $U_{\text{ВЫХ}}$ , В					
		$t_0$	$t_0+1\text{мин}$	$t_0+2\text{мин}$	$t_0+3\text{мин}$	...	$t_0+15\text{мин}$
Интегральный	U, В						
	T, $^{\circ}\text{K}$						
Термистор NTC	R, Ом						

По полученным данным построить график статической характеристики термистора (зависимость  $R = f(T)$ ). Определить величину

гистерезиса  $\gamma$ , % (при его наличии).

Используя логарифмирование зависимости (6.1) и применив метод наименьших квадратов, определить параметр  $B$ . В нелинейной зависимости. Номинальное значение сопротивления равно  $R_N = 6,8$  кОм при  $T_N = 298^\circ$  К. Вычислить погрешность определения параметра  $B$ .  
Линеаризация статической характеристики термистора:

- используя один из потенциометров стенда, выставить по мультиметру величину его сопротивления в пределах от 1 до 2 кОм. Записать значение сопротивления;

- подключить потенциометр параллельно терморезистору;

- снять зависимость сопротивления схемы от температуры в режимах нагрева и охлаждения, действуя аналогично п.1. Показания мультиметров заносить в таблицу, аналогичную таблице 6.1;

По полученным данным построить график статической характеристики (зависимость  $R = f(T)$ ) схемы. Определить величину гистерезиса  $\gamma$ , % (при его наличии).

Методом наименьших квадратов вычислить параметры  $R_0$  и  $K_R$  линейной аппроксимации статической характеристики

$$R = R_0 + K_R \cdot (T - T_N), \quad (6.2)$$

где  $R$  – сопротивление схемы при данной температуре  $T$ , Ом;  $R_0$  — номинальное сопротивление термистора при температуре  $T_N$ , Ом;  $T, T_N$  — температура, К;  $K_R$  — температурный коэффициент сопротивления, Ом \* К<sup>-1</sup>. Значение  $T_N$  принять равным  $298^\circ$  К, определить погрешности вычисленных значений параметров.

Определить максимальное отклонение реальной статической характеристики схемы от ее линейной аппроксимации (6.2). Вычислить нелинейность статической характеристики схемы.

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики снятых характеристик и их аппроксимаций;
- вычисленные значения параметров с указанием погрешностей;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа №7

### Исследование датчиков температуры с электронными преобразователями сигнала

**Цель работы:** Изучение датчиков температуры с электронными преобразователями сигнала, снятие статических характеристик и определение параметров датчиков.

#### Теоретическая часть

Датчики температуры широко используются в различных технических системах. С их помощью обеспечивается измерение, контроль, стабилизация, индикация температуры газов, жидкостей, твердых объектов, расплавленных металлах и т.д.

Все датчики температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. Данная работа посвящена изучению контактных датчиков температуры. К их числу относят:

- термопары;
- терморезисторы на проводниках и полупроводниках;
- интегральные датчики температуры.

#### Термопары

Термопары – это термоэлектрические контактные датчики, которые состоят из двух (пары) соединенных проводников, разных по физическим свойствам. Термопары не требуют внешнего источника питания и сами вырабатывают напряжение в зависимости от температуры. Термопары позволяют измерять достаточно высокие температуры (до +2300°C). Кроме того, термопары имеют высокую линейность и стабильность измерений.

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

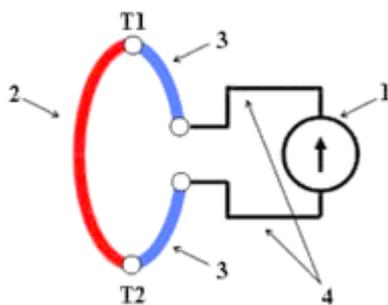
Если спай двух различных металлов А и В (термопара) имеет температуру  $T_1$ , а свободные (неспаянные) концы – температуру  $T_2$ , то между свободными концами возникает термоЭДС:

$$\varepsilon = \alpha_{A-B}(T_1 - T_2), \quad (7.1)$$

где  $\alpha_{A-B} = \frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}$  – коэффициент термоЭДС или относительная удельная термоЭДС,  $k$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона,  $n_1$ ,  $n_2$  –

концентрации свободных электронов в соприкасающихся металлах.

Обычно для измерения температуры используют две термопары, как показано на Рисунке 7.1. Это связано с тем, что термоЭДС возникает не только в месте контакта металлов А и В, но и в местах контактов металлов А и В с соединительными проводниками (СП). При изменении температуры окружающей среды контактные разности потенциалов В-СП также изменяются, но компенсируют друг друга и не влияют на показания прибора 1. Показание прибора 1 зависит только от разности температур  $T_1 - T_2$ . Для получения зависимости только от одной температуры, например  $T_1$ , значение другой температуры ( $T_2$ ) следует стабилизировать в термостате, либо использовать компенсацию ее изменения посредством специальной электронной схемы.



*Рисунок 7.1 – Типовая схема включения термопары при измерении температуры: 1- показывающий прибор, 2 – проводник А, 3- проводники В, 4 – соединительные проводники.*

В зависимости от применяемых для изготовления электродов металлов различают основные типы термопар:

- платинородий - платиновые (тип R);
- медь-константановые (тип Т);
- железо-константановые (тип J);
- хромель-алюмеливые (тип К).

Статические характеристики термопар  $U = f(T)$  обычно задают с помощью градуировочных таблиц. К числу достоинств термопар следует отнести простоту изготовления, достаточно высокую точность (вплоть до  $\pm 0,01$  °С), большой температурный диапазон измерений (от -250 °С до +2500 °С), надежность в эксплуатации, возможность отдельной градуировки вторичного прибора и первичного преобразователя – термопары.

Недостатками термопар являются: большая инерционность (до 180 с), необходимость применения специальной электронной схемы (вторичного прибора) для усиления сигнала термопары и стабилизации или компенсации

второй температуры.

### Терморезисторы

Принцип действия терморезистивных преобразователей основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Наиболее широко применяют платиновые и медные терморезисторы.

Сопротивление платиновых терморезисторов в диапазоне температур от 0 до 650°C описывается нелинейным уравнением:

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2), \quad (7.2)$$

где  $R_{\theta}$ ,  $R_0$  – сопротивления преобразователя соответственно при рабочей и нулевой температурах;  $A$ ,  $B$  – постоянные коэффициенты.

Для платиновой проволоки, применяемой в промышленных терморезисторах, параметры  $A = 3,96847 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $B = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ . В интервале температур от 0 до -200 °C зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид:

$$R_{\theta} = R_0(1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)),$$

где  $C = -4,356 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$ .

К недостаткам платиновых преобразователей температуры можно отнести довольно высокую загрязняемость платины парами металлов (особенно железа) при высоких температурах и сравнительно невысокую химическую стойкость в восстановительной среде. В вследствие этого материал становится хрупким, параметры характеристики датчика изменяются.

Медные терморезистивные преобразователи широко используют в диапазоне температур от 50 до 180°C. Они имеют низкую стоимость и довольно высокую стойкость к коррозии. Зависимость сопротивления меди от температуры описывается линейным уравнением:

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta), \quad (7.3)$$

где  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Чувствительность проволочных медных терморезисторов  $K_{SM} = dR_{\theta}/d\theta = \alpha R_0$ , платиновых –  $K_{Sn} = R_0(A + 2B\theta)$ .

Чувствительность проволочных медных терморезисторов постоянна, а чувствительность платиновых изменяется с изменением температуры. При одинаковых значениях  $R_0$  чувствительность медных терморезисторов выше.

К недостаткам медных преобразователей температуры относится высокая окисляемость меди при нагревании, вследствие чего их применяют в сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

## **Экспериментальная часть**

### **Описание лабораторной установки**

Блок для изучения датчиков температуры расположен в левом верхнем углу лабораторного стенда. Лицевая панель блока показана на Рисунке 6.1.

В лабораторной работе исследуются:

- датчик температуры на термопаре ЕТС-01 с электронными преобразователями сигнала;
- платиновый терморезистор Honeywell HEL 775 с электронными преобразователями сигнала.

Каждый из исследуемых датчиков имеет свою схему включения, которая изображена на лицевой панели, с клемм исследуемых датчиков снимается выходное напряжение.

В качестве объекта для измерения используется термостат В-1009N, наружная поверхность которого в виде диска из алюминия располагается на лицевой панели. Температура внутри термостата, где расположены исследуемые датчики, измеряется с помощью интегрального датчика температуры LM235A. Этот датчик позволяет измерять температуру в диапазоне от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Выходное напряжение датчика линейно зависит от абсолютной температуры, коэффициент передачи  $K_{\text{и}} = 0,01 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$ . Простое включение датчика по базовой схеме обеспечивает на выходе напряжение  $+2,98 \pm 0,01 \text{ В}$  при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$  (т.е абсолютной температуре  $+298,2^{\circ}\text{K}$ ). При необходимости значение напряжения может быть откалибровано при помощи внешнего калибровочного переменного резистора до значения  $+2,982 \text{ В}$  при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Все выходные величины измеряются с помощью мультиметров стенда.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

- 1) Снятие статических характеристик исследуемых датчиков температуры в режимах нагрева и охлаждения. Для проведения испытаний необходимо выполнить следующие действия:

- 1.1) один из мультиметров в режиме измерения напряжений подключить к выходу интегрального датчика температуры (ИДТ);
- 1.2) второй мультиметр в режиме измерения напряжений последовательно в ходе эксперимента подключать к выходам исследуемых датчиков;
- 1.3) уставить тумблер SA1 в положение «НАГРЕВ»;
- 1.4) снимать показания мультиметров с интервалом в 1 минуту в течение 12 - 15 минут;
- 1.5) заносить показания мультиметров в Таблицу 7.1;
- 1.6) отключить нагрев и в том же темпе снимать показания в режиме охлаждения;
- 1.7) показания заносить в таблицу по той же форме.
- 1.8) Пересчитать выходное напряжение ИДТ в температуру, используя коэффициент  $K_{и} = 0,01 \text{ В}/^{\circ}\text{К}$ .

Таблица 7.1

Датчик		Выходное напряжение (при нагреве) $U_{\text{ВЫХ}}$ , В					
		$t_0$	$t_0+1\text{мин}$	$t_0+2\text{мин}$	$t_0+3\text{мин}$	...	$t_0+15\text{мин}$
Интегральный	U, В						
	T, $^{\circ}\text{C}$						
Термопара	U, В						
Платиновый терморезистор	U, В						

По полученным данным построить статические характеристики (зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(T)$ ) датчиков температуры. Методом наименьших квадратов вычислить значения параметров  $\alpha_{A-B}$ , А и В статических характеристик (7.1), (7.2) и оценить погрешности вычисления.

2) Построение переходной характеристики термостата.

Для построения переходных характеристик термостата при нагреве и охлаждении можно воспользоваться данными Таблицы 7.1, построив соответствующую зависимость температуры от времени  $T = f(t)$ . По полученным кривым определить время переходного процесса при нагреве и охлаждении и постоянную времени термостата, представив его аperiodическим звеном 1-го порядка с коэффициентом передачи, равным 1.

### Содержание отчета:

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемых датчиков;
- схема экспериментальной установки;

- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики снятых характеристик и их аппроксимаций;
- вычисленные значения параметров с указанием погрешностей;
- вычисление постоянной времени термостата;
- выводы по работе.

## **Лабораторная работа №8**

### **Исследование бесконтактных датчиков приближения**

**Цель работы:** Ознакомление с устройством бесконтактных датчиков приближения, изучение принципов работы и схем включения.

#### **Теоретическая часть**

В автоматизированных и автоматических системах управления наряду с измерительными преобразователями широко используются пороговые датчики приближения, основной функцией которых является формирование бинарного сигнала или замыкание (размыкание) контакта при наступлении определенного события. Такими событиями могут быть: приближение на определенную величину одной детали конструкции к другой, достижение определенного уровня заполнения емкости, появление в рабочей зоне режущего инструмента руки оператора, обрыв нити прядильного станка и т.д.

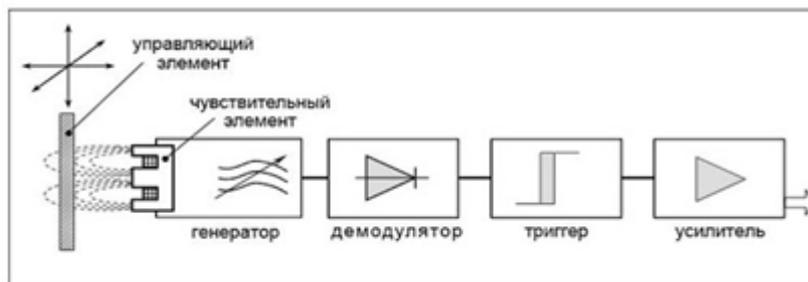
По типу взаимодействия с объектом датчики приближения делятся на контактные и бесконтактные. Контактные датчики или концевые выключатели состоят из электрических контактов, которые механически замыкаются (размыкаются), когда объект достигает определенного положения. Они до сих пор используются в различных технических системах, но в силу наличия механических контактов, ресурс которых ограничен, они активно вытесняются бесконтактными датчиками.

Бесконтактные датчики приближения – это устройства, позволяющие фиксировать присутствие, приближение или удаление объектов без механического контакта с ними. Они имеют гораздо более длительный ресурс, максимально защищены от негативных воздействий внешней среды, обеспечивают высокое быстродействие и при необходимости более высокую частоту включений. Широко применяются на автоматизированных промышленных линиях, в медицинских и бытовых приборах. В зависимости от принципа действия наиболее популярными являются индуктивные, емкостные, оптические, ультразвуковые и магнитные датчики.

#### **Индуктивные бесконтактные датчики приближения**

Чувствительным элементом индуктивного датчика является катушка индуктивности, которая имеет открытый в сторону активной поверхности магнитопровод. При подаче на катушку напряжения от генератора переменного тока перед активной поверхностью образуется магнитное

поле, создавая рабочую зону датчика, где линии магнитного поля замыкаются по воздуху. При внесении в эту зону металлического предмета изменяется сопротивление магнитному потоку (уменьшается), а значит, увеличивается индуктивность и реактивное сопротивление обмотки. Нагрузка на генератор изменяется, что фиксируется электронной схемой, которая формирует выходной сигнал датчика. Электронная схема содержит выпрямитель, триггер и усилитель, как показано на Рисунке 8.1.



*Рисунок 8.1 – Функциональная схема индуктивного датчика*

### **Емкостные бесконтактные датчики приближения**

Чувствительный элемент емкостного бесконтактного датчика представляет собой «развернутый» конденсатор, электроды которого в форме колец или пластин располагаются на одной поверхности. При подаче питающего напряжения переменного тока перед поверхностью электродов возникает электрическое поле, силовые линии которого замыкаются на электродах через воздушный слой перед их поверхностью. Емкость такого конденсатора невелика ввиду малости диэлектрической проницаемости воздуха. Обычно конденсатор включается в цепь обратной связи автогенератора, сигнал на выходе которого в исходном состоянии имеет небольшую амплитуду. При появлении в воздушном слое датчика объекта с диэлектрической проницаемостью более единицы величина емкости конденсатора резко возрастает. При этом возрастает и сигнал на выходе автогенератора, что фиксируется схемой первичного преобразователя, который формирует выходной сигнал датчика. Схема первичного преобразователя обычно состоит из выпрямителя (демодулятора), триггера и усилителя (см. Рисунок 8.2). Все элементы электроники обычно размещаются в цилиндрическом корпусе, который для герметичности заливается специальным компаундом.

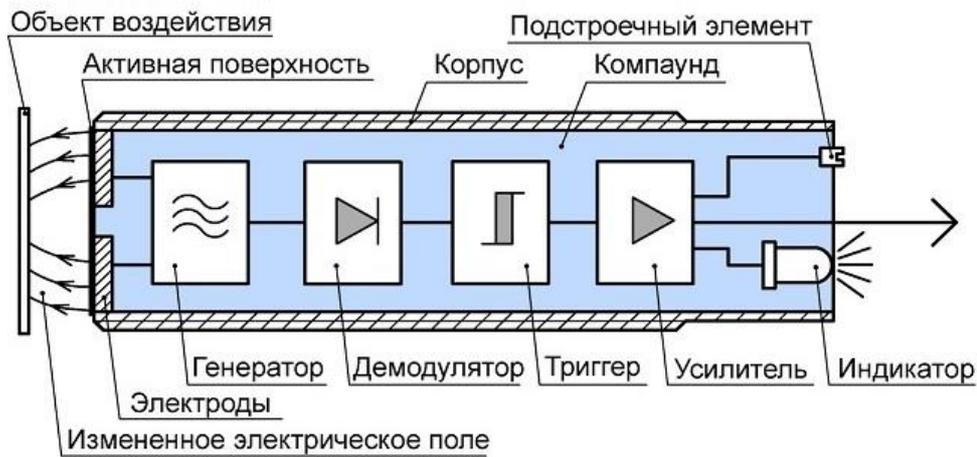


Рисунок 8.2 – Функциональная схема емкостного датчика

Емкостные датчики способны обнаруживать как металлы так и диэлектрические образцы из дерева, бумаги, стекла и т.д. При воздействии объектов из различных материалов расстояние переключения  $S_r$  изменяется. Зависимость расстояния переключения  $S_r$  от диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  материала объекта представлена на Рисунке 8.3. Диэлектрические проницаемости материалов приведены в Таблице 8.1

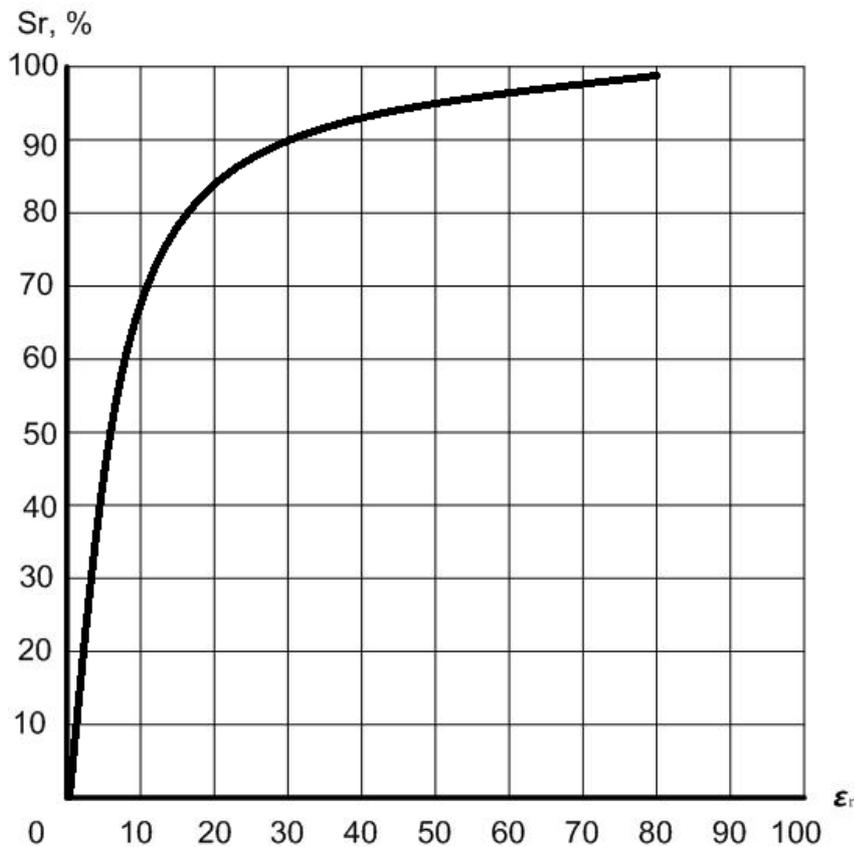


Рисунок 8.3 – Зависимость расстояния переключения от величины диэлектрической проницаемости материала объекта

Таблица 8.1

Материал	$\epsilon_r$	Материал	$\epsilon_r$	Материал	$\epsilon_r$
Бумага	2,3	Мрамор	8,3	Спирт этиловый	26
Бензол	2,3	Нефть	2,2	Стекло	5
Винипласт	4	Оргстекло	3,2	Стеклотекстолит	5,5
Вода	80	Полиамид	5	Тальк	1,6
Воздух	1	Полипропилен	2,3	Толуол	2,4
Гетинакс	7,5	Полистирол	3	Масло трансформаторное	2,3
Дерево	2-7	Полиэтилен	2,3	Цемент	2

### Оптические бесконтактные датчики приближения

Оптические бесконтактные выключатели [6,7] – это оптико-электронные устройства, реагирующие на изменение параметров светового потока, которое может быть вызвано попаданием объектов в их рабочую зону. Датчик содержит два базовых элемента: излучатель (передатчик) и приемник излучения. Эти элементы могут быть смонтированы как в одном корпусе, так и в отдельных корпусах. По принципу работы выделяют три группы оптических датчиков:

- тип Т – датчики барьерного типа (приём луча от отдельно стоящего излучателя);
- тип R – датчики рефлекторного типа (приём луча, отражённого катафотом);
- тип D – датчики диффузионного типа (приём луча, рассеянно отражённого объектом).

Функциональный состав оптического датчика показан на Рисунке 8.4. Как правило, в состав передатчика входят излучатель, генератор, оптическая система и индикатор. В качестве излучателя используют полупроводниковый излучающий диод, работающий в видимом или ближнем ИК диапазоне длин волн. Генератор формирует последовательность электрических импульсов определенной частоты, которые подаются на излучатель. Оптическая система формирует поток излучения (диаграмму направленности). Индикатор информирует о состоянии передатчика (включен -выключен). Все элементы заключены в корпус и залиты компаундом, для защиты от влаги и пыли.

Приемник состоит из оптической системы, фотоприемника, усилителя, порогового элемента, электронного ключа, индикатора и подстроечного элемента. Оптическая система формирует принятый от передатчика световой поток на приемной площадке фотоприемника, который преобразует его в электрический сигнал. Усилитель усиливает электрический сигнал до необходимого значения, пороговый элемент

определяет порог срабатывания датчика и управляет электронным ключом. Ключ, в свою очередь, замыкает цепь выходного сигнала или подключает нагрузку, он имеет защиту от перегрузки и короткого замыкания. Подстроечный элемент позволяет регулировать чувствительность приемника. Все элементы также размещены в корпусе и залиты компаундом. В случае совмещенной схемы передатчик и приемник размещаются в одном корпусе.

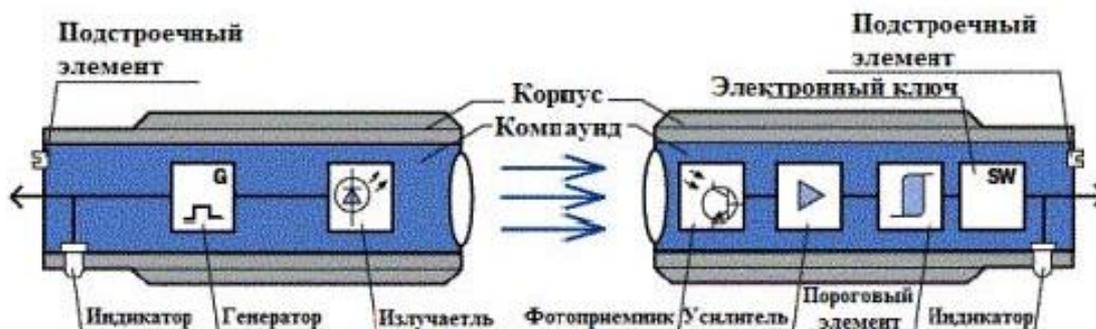


Рисунок 8.4 – Функциональный состав оптического датчика

В датчиках барьерного типа передатчик и приемник устанавливаются на одной оси напротив друг друга. Срабатывание происходит в случае, если поток будет перекрыт каким-либо непрозрачным объектом. Отличительной особенностью таких выключателей является повышенная дальность действия (до нескольких десятков метров). Кроме того, они обладают повышенной защищенностью от влияния внешних факторов (капли дождя, пыль и т.д.).

В датчиках рефлекторного и диффузионного типов используется эффект отражения оптического потока от объекта. Настройка номинального расстояния срабатывания выключателей выполняется от листа белой бумаги с размерами 150·150 мм. Для корректировки расстояния срабатывания от объектов с другой отражающей способностью, которая зависит от материала, выбирается поправочный коэффициент из Таблицы 8.2.

Таблица 8.2

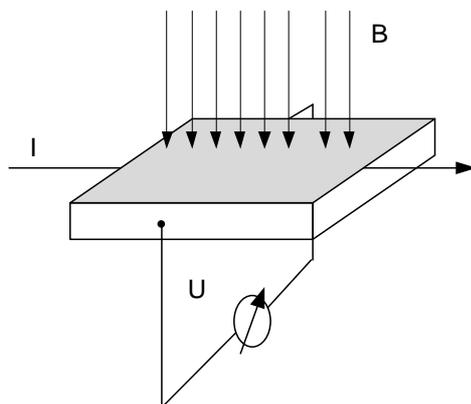
№	Материал	Поправочный коэффициент
1	Белая бумага	1,0
2	Картон	0,8
3	Прозрачный пластик	0,6
4	Дерево	0,4
5	Черный пластик	0,2
6	Металл чистый	1,4

Выключатели рефлекторного типа обычно комплектуются отражателем (элементом из специального материала с хорошими

оптическими характеристиками), который устанавливается напротив датчика. При пересечении или прерывании потока непрозрачным объектом происходит срабатывание выключателя. Возможна, установка рефлектора на перемещаемый объект, тогда срабатывание выключателя происходит при его появлении в определенной рабочей зоне.

### **Магниточувствительные бесконтактные датчики приближения**

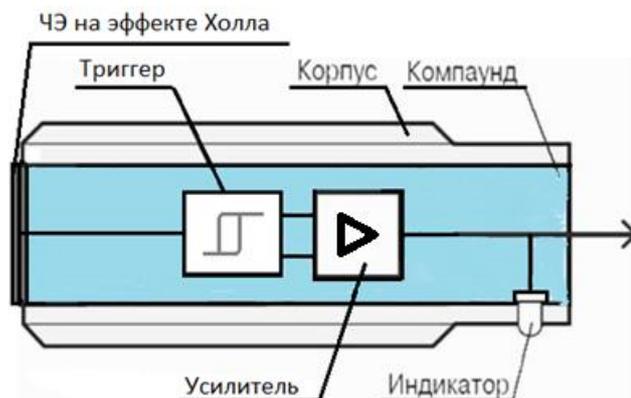
Большинство современных магниточувствительных датчиков построено с использованием эффекта Холла. Эффект Холла заключается в том, что при прохождении постоянного тока через металлическую пластину прямоугольного сечения и воздействии на нее магнитным полем, силовые линии которого будут перпендикулярны направлению тока и одной паре граней этой пластины, на гранях параллельных току и силовым линиям поля возникает разность потенциалов ( см. Рисунок 8.5).



*Рисунок 8.5 – Эффект Холла*

Функциональный состав магниточувствительного выключателя, построенного с использованием эффекта Холла, показан на Рисунке 8.6. Магнитное поле обычно создается постоянным магнитом, закрепленным на подвижном объекте.

Датчики, работающие на эффекте Холла, могут быть аналоговыми или цифровыми. Аналоговые датчики преобразуют индукцию магнитного поля в электрическое напряжение. Характеристики таких устройств во многом определяются полярностью магнитного поля и размерами рабочего зазора. Цифровые датчики Холла определяют наличие поля только по преодолению порога срабатывания датчика. Они и используются в качестве выключателей. Если магнитное поле очень слабое, то цифровой датчик Холла может его не обнаружить, поэтому требуется точные расчеты величины рабочего зазора и характеристик магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом.



*Рисунок 8.6 – Функциональный состав магниточувствительного выключателя*

Чувствительный элемент (ЧЭ) датчика реагирует на изменение внешнего магнитного поля, триггер обеспечивает требуемую крутизну фронта выходного сигнала и необходимое значение гистерезиса. Усилитель формирует выходной бинарный сигнал с требуемыми характеристиками. Светодиодный индикатор сигнализирует о состоянии выключателя, позволяет оперативно производить настройку датчика при монтаже и контролировать его работоспособность.

Принцип использования такого датчика основан на изменении электрических характеристик чувствительного элемента при воздействии магнитного поля. Возможны два варианта использования таких выключателей:

1. Когда перемещаемый объект с закрепленным магнитом входит в рабочую зону выключателя, то напряженность магнитного поля в области чувствительного элемента возрастает. При достижении определенной величины напряженности поля (т.е. на определенном расстоянии от ЧЭ) происходит срабатывание триггера и изменение состояния выключателя. При удалении объекта с магнитом напряженность поля падает, и в определенный момент происходит возвращение выключателя в исходное состояние.

2. Когда в рабочей зоне магнит и датчик установлены неподвижно в определенных положениях, то при появлении между чувствительным элементом датчика и магнитом объекта из ферромагнитного материала напряженность поля уменьшается. Происходит срабатывание триггера и изменение состояния выключателя. Датчик фиксирует вход в рабочую зону внешнего объекта. При выходе объекта из рабочей зоны выключатель возвращается в исходное состояние.

Основными преимуществами бесконтактных выключателей на эффекте Холла являются:

- большой ресурс срабатываний из-за отсутствия механических контактов;
- высокая частота коммутаций.

### Экспериментальная часть

#### Описание лабораторной установки

Зона испытания бесконтактных датчиков находится в правом верхнем углу установки (см. Рисунок 8.7).

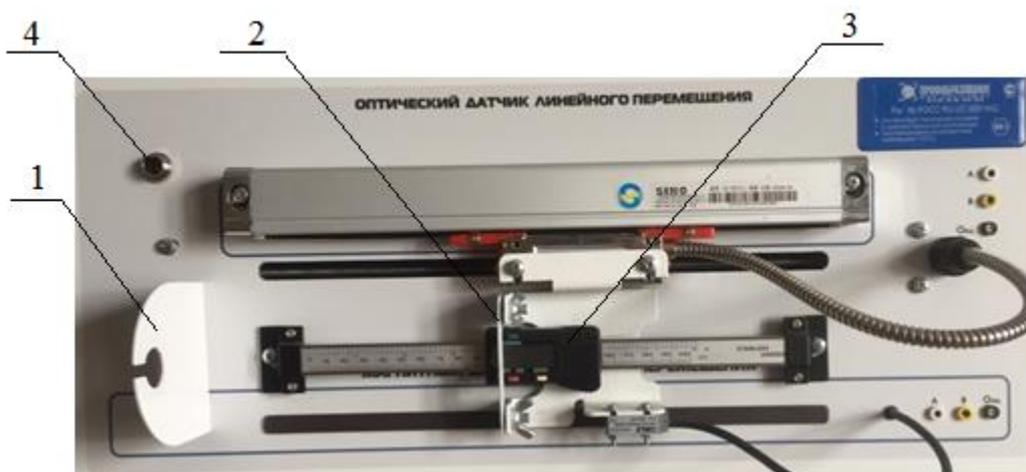
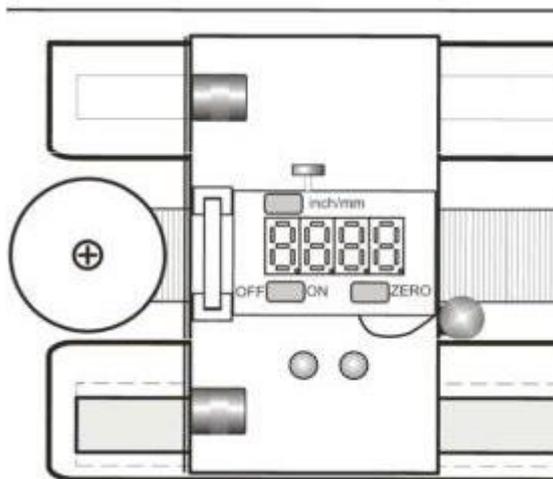


Рисунок 8.7 – Зона испытания бесконтактных датчиков

Оборудование зоны состоит из неподвижной стойки 1 для крепления испытуемого датчика, передвижного механизма с креплением 2 для мишени и измерительного устройства 3 для замера величины перемещения мишени. Над неподвижной стойкой расположен разъем 4 для подключения испытуемого датчика.

На Рисунке 8.8 представлен вид измерительного устройства 3 для замера величины перемещения мишени. Устройство содержит цифровой экран для отображения измеренного расстояния, кнопки включения/выключения питания (on/off), кнопки переключения измерительной шкалы дюймы/миллиметры (inch/mm) и кнопки обнуления расстояния (zero) – установки нуля отсчета.



*Рисунок 8.8 – Измерительное устройства для замера величины перемещения мишени*

Набор бесконтактных датчиков и мишеней из различных материалов нужно получить у преподавателя.

### **Порядок выполнения работы**

- 1) Получить набор исследуемых выключателей и определить их принадлежность к тому или иному типу по их серийным номерам с помощью сети Интернет. В набор входят следующие датчики: индуктивный, емкостной, оптический и магниточувствительный.
- 2) По очереди для каждого датчика определить расстояние срабатывания и отпускания при использовании мишеней из различных материалов (4-5 шт.). Для этого нужно зафиксировать датчик на неподвижной стойке 1 и подключить его кабель к разъему 4 стенда. На крепление 2 установить мишень, которую плавно перемещать в сторону испытуемого датчика до момента касания мишенью его торцевой поверхности. Это положение мишени зафиксировать как начало отсчета расстояния, нажав кнопку zero на измерительном устройстве.
- 3) Плавно перемещать мишень в сторону увеличения расстояния до момента срабатывания индикатора на датчике. В Таблицу 8.3 занести величину расстояния отпускания. Плавно двигая мишень в сторону выключателя, зафиксировать в Таблицу 8.3 расстояние срабатывания. Повторить эксперимент несколько раз. Эксперимент проделать с разными мишенями. Для каждого датчика оформить свою таблицу.
- 4) По полученным данным вычислить средние значения и разброс расстояний срабатывания и отпускания. Полученные значения занести в Таблицу 8.4. Для каждого датчика построить график

зависимости выходного сигнала от расстояния до объекта, приняв состояние выходного сигнала «включено» за 1, а «выключено» – за 0. На одном графике поместить данные исследования датчика со всеми использованными материалами.

Таблица 8.3

Материал мишени	Расстояние срабатывания, мм					Расстояние отпускания, мм				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Стекло										
Металл										
Картон										
Пластик										
и др.										

Таблица 8.4

Материал мишени	Расстояние срабатывания, мм		Расстояние отпускания, мм	
	Среднее	Разброс	Среднее	Разброс
Стекло				
Металл				
Картон				
Пластик				
и др.				

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемых датчиков;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики снятых характеристик;
- выводы по работе.

## Лабораторная работа №9

### Исследование ультразвукового датчика приближения

**Цель работы:** Ознакомление с устройством ультразвукового бесконтактного датчика приближения, изучение принципа работы и схем включения.

#### Теоретическая часть

##### Ультразвуковые бесконтактные датчики приближения

Под словами «звуковые колебания» обычно подразумевают вообще упругие колебания, распространяющиеся в виде волнового процесса в газах, жидкостях и твердых телах. Главным отличительным признаком датчика является использование определенного частотного диапазона колебаний. Так, звуковые волны, воспринимаемые ухом, заключены в пределах от 16 до 20000 Гц. Диапазон ниже 16 Гц называют инфразвуковым, волны с частотами более 20000 Гц - ультразвуковыми.

Ультразвуковые колебания распространяются без переноса вещества. По частотному диапазону различают:

- низкочастотные ультразвуковые колебания (20 кГц – 1 МГц);
- промышленные ультразвуковые частоты (1МГц – десятки МГц);
- высокочастотные сигналы (100МГц – 1ГГц; используются в средствах связи).

Практическое применение упругих колебаний ультразвукового диапазона связано с физическими свойствами сред, в которых они распространяются: упругостью, поглощением, отражением, преломлением.

Основной базовой характеристикой для бесконтактных выключателей является скорость распространения упругих колебаний:

$$c = \lambda f = \lambda \frac{1}{T}, \quad (9.1)$$

где  $f$  – частота;  $T$  – период колебаний;  $\lambda$  – длина волны.

В различных средах скорость ультразвука может существенно отличаться и определяется по формулам:

- для твердых тел:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (9.2)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\rho$  – плотность;

– для жидкостей:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho\beta}}, \quad (9.3)$$

где  $\beta$  – сжимаемость при постоянной температуре  $\left[\frac{\text{м}^2}{\text{н}}\right]$ ;

– для газов:

$$C = \sqrt{\frac{\theta P}{\rho}}, \quad (9.4)$$

где  $\theta = \frac{c_p}{c_v}$  – отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и объеме,  $P$  – давление.

Основные характеристики ультразвуковых колебаний при распространении в различных средах приведены в Таблице 9.1.

Таблица 9.1

Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	С, м/с	$\lambda$ , мм		
			0,5 МГц	1 МГц	5 МГц
Воздух	1,29	331	0,66	0,33	0,066
Вода	997	1497	3	1,5	0,3
Глицерин	1261	1923	3,8	1,9	0,38
Алюминий	2700	6260	12,5	6,26	1,25

В качестве источников ультразвука в современных датчиках чаще всего применяют пьезоэлектрические элементы различной формы. Принцип их действия основан на обратном пьезоэффекте. Они же используются для регистрации ультразвуковых колебаний и работают в этом случае на прямом пьезоэффекте. При подаче на излучающий элемент сигнала от генератора переменного напряжения в пространство перед элементом излучаются ультразвуковые акустические волны. Обычно посылается пакет звуковых импульсов, которые отражаются от препятствия и в виде импульсов эха поступают на регистрирующий пьезоэлемент (см. Рисунок 9.1), где преобразуются в электрический сигнал. В совмещенных преобразователях роль излучателя и приемника выполняет один и тот же пьезоэлемент. Контроллер датчика фиксирует время распространения импульса в прямом и обратном направлениях, и при известной скорости распространения волны в данной среде вычисляется расстояние до объекта.

На указанном принципе построены уровнемеры и датчики присутствия объектов. Для разных типов датчиков частота ультразвука находится между 30 кГц и 400 кГц, а частота следования импульсов, между 14 Гц и 140 Гц. Ультразвуковые датчики имеют мертвую зону (область нечувствительности), в которой объект не обнаруживается. Она зависит от

длительности излучаемого импульса  $\Delta t$  и времени затухания колебаний пьезоэлемента.

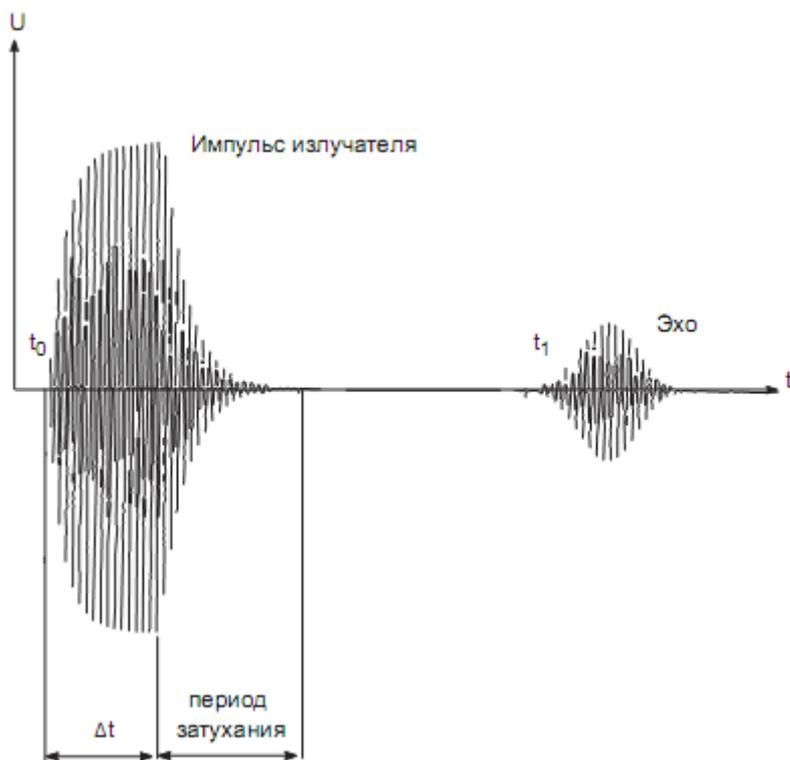


Рисунок 9.1 – Форма сигнала пьезоэлемента

Рабочая зона ультразвукового датчика [8] может быть представлена диаграммой направленности (см. Рисунок 9.2), на которой указаны характерные области работы выключателя. Рабочая область срабатывания датчика называется диапазоном обнаружения  $S_d$  или областью чувствительности. Областью чувствительности – это расстояние, в пределах которого ультразвуковой датчик обнаруживает объект. Ультразвуковой датчик обнаруживает предметы в пределах его диапазона обнаружения, независимо от того, приближаются ли эти предметы к чувствительному элементу в осевом направлении или двигаются через звуковой конус в поперечном направлении.

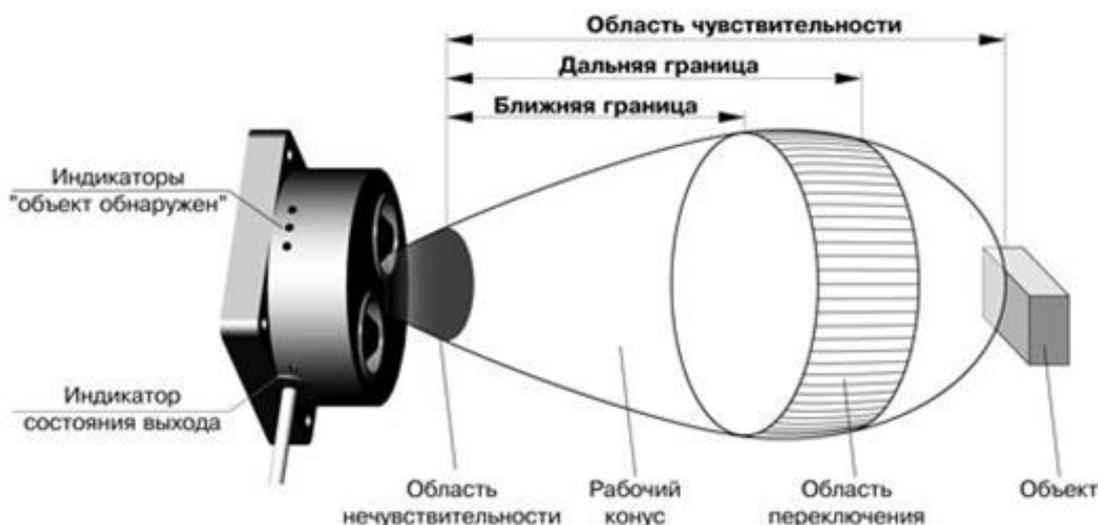


Рисунок 9.2 – Диаграмма направленности ультразвукового датчика

## Экспериментальная часть

### Описание лабораторной установки

Зона испытания бесконтактных датчиков находится в правом верхнем углу установки (см. Рисунок 8.7).

Оборудование зоны состоит из неподвижной стойки 1 для крепления испытуемого датчика и измерительной линейки для замера величины перемещения мишени. Над неподвижной стойкой расположен разъем 4 для подключения испытуемого датчика.

### Порядок выполнения работы

- 1) Зафиксировать ультразвуковой датчик на неподвижной стойке 1 и подключить его кабель к разъему 4 стенда. Плавно перемещать мишень в сторону испытуемого датчика до момента попадания в ближнюю зону нечувствительности датчика.
- 2) Плавно перемещать мишень в сторону увеличения расстояния до момента срабатывания индикатора на датчике. В Таблицу 9.1 занести величину расстояния, соответствующего ближней границе рабочей области. Продолжить плавное перемещение мишени в сторону увеличения расстояния, зафиксировать в Таблице 9.1 расстояние, соответствующее дальней границе рабочей области. Повторить эксперимент несколько раз. Эксперимент проделать с разными мишенями. Для каждой мишени оформить свою таблицу.
- 3) По полученным данным вычислить средние значения и разброс расстояний срабатывания и отпускания. Полученные значения

занести в Таблицу 9.2. Для каждого датчика построить график зависимости выходного сигнала от расстояния до объекта, приняв состояние выходного сигнала «включено» за 1, а «выключено» – за 0. На одном графике поместить данные исследования датчика со всеми использованными материалами.

Таблица 9.1

Материал мишени	Ближняя граница, мм					Дальняя граница, мм				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Стекло										
Металл										
Картон										
Пластик										
и др.										

Таблица 9.2

Материал мишени	Ближняя граница, мм		Дальняя граница, мм	
	Среднее	Разброс	Среднее	Разброс
Стекло				
Металл				
Картон				
Пластик				
и др.				

### Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

- цель работы;
- основные технические характеристики исследуемого датчика;
- схема экспериментальной установки;
- характеристики используемых измерительных средств;
- результаты измерений и их обработка;
- графики снятых характеристик;
- выводы по работе.

## Литература

1. Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г.Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. - Москва: Техносфера, 2012. - 624 с.
2. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах/ Пер. с франц. — М.: Мир, 1992. Кн. 1 — 480 с., кн. 2 — 424 с.
3. Агапьев Б.Д., Козловский В.В. Практическая обработка экспериментальных данных/ Учебное пособие – С-Пб.:С-ПБГПУ, 2012, 61с.
4. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение. Москва. Издательство «Мир», 1989
5. Катус Г. П. Библиотека по автоматике, вып. 6. Оптические датчики температуры. «Госэнергоиздат», 1959
6. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики, 1990
7. <http://electricalschool.info/spravochnik/apparaty/1726-opticheskie-beskontaktnye-vykljuchатели.html>
8. <https://teko-com.ru/katalog/opticheskie-datchiki/optic-po-parametram/ov-a43a-31p-150-lz.html>
9. <http://www.uch-lab.ru/katalog/avtomatizatsija-proizvodstva/promyshlennye-datchiki/>

Бойков Владимир Иванович  
Быстров Сергей Владимирович  
Власов Сергей Михайлович  
Григорьев Валерий Владимирович  
Николаев Николай Анатольевич  
Нуйя Ольга Святославовна

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49