

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт Высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра «Приборы и биотехнические системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Приборы и биотехнические системы»  
«9» января 2023г., протокол №4  
Заведующий кафедрой

  
\_\_\_\_\_ А.В.Прохорцов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Физические основы получения информации»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**12.03.01 Приборостроение**

с направленностью  
**Бортовые приборы управления**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120301-01-23

Тула 2023 год

**Разработчик:**

Индюхин А.Ф., канд. биол. наук  
(*ФИО, должность, ученая степень, ученое звание*)

---

(подпись)

**Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тульский государственный университет»**

**Антоненко С.В., Богданов М.Б.**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

**Учебно-методическое пособие**

**Часть 1**

**Полупроводниковые, резистивные, емкостные и пьезоэлектрические  
измерительные преобразователи**

**Издательство ТулГУ**

**2013**

УДК 681.2.082  
А 72  
ББК 32.842-5я73

**Антоненко С.В., Богданов М.Б.** Физические основы получения информации. Часть 1. Полупроводниковые, резистивные, емкостные и пьезоэлектрические измерительные преобразователи: учебно-методическое пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – 90 с.

Приводятся методические указания для проведения лабораторных работ по дисциплине «Физические основы получения информации» с целью практического ознакомления студентов с физическими эффектами, используемыми для получения измерительной информации.

Предназначено для подготовки бакалавров по направлению 200100 «Приборостроение».

Ил. 47. Табл. 19. Библиограф.: 14 назв.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета Тульского государственного университета.

Рецензенты:

доцент кафедры «Приборы управления» ТулГУ, к.т.н. Погорелов М.Г.

доцент кафедры радиотехники ТулГУ, к.т.н. Лаппо А.Ю.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере детектора лжи .....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере сенсорного выключателя. ....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере фоторезистора .....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере металлического терморезистора .....	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. Изучение принципа действия потенциометрического преобразователя .....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. Изучение принципа действия сумеречного переключателя. ....	53
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. Изучение принципа действия оптореле .....	57
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. Изучение принципа действия датчика Холла .....	61
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Емкостной преобразователь .....	68
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. Пьезоэлектрический измерительный преобразователь .....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы получения информации» является базовой для подготовки бакалавров направлению 200100 «Приборостроение». Данное учебно-методическое пособие предназначено для практического ознакомления студентов с физическими эффектами, лежащими в основе измерительных преобразований и средств их реализации. Также в пособии изложены принципы работы датчиков и методы анализа и синтеза физических явлений для создания различных средств измерения, диагностики и контроля.

Учебно-методическое пособие состоит из двух частей в соответствии с количеством семестров, отведенных на изучение данной дисциплины.

*Часть 1* данного пособия посвящена изучению физических основ и принципа работы полупроводниковых, резистивных, емкостных и пьезоэлектрических измерительных преобразователей; *часть 2* – элементов навигационных систем.

Освоение лабораторных работ, приведенных в пособии, позволит студентам приобрести практические навыки в области получения информации с помощью различных измерительных систем, а также навыки для осуществления грамотного инженерного выбора вида преобразователей при разработке конкретного измерительного устройства или автоматизированного комплекса.

*Авторы выражают благодарность:* заведующему лабораторией кафедры «Приборы и биотехнические системы» Федосову Алексею Ивановичу и лаборанту Варламову Сергею Ивановичу за помощь в изготовлении лабораторных установок, а также студентам группы 120261 Андриюшину Антону, Галкину Александру, Гинцбургу Денису, Кирьянову Александру, Костомарову Дмитрию, Молкерову Максиму, Назаренко Дмитрию, Нестерову Алексею, Пронюшкину Илье, Сафронову Алексею, Соцкову Вадиму, Субботину Денису, Тимошину Сергею, Федько Наталье, Шестопалову Даниилу, Чайке Евгении и аспиранту Данилову Максиму за разработку и изготовление лабораторных установок.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1**

### **Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере детектора лжи**

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа функционирования и основных характеристик детектора лжи.

#### **Краткие теоретические сведения**

Детектором лжи называется прибор, предназначенный для измерения психофизиологических параметров человека: сопротивления кожного покрова, частоты пульса, давления крови и т.п.

Использование данной информации позволяет поставить диагноз о психическом и физиологическом состоянии пациента и обнаружить отклонения от нормального состояния: волнение, усталость, раздраженность, возбужденность и т.п. Диагностирование отклонения состояния от нормального и лежит в основе работы детектора лжи: если человек при ответах на вопросы волнуется, нервничает и т.п., то велика вероятность, что он что-то скрывает. Сам по себе детектор лжи не может диагностировать ложь, это может сделать специалист на основе анализа всей совокупности информации о состоянии человека.

В данной работе используется измеритель сопротивления кожного покрова человека.

Кожа человека имеет определенный уровень сопротивления, порядка единиц – десятков кОм. Исключение составляет биологически активные точки – совокупность кровеносных, лимфатических и нервных узлов. Сопротивление между такими участками составляет единицы-десятки Ом. Если человек волнуется, он начинает потеть. Влажность кожного покрова увеличивается, сопротивление уменьшается. Таким образом, измеряя сопротивление кожи, можно предположить о том волнуется ли человек или нет. Ясно, что для повышения точности измерений необходимо свести к минимуму все остальные влияющие факторы: физическая нагрузка, перегрев и т.п.

## Описание лабораторной установки

На рис. 1 показаны основные элементы лабораторной установки.

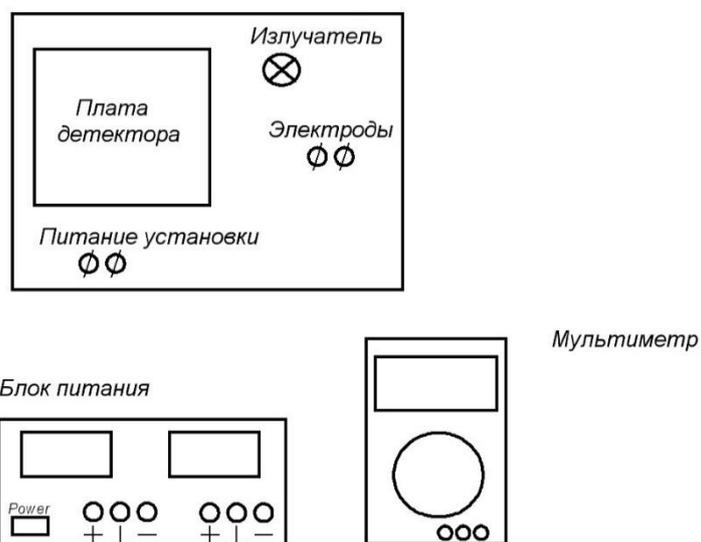


Рис. 1. Основные элементы лабораторной установки

На рис. 2 приведен внешний вид лабораторной установки.

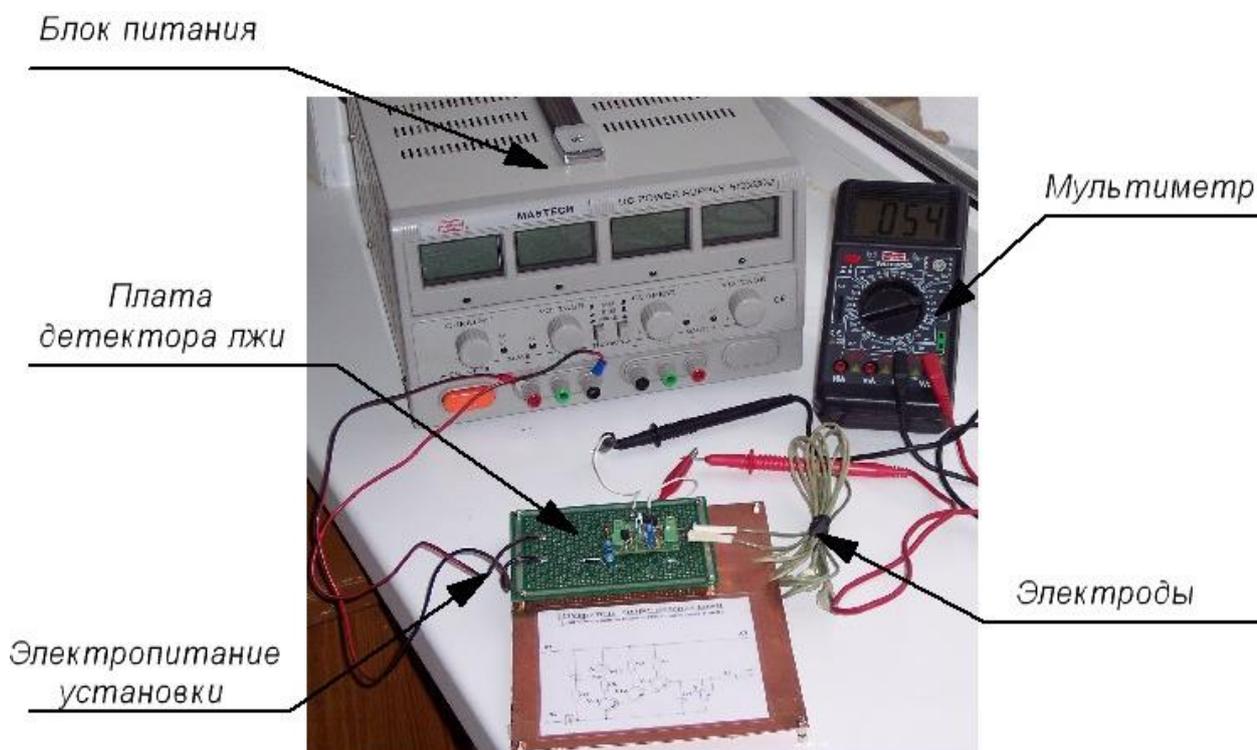


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Блок питания необходим для организации электропитания детектора лжи. Электроды, подключенные к детектору лжи, размещаются на открытых

участках рук человека: по одному электроду на каждой ладони. Мультиметр нужно подключить в цепь на плате детектора. Он позволяет измерять падение напряжения на сопротивлении человека. Излучатель позволяет контролировать работоспособность установки.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Подключить блок питания к выводам X1 и X2 клеммами, соблюдая полярность (красный – «+», синий – «-»). Напряжение питания составляет 9 В.

2. Подключить мультиметр (работающий в режиме измерения напряжения) двумя разъемами типа «крокодил». Подключить к разъемам X3 и X4 чувствительные элементы (электроды)

3. С помощью отвертки, со стороны электродов, провести настройку подстроечного резистора R5 – перевести его в крайнее левое положение (против часовой стрелки).

4. Разместить электроды на измеряемом участке тела (например, на ладони) и провести настройку резистора R5 – добиться такого его положения, при котором диод HL1 начинает светиться.

5. Перемещая электрод на измеряемом участке тела, найти с помощью мультиметра наибольшее значение напряжения. В этой точке располагается биологически активная точка. Второй электрод, приложенный к измеряемому участку должен оставаться неподвижным.

6. Повторить пункт 5, исследуя наличие биологически активных точек на ладонях человека.

7. Оценить разницу сопротивлений кожи человека в биологически активных точках и вне их.

8. Зафиксировать электрод в биологически активной точке. Сделать серию приседаний. Оценить влияние физической нагрузки на изменение сопротивления кожи человека.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: результаты измерений сопротивления кожного покрова человека от положений электродов.

5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте область применения, достоинства и недостатки детектора лжи и измерителя сопротивления кожного покрова человека.
2. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.
3. Опишите зависимость сопротивления кожного покрова человека от положения электродов.

### **Библиографический список**

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств. Часть 1, Теория измерительных устройств: в 2 ч. / А.Г. Щепетов. – М.: Стандартинформ, 2006 . – 248с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере сенсорного выключателя

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа действия и основных характеристик тактильного (сенсорного) управляющего элемента в различных режимах работы.

#### Краткие теоретические сведения

Сенсорный выключатель предназначен для работы в составе систем сигнализации и систем управления. В составе системы сигнализации данный выключатель работает в релейном режиме, как только рука прикоснулась к тактильной площадке, установленной, например, в ручке двери, в замке сейфа, на поверхности стола и т.д., выключатель срабатывает, передавая сигнал на систему свето- и звуко-сигнализации. Система функционирует до тех пор, пока не будет перезапущена. В составе управляющей системы данный выключатель также работает в релейном режиме, но управляющий сигнал с выключателя исчезает, как только, убрать руку с тактильного датчика. Временные циклограммы работы сенсорного выключателя показаны на рис.1.

Сенсорный датчик (или тактильная площадка) представляет собой резистивный контактный датчик, изготовленный в виде медной дорожки на текстолитовой основе. При прикосновении к его поверхности человек замыкает рукой соседние дорожки тем самым резко снижая сопротивление от  $10^9$  Ом до  $1 \dots 10^1$  Ом. Такой перепад сопротивления вызывает скачкообразное изменение тока в цепи обработки сигнала датчика. Это изменение тока и позволяет в дальнейшем управлять исполнительными двигателями или включать световую и звуковую сигнализации.

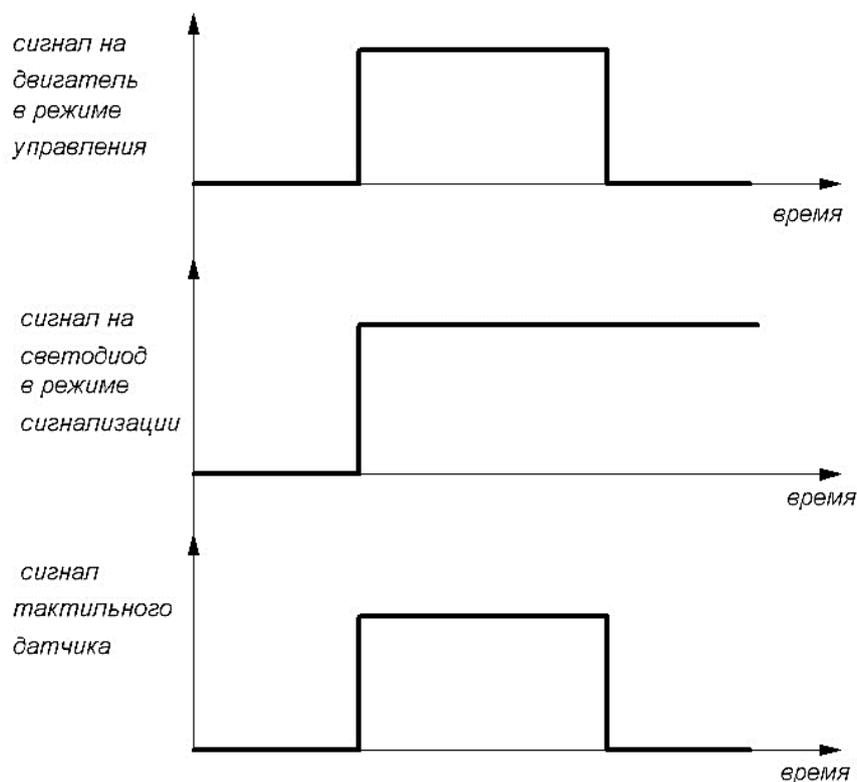


Рис. 1. Временный циклограммы работы сенсорного выключателя в режиме сигнализации и в режиме управления

### Описание лабораторной установки

Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 2. Лабораторная установка состоит из трех основных элементов: сенсорный управляющий элемент, электрический двигатель постоянного тока и светодиод.

Установка имеет два режима функционирования, которые позволяют изучить две основных области применения сенсорных выключателей: управление и сигнализация.

В первом режиме – режиме управления (режим «кнопка») – используется двигатель постоянного тока. Данный режим характеризуется наличием постоянного сигнала на двигатель, пока рука лежит на тактильной площадке сенсорного выключателя. Как правило, такой режим позволяет управлять исполнительными элементами при нажатии на тактильную площадку, причем сила нажатия роли не играет. Как только снять руку с тактильного датчика двигатель прекращает вращаться. Резистор R1 (позиция 8 на рис. 2) регулирует время срабатывания схемы, увеличивая или уменьшая время заряда конденсатора.

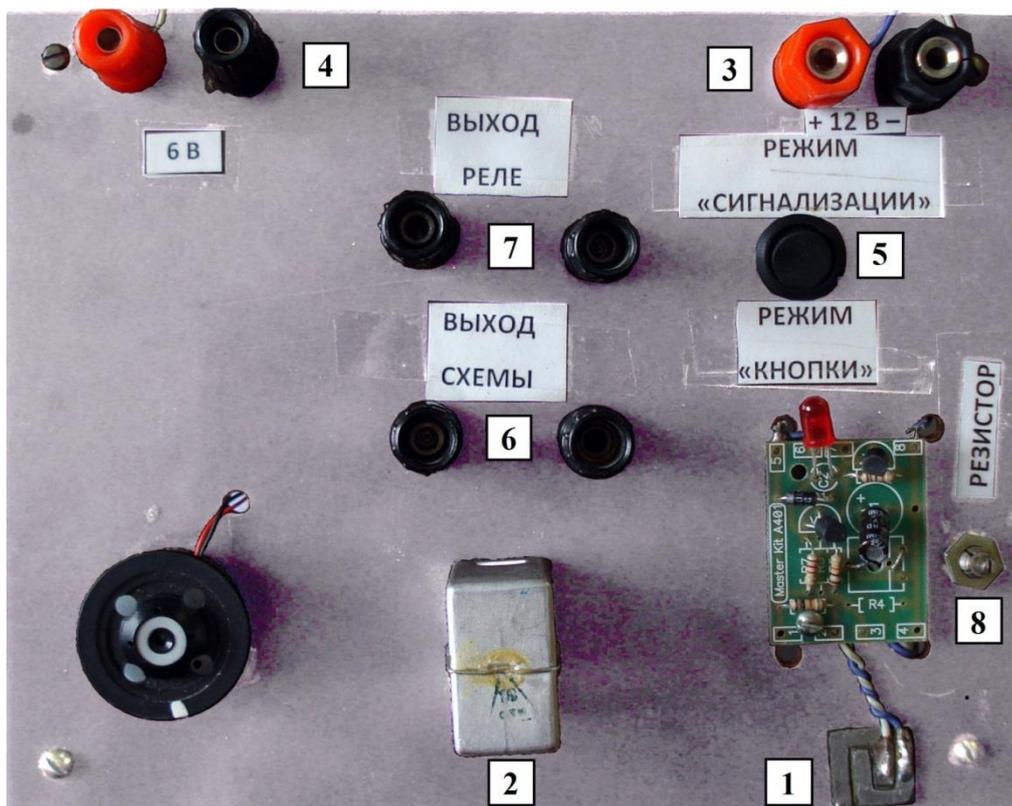


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки: 1 – тактильный датчик, 2 – реле, 3,4 – клеммы подачи электропитания, 6,7 – клеммы для подключения осциллографа, 5 – переключатель режимов, 8 – подстроечный резистор

Во втором режиме – режим «сигнализация» – используется светодиод и двигатель. Данный режим характеризуется постоянным сигналом на двигатель, если дотронуться до тактильной площадки хотя бы один раз. Как правило, такой режим позволяет строить системы сигнализации. Даже если снять руку с тактильного датчика светодиод не перестает светиться, а двигатель продолжает вращаться до тех пор, пока не сбросить данный режим. Сброс режима производится переключением кнопки в режим управления.

Электрическая схема и внешний вид тактильного датчика показаны на рис. 3.

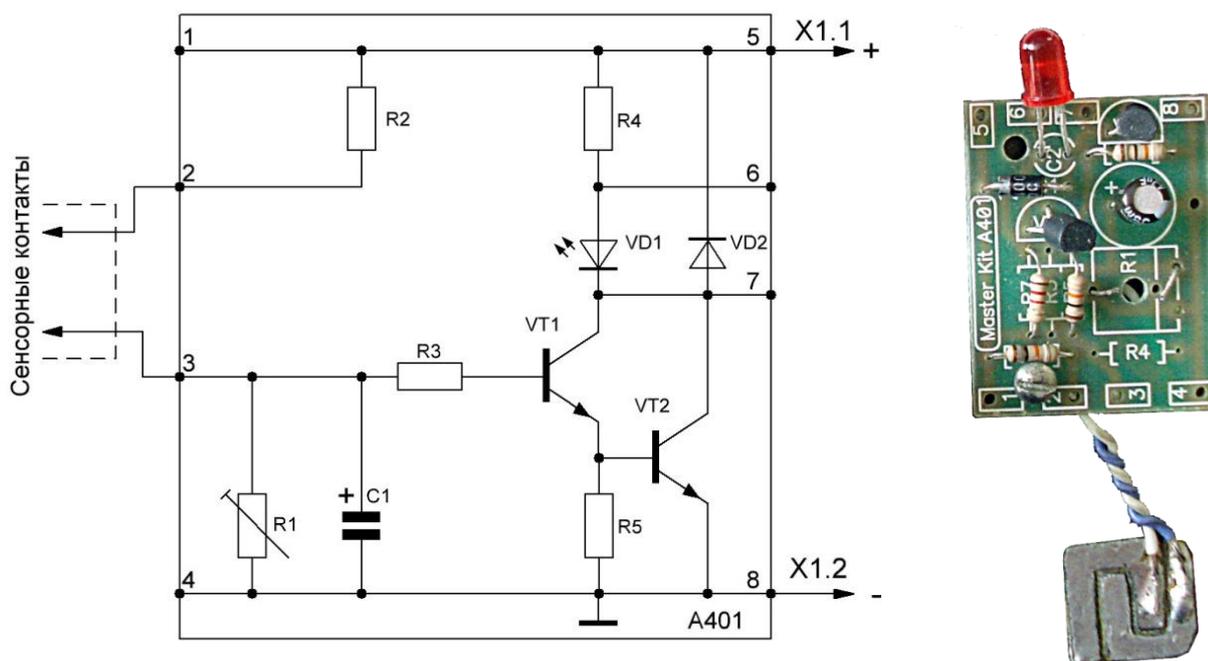


Рис. 3. Электрическая схема и внешний вид тактильного датчика

Тактильный датчик представляет собой усилитель постоянного тока, выполненный на составном транзисторе VT1, VT2. Переменный резистор R1 позволяет установить необходимую чувствительность усилителя. Резистор R2 и конденсатор C1 снижают вероятность ложного срабатывания и определяют задержку срабатывания датчика. Диод VD2 защищает транзисторы VT1, VT2 при применении дополнительного электромагнитного реле, для подключения которого используются контакты 1 и 7. Реле выбирается таким образом, чтобы его напряжение срабатывания равнялось:  $(U_{пит} - 2) В$ , а максимальный ток через обмотку коммутатора – не более 75мА. Индикация выполнена на светодиоде VD1.

#### Технические характеристики тактильного датчика.

Номинальное напряжение питания: 6,0...15,0В

Ток нагрузки: 75мА.

Размер печатной платы: 30×45мм.

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Необходимо собрать лабораторную установку, для этого:

1. Включить блок питания (БП) и установить независимый режим работы каналов.
2. Установить на одном канале напряжение 12В, на другом 6В и выключить БП.

3. Подключить соответствующие клеммы (3 и 4) (см. рис. 2) установки к БП, соблюдая полярность (красно-оранжевые клеммы «+», черные клеммы «-») и напряжение. Так как установка чувствительна к полярности напряжения, то изменение полярности питания может привести к выходу её из строя;

4. Подключить осциллограф: на один канал подать сигнал с пары клемм «выход схемы», а на другой – с пары клемм «выход реле».

5. Установить минимальное значение построечного резистора, установив его движок в крайнее левое положение (против часовой стрелки).

#### *Изучение работы сенсорного выключателя в режиме управления*

1. Установить переключатель 5 в «режим кнопки».

2. Включить БП.

3. Удерживая нажатым тактильный датчик 1 (см. рис. 2), увеличить сопротивление 8 до тех пор, пока не сработают индикатор и реле 2.

4. Нажать на тактильный датчик 1, а после срабатывания сразу отжать. Дождаться установления «покоя». Зафиксировать данный процесс на экране осциллографа.

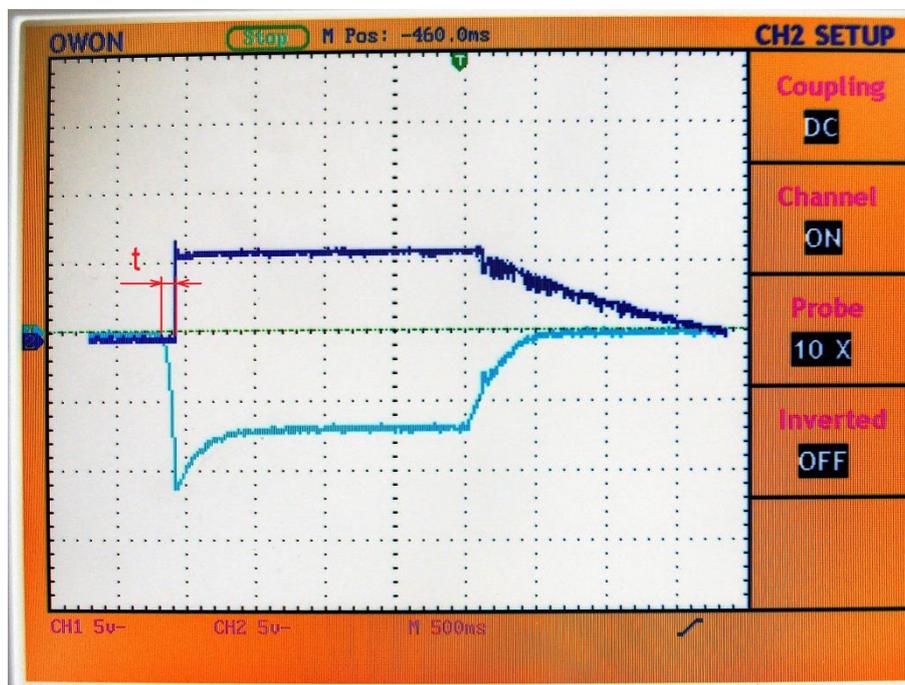


Рис. 4. Пример осциллограммы в «режиме кнопки»

5. Измерить по экрану осциллографа время срабатывания схемы.

6. Изменяя сопротивление определить зависимость времени успокоения схемы от значения сопротивления.

*Изучение работы сенсорного выключателя в режиме сигнализации.*

1. Установить сопротивление резистора 8 в произвольное положение.
2. Переключить кнопку 5 в «режим сигнализации».
3. Нажать на тактильный датчик.
4. Зафиксировать работу на осциллограмме.

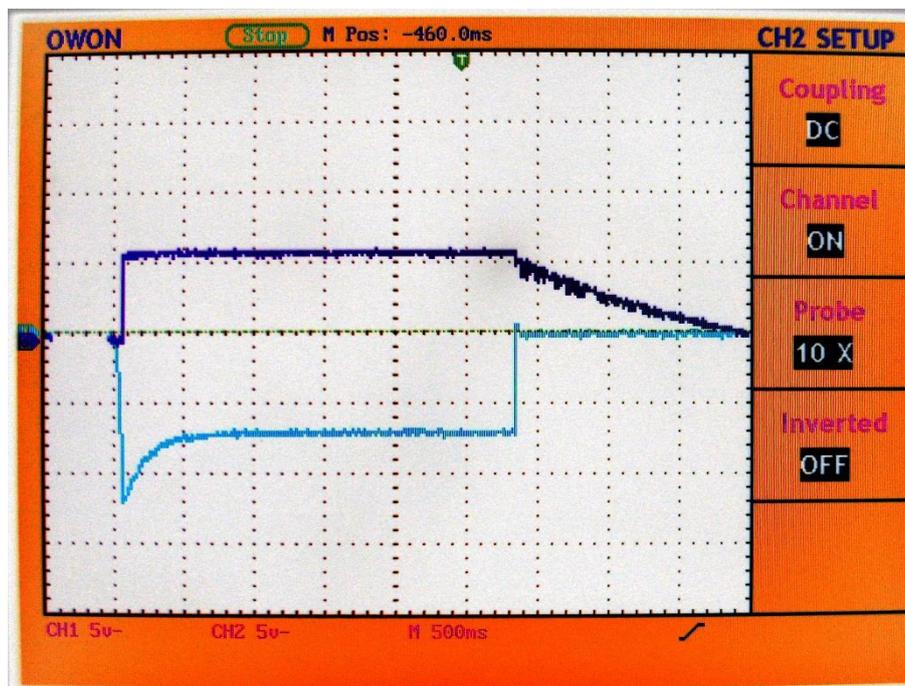


Рис. 5. Пример осциллограммы в «режиме сигнализации»

5. Отключить схему, переведя переключатель 5 «режим кнопки».

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты проведения лабораторной работы: время срабатывания сенсорного выключателя в режим управления, время остановки и время разгона двигателя, время срабатывания сенсорного выключателя в режим сигнализации.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните область применения сенсорного выключателя.
2. Охарактеризуйте режим управления сенсорного выключателя.
3. Охарактеризуйте режим сигнализации сенсорного выключателя.
4. Опишите лабораторную установку, её основные элементы и принцип функционирования.
5. Поясните метод измерения время срабатывания сенсорного выключателя в режим управления и в режиме сигнализации.

### **Библиографический список**

1. Информационно-измерительная техника и технологии: Учебник для вузов / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др.; Под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Высш. шк., 2002 . – 454с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере фоторезистора

*Цель лабораторной работы* – исследование фоторезистивного эффекта на примере полупроводникового фоторезистора.

#### Краткие теоретические сведения

*Фоторезистивный эффект* – изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием оптического излучения и не связанное с его нагревом. Иногда фоторезистивный эффект называют *эффектом фотопроводимости*.

Механизм фоторезистивного эффекта обусловлен либо собственным, либо примесным поглощением. При собственном поглощении энергия квантов света, равная  $h\nu$  (где  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света), передается электронам валентной зоны. Если эта энергия больше ширины запрещенной зоны, то электроны преодолевают её и переходят на более высокий энергетический уровень в зону проводимости, оставляя на своем прежнем месте (в валентной зоне) незаполненный энергетический уровень – дырку. В результате появляется избыточная концентрация электронов и дырок. Этот процесс называется *собственной световой генерацией носителей заряда*. При примесном поглощении энергия фотонов передается атомам примесей с последующим образованием носителей заряда одного знака (электронов, при донорной примеси или дырок при акцепторной примеси). Этот процесс называется *примесной световой генерацией носителей заряда*. В результате обоих видов генерации увеличивается концентрация носителей заряда, как следствие, повышается проводимость, т.е. уменьшается удельное электрическое сопротивление.

При облучении наряду с генерацией происходит обратный процесс – рекомбинация носителей заряда. Через некоторое время после начала облучения устанавливается динамическое равновесие между этими процессами. При этом избыточная концентрация, например электронов, равна:

$$\Delta n = (1-R)\alpha\eta N_{\phi}\tau_n, \quad (1)$$

где  $R$  – коэффициент отражения фотонов,  $\alpha$  – показатель поглощения (относительное изменение светового потока в слое полупроводника единичной толщины),  $\eta$  – квантовая эффективность генерации (число возникающих пар

носителей заряда при собственном поглощении или число носителей заряда одного знака при примесном поглощении, отнесенное к числу поглощенных фотонов),  $N_{\phi}$  – число фотонов, падающих на единичную поверхность полупроводника в единицу времени,  $\tau_n$  – время жизни неравновесных носителей заряда (отношение избыточной концентрации неравновесных носителей заряда к скорости изменения этой концентрации вследствие рекомбинации).

*Фоторезистор* – двухэлектродный полупроводниковый преобразователь, который изменяет свою электрическую проводимость в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающего на него света.

Из выражения (1) видно, что при облучении фоторезистора в его фоточувствительном слое возникает избыточная концентрация носителей заряда (в данном случае электронов). Если к фоторезистору приложено электрическое напряжение, то через него протекает дополнительная составляющая электрического тока (обусловленная избыточной концентрацией носителей заряда), называемая *фототоком*:

$$I_{\phi_n} = abq(\Delta n)\mu_n \frac{U}{l} = abq(1-R)\alpha\eta N_{\phi}\tau_n\mu_n E, \quad (2)$$

где  $a, b$  – толщина и ширина фоточувствительного слоя фоторезистора,  $l$  – расстояние между электродами (длина полупроводника),  $q$  – заряд электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл),  $\mu_n$  – подвижность носителей заряда (равная средней скорости движения носителей заряда, в данном случае электронов),  $E$  – напряженность электрического поля, приложенного к фоторезистору.

Для изготовления серийных фоторезисторов в настоящее время используют главным образом три типа материалов: сернистый кадмий (наиболее чувствительны к видимому оптическому излучению), сернистый свинец (наиболее чувствительны к инфракрасному оптическому излучению), сернистый висмут (наиболее чувствительны к оптическому излучению на границе между видимым и инфракрасным излучениями). Полупроводник наносят в виде тонкого слоя на стеклянную или кварцевую подложку либо вырезают в виде тонкой пластинки из монокристалла. Слой (пластинку) снабжают двумя контактами (электродами). Подложку с фоточувствительным слоем (или пластинку) и электроды помещают в защитный пластмассовый или металлический корпус. Так же есть бескорпусные фоторезисторы, светочувствительный элемент у них защищен от воздействия внешней среды прозрачной пластмассовой пленкой. Для эксплуатации при повышенной

влажности и в условиях тропического климата выпускают фоторезисторы герметичной конструкции. Эти фоторезисторы отличаются большой надежностью и стабильностью параметров.

Благодаря высокой светочувствительности, простоте конструкции и невысокой стоимости изготовления фоторезисторы имеют широкое применение в измерительной технике. Основные области применения: измерители освещенности, автоматические регуляторы яркости электронно-лучевых трубок, фотоэлектрические турникеты, счетчики движущихся предметов, устройства блокировки, устройства дистанционного управления радиоаппаратурой, оптические каналы связи.

Основными характеристиками и параметрами фоторезисторов являются:

- ✓ *темновой ток*  $I_{\text{тем}}$  – ток через фоторезистор, обусловленный темновым сопротивлением, т.е. сопротивлением фоторезистора при полном его затенении;
- ✓ *вольтамперная характеристика (ВАХ)* – зависимость фототока через фоторезистор от приложенного к нему электрического напряжения при неизменной освещенности;
- ✓ *люксамперная характеристика (ЛАХ)* – зависимость фототока через фоторезистор от его освещенности, при неизменном приложенном электрическом напряжении;
- ✓ *спектральная характеристика* – зависимость фототока через фоторезистор от длины волны падающего света при неизменных освещенности и приложенного электрического напряжения;
- ✓ *постоянная времени* – время, в течении которого фототок через фоторезистор изменяется после его освещения (затенения) на 63% по отношению к установившемуся после окончания переходного процесса значению.

На рис. 1 представлен вид ВАХ.

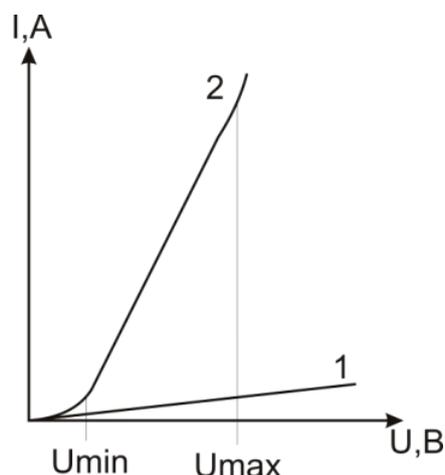


Рис. 1. Вид вольтамперной характеристики полупроводникового фоторезистора: 1 – ВАХ без облучения (в темноте); 2 – ВАХ при постоянном облучении;  $U_{min}$ ,  $U_{max}$  – границы линейной области ВАХ

В рабочем диапазоне напряжений  $U_{min} \leq U \leq U_{max}$  ВАХ линейная, при напряжениях меньше  $U_{min}$  и больших  $U_{max}$  – нелинейная. В первом случае это объясняется тем, что при малых напряжениях сопротивление полупроводника определяется контактами между отдельными зернами (кристаллами). При увеличении напряжения сопротивление контактов уменьшается. При дальнейшем увеличении напряжения сопротивление фоторезистора определяется объемным сопротивлением полупроводника, которое при неизменных внешних условиях постоянно. При больших напряжениях нелинейность ВАХ обусловлена выделением тепла на сопротивлении фоторезистора и его нагревом. На рис. 2 представлен вид ЛАХ фоторезистора.

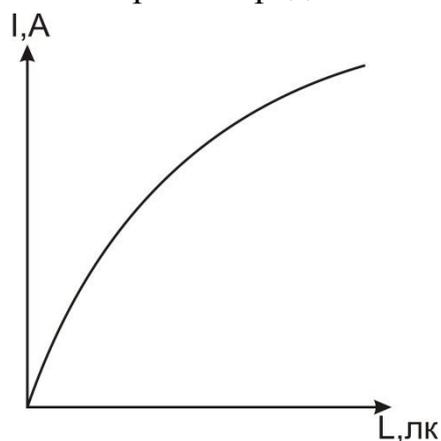


Рис. 2. Вид люксамперной характеристики полупроводникового фоторезистора

Нелинейность ЛАХ обусловлена двумя причинами:

1) при увеличении избыточной концентрации неравновесных носителей заряда уменьшается их время жизни (вследствие изменения положения квазиуровня Ферми);

2) при увеличении избыточной концентрации неравновесных носителей заряда уменьшается их подвижность.

На рис. 3 представлен вид спектральной характеристики.

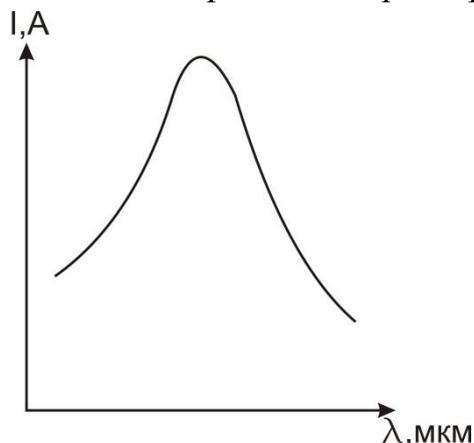


Рис. 3. Вид спектральной характеристики полупроводникового фоторезистора

При больших длинах волн  $\lambda$  (малых частотах  $\nu$ , т.е. при малых энергиях квантов) их энергии оказывается недостаточно для генерации носителей заряда (перевода электрона через запрещенную зону при собственном поглощении или для ионизации атома примеси при примесном поглощении). При уменьшении длины волны (повышении энергии фотона) процесс генерации становится более интенсивным. При дальнейшем уменьшении волны, уменьшается коэффициент поглощения  $\alpha$ , в результате интенсивная генерация носителей заряда происходит только в приповерхностных слоях полупроводника. Однако в этих слоях более интенсивен и процесс рекомбинации за счет дефектов кристаллической решетки. Поэтому большая часть носителей выбывает из процесса переноса заряда (рекомбинируют). Это приводит к спаду спектральной характеристики в областях малых длин волн.

На рис. 4 представлен вид переходного процесса.

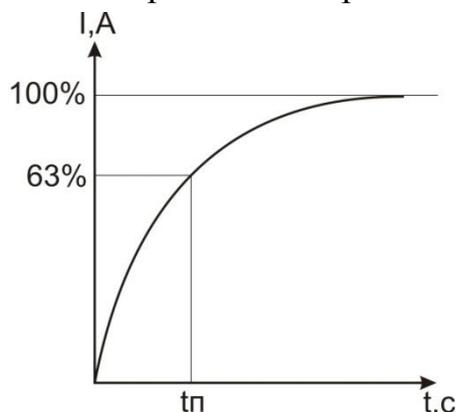


Рис. 4. Вид переходного процесса полупроводникового фоторезистора:

$t_{II}$  — постоянная времени фоторезистора

Постоянная сильно зависит от интенсивности процесса рекомбинации носителей заряда, которая обусловлена температурой, влажностью, начальной освещенностью и т.п. Поэтому постоянную времени измеряют при определенных условиях, например, температура 20°C, освещенность 200 лк, сопротивление нагрузки 1 кОм, длина волны освещения 0,5 мкм. Постоянная времени при нарастании фототока отличается от постоянной времени при его спаде, в соответствии с этим различают две постоянные времени.

### Описание лабораторной установки

В качестве фоторезисторов используются сернисто-кадмиевые фоторезисторы отечественного производства СФ2-2 (в пластмассовом корпусе) и СФ2-16 (в металлическом корпусе).

Основные характеристики фоторезисторов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные характеристики фоторезисторов

Характеристика	Фоторезистор	
	СФ2-2	СФ2-16
Номинальное напряжение питания, В	2	10
Максимальное напряжение питания, В	5	10
Максимальная рассеиваемая мощность, мВт	50	10
Темновое сопротивление, МОм	1	3,3
Темновой ток при номинальном напряжении питания, мкА	2	3
Длина волны максимума спектральной характеристики, мкм	0,63	0,54
Постоянная времени нарастания фототока, мс	50	50
Постоянная времени спада фототока, мс	100	50
Рабочий интервал температур окружающей среды, °С	-40...+50	-60...+70

На рис. 5 представлен внешний вид лабораторной установки для изучения фоторезистивного эффекта на примере полупроводниковых фоторезисторов.

Для проведения лабораторной работы используются 7 светофильтров: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный.

Каждый светофильтр пропускает только определенную длину волны света: фиолетовый – (0,4-0,45) мкм; синий – (0,45-0,48) мкм, голубой – (0,48-

0,5) мкм; зеленый – (0,5-0,56) мкм, желтый – (0,56-0,59) мкм, оранжевый – (0,59-0,62) мкм, красный – (0,62-0,76) мкм.

Используемый в лабораторной работе люксметр имеет спектральную чувствительность, т.е. зависимость показаний от длины волны падающего света. Поэтому при измерениях в его показания необходимо вносить поправки в соответствии с формулой:

$$L = kL_{\text{л}}, \quad (3)$$

где  $L$  – действительная освещенность фоторезистора,  $L_{\text{л}}$  – показания люксметра,  $k$  – поправочный коэффициент, соответствующий спектральной чувствительности люксметра.

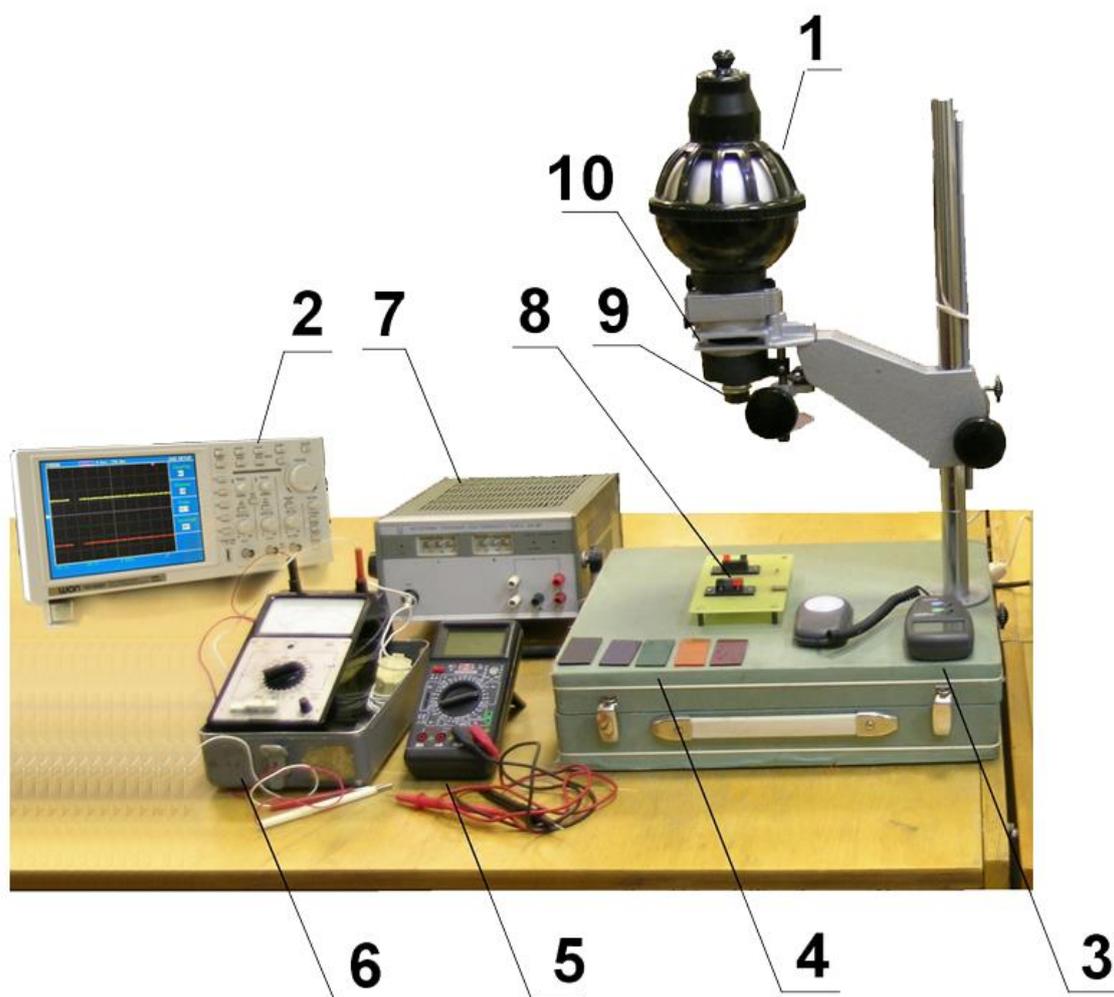


Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки:

1 – излучатель; 2 – электронный осциллограф; 3 – измеритель освещенности (люксметр); 4 – светофильтры; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – лабораторный блок питания; 8 – рабочая площадка с фоторезисторами СФ2-2 и СФ2-16; 9 – объектив с модулятором освещенности (диафрагмой); 10 – модулятор спектра (площадка для размещения светофильтров)

Значения поправочного коэффициента приведены в табл. 2.

Табл. 2. Значения поправочного коэффициента показаний люксметра

Цвет	Длина волны света, мкм	Значение поправочного коэффициента $k$
Фиолетовый	(0,40-0,45)	(5,0-2,2)
Синий	(0,45-0,48)	(2,2-1,43)
Голубой	(0,48-0,50)	(1,43-1,25)
Зеленый	(0,50-0,56)	(1,25-1,0)
Желтый	(0,56-0,59)	1,0
Оранжевый	(0,59-0,62)	(1,0-1,25)
Красный	(0,62-0,76)	(1,25-20,0)

Для изучения переходных процессов нарастания и спада фототока используется электронный осциллограф.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Ознакомиться с теоретической частью работы и описанием лабораторной установки.

2. Привести лабораторную установку в рабочее состояние и проверить её функционирование: возможность изменения освещенности рабочей площадки, возможность изменения спектра освещенности рабочей площадки, работоспособность люксметра, работоспособность блока питания, амперметра и вольтметра.

3. С помощью оптической системы объектива и матового фильтра добиться максимального равномерного освещения рабочей площадки с фоторезисторами.

*Изучение вольтамперной характеристики фоторезистора.*

4. Включить излучатель лабораторной установки. Используя модулятор освещенности и люксметр добиться освещенности равной 400лк. С помощью мультиметра измерить активное электрическое сопротивление фоторезистора  $R_{\phi}^{400}$  при данной освещенности. Выключить излучатель.

5. В соответствии с рисунком 6 собрать электрическую схему.

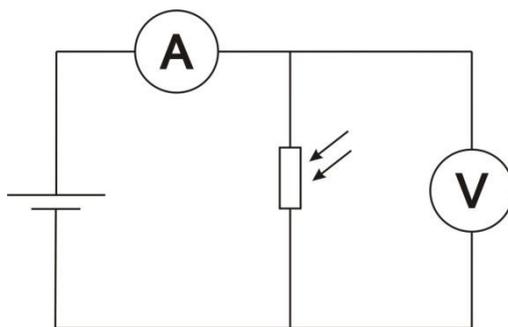


Рис. 6. Электрическая схема для измерения вольтамперной характеристики фоторезистора

**Внимание!** Для получения достоверных данных входное сопротивление вольтметра должно быть много больше  $R_{\phi}^{400}$ .

6. Включить излучатель лабораторной установки. Изменяя выходное напряжение на блоке питания (для фоторезистора СФ2-2 с дискретностью 0,5В для фоторезистора СФ2-16 с дискретностью 1В), по шкалам амперметра и вольтметра производить измерения падения напряжения на фоторезисторе и величины тока через него. После измерений выключить излучатель лабораторной установки.

**Внимание!** Максимальное падение напряжения на фоторезисторе СФ2-2 не должно превышать величины 15 В, а на фоторезисторе СФ2-16 величины 30В. Освещенность фоторезистора при измерениях должна быть постоянной.

7. По результатам измерений заполнить табл. 3.

Табл. 3. Результаты измерения вольтамперной характеристики

Падение напряжения на фоторезисторе, В						
Ток через фоторезистор, мА						

8. По результатам измерений построить вольтамперную характеристику фоторезистора.

*Изучение люксамперной характеристики фоторезистора.*

9. В соответствии с рис. 7 собрать электрическую схему.

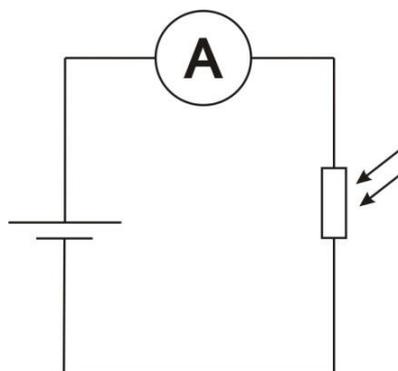


Рис. 7. Электрическая схема для изучения люксамперной и спектральной характеристик фоторезистора

**Внимание!** Для получения достоверных данных при измерении люксамперной характеристики необходимо, чтобы освещение фоторезистора происходило только от излучателя лабораторной установки, поэтому необходимо максимально уменьшить освещенность от других источников света (светильников, окон и т.п.).

10. В соответствии с таблицей 1 установить на блоке питания номинальное напряжение питания фоторезистора.

11. Включить блок питания и осветитель лабораторной установки. Плавно изменяя с помощью диафрагмы объектива освещенность фоторезистора от минимальной до максимально достижимой, по шкалам люксметра и амперметра производить измерения освещенности фоторезистора и тока через него. Для построения характеристики необходимо не менее 10 измерений. После измерений выключить блок питания и излучатель лабораторной установки.

12. По результатам измерений заполнить табл. 4.

Табл. 4. Результаты измерения люксамперной характеристики

Освещенность фоторезистора, лк							
Ток через фоторезистор, мА							

13. По результатам измерений построить люксамперную характеристику фоторезистора.

### *Изучение спектральной характеристики фоторезистора*

Электрическая схема для измерения спектральной характеристики фоторезистора имеет вид, представленный на рис. 7.

14. В соответствии с таблицей 1 установить на блоке питания номинальное напряжение питания фоторезистора.

15. Включить блок питания и осветитель лабораторной установки. С использованием диафрагмы добиться максимально возможной освещенности фоторезистора.

16. С использованием светофильтров изменять длину волны освещения фоторезистора и по шкале амперметра производить измерения тока через фоторезистор. При этом необходимо, чтобы освещенность фоторезистора была постоянной. Последняя контролируется по шкале люксметра, а изменяется диафрагмой объектива лабораторной установки. При измерениях освещенности необходимо учитывать спектральную чувствительность люксметра, и определять освещенность по формуле (3) с использованием поправочных коэффициентов из таблицы 2. После измерений выключить блок питания и излучатель лабораторной установки.

17. По результатам измерений заполнить табл. 5.

Табл. 5. Результаты измерения спектральной характеристики

Длина волны света, мкм	Ток через фоторезистор, мА
(0,40-0,45)	
(0,45-0,48)	
(0,48-0,50)	
(0,50-0,56)	
(0,56-0,59)	
(0,59-0,62)	
(0,62-0,76)	

18. По результатам измерений построить спектральную характеристику фоторезистора.

### Измерение постоянной времени фоторезистора.

19. В соответствии с рисунком 8 собрать электрическую схему.

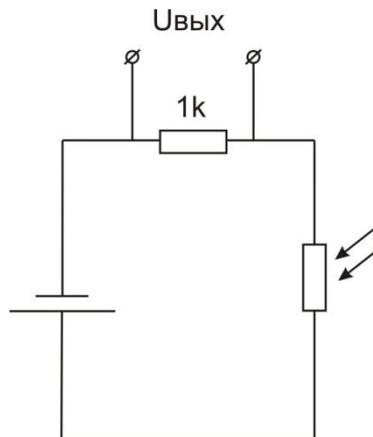


Рис. 8. Электрическая схема для измерения постоянной времени фоторезистора

20. В соответствии с таблицей 1 установить на блоке питания номинальное напряжение питания фоторезистора. С использованием электронного осциллографа получить графики переходного процесса нарастания и спада  $U_{вых}$ . Первый получается при включении осветителя лабораторной установки, второй при выключении. По шкале люксметра необходимо измерить освещенность фоторезистора, при включенном и выключенном осветителе. После измерений выключить блок питания и осциллограф.

21. По графикам переходного процесса в соответствии с рисунком 4 определить постоянную времени нарастания фототока и постоянную времени спада фототока.

22. По результатам выполнения лабораторной работы сделать выводы и оформить.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблицы, графики,

измеренные и вычисленные параметры фоторезистора.

5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните физические основы фоторезистивного эффекта.
2. Поясните вольтамперную характеристику фоторезистора.
3. Поясните люксамперную характеристику фоторезистора.
4. Поясните спектральную характеристику фоторезистора.
5. Поясните причины наличия постоянной времени фоторезистора
6. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.

### **Библиографический список**

1. Козелкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 264с.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. – 5-е изд., исправленное. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 480с.
3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации многофункциональной платы аналогового и цифрового ввода/вывода ЛА-70М4. – М: ЗАО «Руднев-Шиляев», 1998. – 57с.
4. Руководство по эксплуатации к цифровому люксметру LX1010В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Изучение принципа действия резистивного преобразователя на примере металлического терморезистора

*Цель лабораторной работы* – изучение физических основ металлического терморезистора и определение его основных характеристик.

#### Краткие теоретические сведения

Терморезистор – резистивный преобразователь, изменяющий свое электрическое активное сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды.

Рассмотрим терморезистор с металлическим чувствительным элементом. Как известно из курса физики активное электрическое сопротивление металлического стержня равно:  $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$  [Ом], где  $\rho$  – удельное сопротивление металла, из которого изготовлен стержень [Ом/м],  $L$  – длина стержня [м],  $S$  – площадь поперечного сечения стержня [м<sup>2</sup>].

В соответствии с данным выражением видно, что изменить активное электрическое сопротивление можно двумя путями:

- изменением  $L$  и/или  $S$  (отношение  $L/S$ ), т.е. деформируя стержень;
- изменением удельного сопротивления  $\rho$ .

По первому принципу строятся тензорезисторы, т.е. преобразователи деформации, а по второму – терморезисторы. Физическая основа работы терморезистора в зависимости удельного сопротивления металлов  $\rho$  от температуры. Физическая основа работы терморезистора заключается в изменении удельного сопротивления металлов  $\rho$  от температуры. В первом приближении данная зависимость может быть представлена в виде линейного закона  $\rho_T = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20))$ , где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление материала терморезистора при температуре окружающей среды 20°C,  $\rho_T$  – удельное сопротивление материала при измеряемой температуре,  $T$  – измеряемая температура,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления [K<sup>-1</sup>] – справочный коэффициент, присущий всем металлам. Для большинства металлов  $\alpha = (0,0001 \dots 0,01) K^{-1}$ , т.е. при изменении температуры на 1° удельное сопротивление меняется на (0,01...1)%.

Терморезисторы часто применяются в системах измерения и контроля температуры. Коэффициент передачи равен отношению выходного сигнала «у»

к входному «х» (рис. 1). Определение коэффициента передачи терморезистора необходимо для пересчета его выходного сигнала (фактически электрического сопротивления) в температуру (измеряемую, например в °С). Данный коэффициент используется в системах обработки сигнала терморезистора.

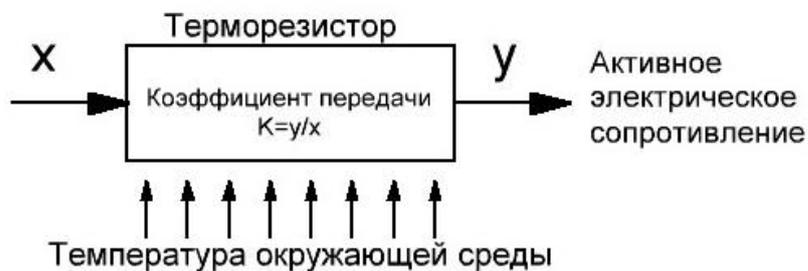


Рис.1. К пояснению понятия коэффициента передачи терморезистора

Решение задачи определения динамических характеристик различных элементов по экспериментальным данным можно найти в специализированной литературе, посвященной теории автоматического управления (теории автоматического регулирования). В данной теории предлагаются следующие методы: метод частотных характеристик, метод импульсных переходных функций, метод регрессивного анализа и др. Более подробно рассмотрено в [2].

Ниже рассматривается метод, являющийся упрощенной вариацией метода импульсных переходных функций и использующий графический способ определения постоянной времени.

Используя простейший графический метод (рис. 2) постоянная времени определяется, как промежуток времени между началом переходного процесса и моментом, когда выходная величина достигает значения 63% от установившегося в конце переходного процесса значения.

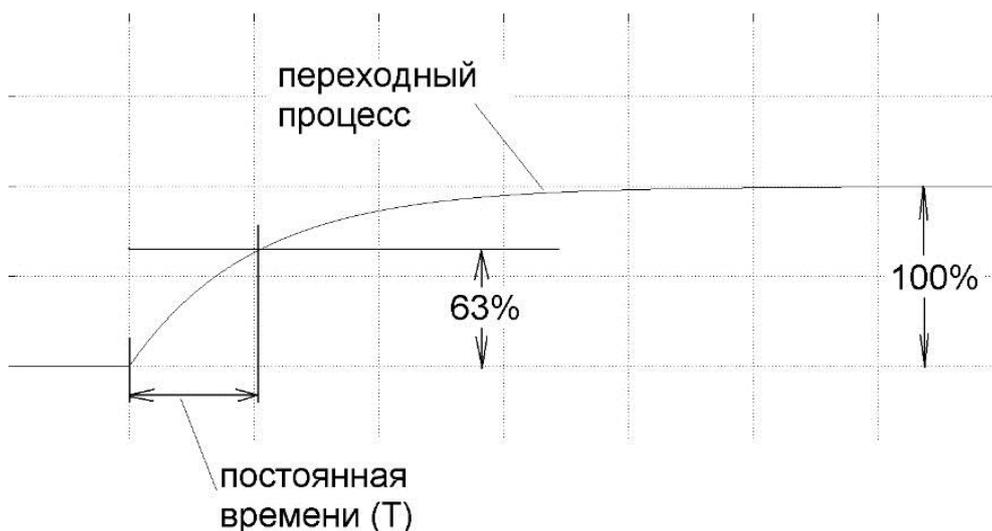


Рис. 2. Вид переходного процесса и графический способ определения постоянной времени

### Описание лабораторной установки

Основные элементы лабораторной установки показаны на рис.3.

В состав лабораторной установки входят: лабораторный блок питания НУ3003D-2, измеритель температуры ТРМ 200 интерфейс связи, мультиметр, нагреватель.

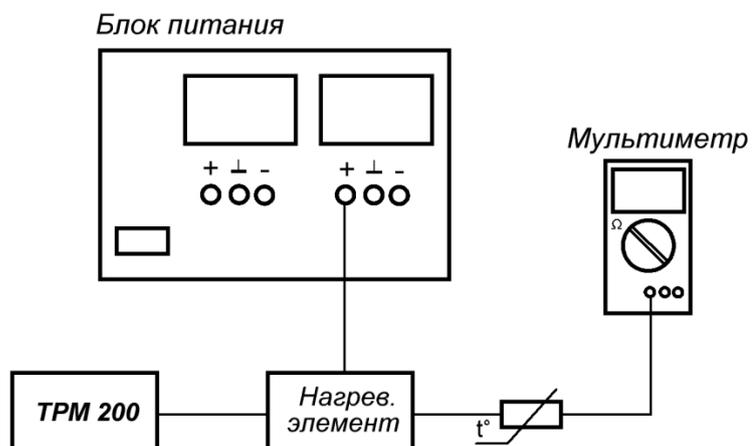


Рис. 3. Схема лабораторной установки

Основные характеристики этой системы приведены в таблице.

Табл. 1. Характеристики лабораторной установки

Параметры	Значение
<b>Питание</b>	
Напряжение питания	90...245 В
Потребляемая мощность	6 ВА
Частота	47...63 Гц
<b>Входы</b>	
Время опроса датчика	1 с
Входное сопротивление при подключении источника унифицированного сигнала:	
- тока (при подключении внешнего прецизионного резистора)	100 Ом ± 0,1 %
- напряжение, не менее	100 кОм
Предел основной допустимой приведенной погрешности при измерении:	
- термопреобразователем сопротивления	0,25%
- термопарой	0,50%
- унифицированных сигналов тока и напряжения	0,50%

Продолжение Табл.1

<b>Интерфейс связи</b>	
Тип интерфейса	RS-485
Скорость передачи данных, кбит/с	2,4;4,8;9,6; 14,4; 19,6; 28,8; 38,4; 57,6; 115,2
Тип кабеля	Экранированная витая пара
<b>Корпус</b>	
Габаритные размеры, мм	130x105x65
Степень защиты корпуса	IP44

В качестве исследуемого терморезистора используется прибор дТС014-50М.В3.20/0.5 производства фирмы «Овен» (г. Москва) (рис. 4).



Рис.4. Внешний вид термосопротивления дТС014-50М.В3.20/0.5

Эксперимент проводится по следующей схеме.

Исследуемый терморезистор помещается в нагревательный прибор. Температуру нагревательного прибора регулируется с помощью лабораторного блока питания НУ3003D-2. Для измерения текущей температуры внутри нагревательного элемента используем двухканальный измеритель ТРМ200. Согласно паспортным данным погрешность измерения температуры данной системы составляет менее  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . Поэтому показания системы необходимо округлять до величины  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Измерение сопротивления терморезистора производить с помощью мультиметра М890G. Согласно паспортным данным погрешность измерения сопротивления составляет менее  $\pm 0,05$  Ом. Поэтому показания мультиметра округлим до величины  $0,1$  Ом.

Для определения постоянной времени терморезистора необходимо построить его переходный процесс, т.е. зависимость по времени выходного сигнала (сопротивления) терморезистора при ступенчатом изменении входного сигнала (температуры).

Фиксировать изменение во времени сопротивления неудобно, проще фиксировать падение напряжение на этом сопротивлении:

$$\Delta U = \frac{I}{R_T},$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения на сопротивлении терморезистора  $R_T$ ,  $I$  – ток через терморезистор.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

*Построение статической характеристики терморезистора.*

1. Установить терморезистор в нагревательный элемент.
2. Установить в нагревательный элемент датчик температуры системы ТРМ200.
3. К терморезистору подключить мультиметр. Включить мультиметр в режим измерения сопротивления.
4. Включить систему ТРМ200. Включить питание нагревательного элемента.
5. Изменяя с помощью блока питания электрическую мощность, подаваемую к нагревателю (изменяя ток и/или напряжения), можно изменять

температуру нагрева исследуемого терморезистора. Для каждой температуры можно измерить его сопротивление.

По результатам испытаний заполнить табл. 2.

Табл. 2

Заданная температура внутри нагревателя, °С	Активное сопротивление терморезистора, Ом
...	...
...	...

Причем контрольных точек «температура – сопротивление» должно быть не менее 5.

6. Перенести таблицу в файл Microsoft Excel. Формат ячеек данных необходимо сделать числовым, с одним знаком после запятой. С помощью стандартных функций построим диаграмму (точечную диаграмму, на которой значения соединены отрезками) (рис. 5).

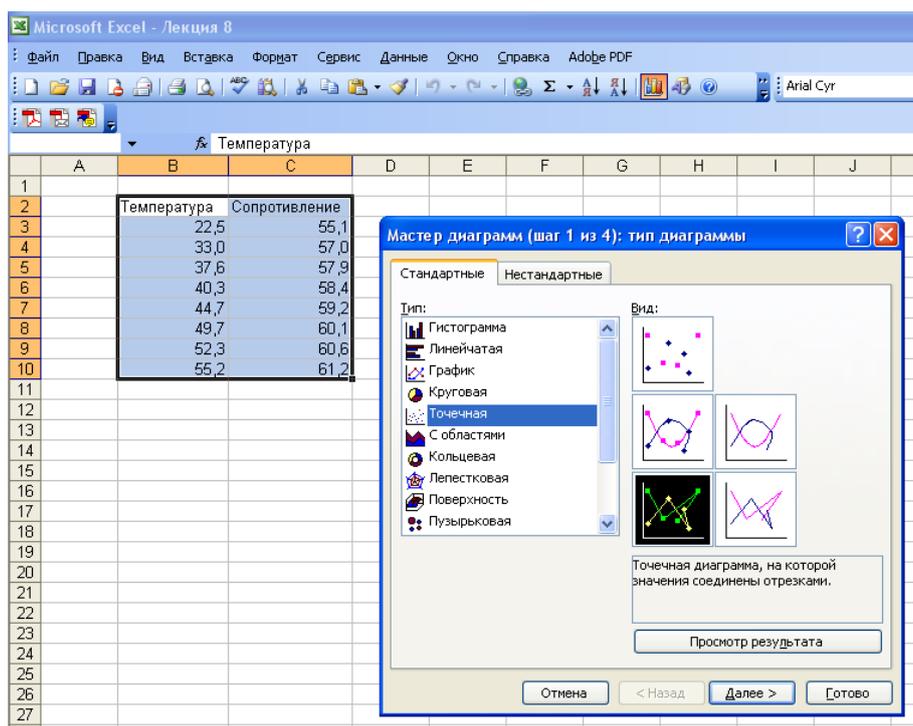


Рис. 5. Построение диаграммы

В результате получим график зависимости сопротивления терморезистора от температуры окружающей среды. Пример показан на рис. 6.

Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

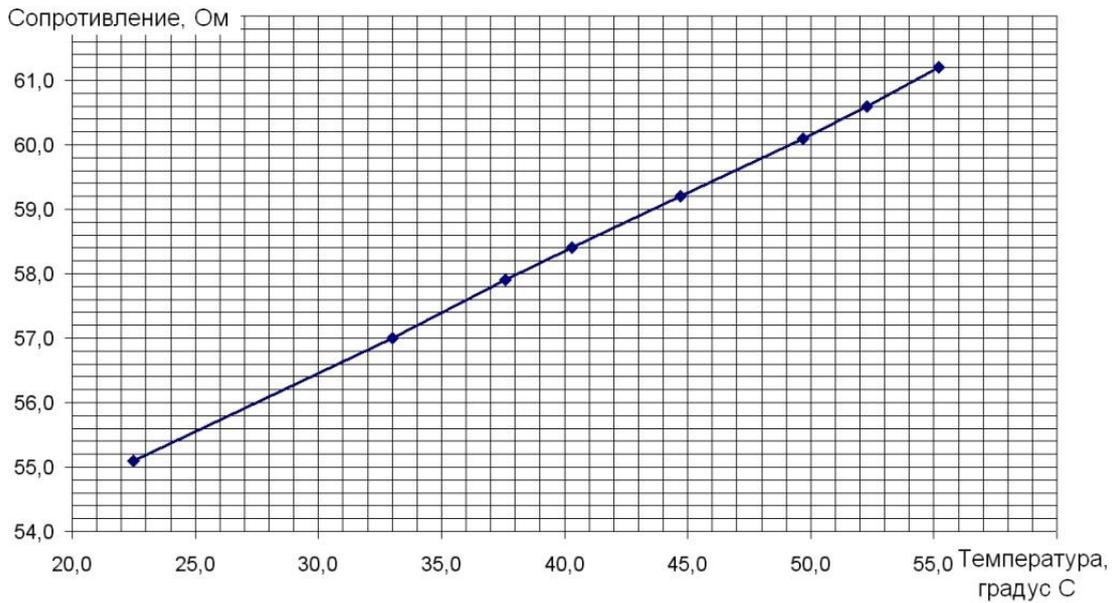


Рис. 6. Пример экспериментальной зависимости сопротивления терморезистора от температуры

7. С использованием функции «Добавить линию тренда» и возможностью показать на диаграмме уравнение аппроксимирующей функции можно автоматически получить аналитическое выражение, связывающее показания терморезистора с температурой, т.е. фактически получить математическую модель терморезистора (рис. 7).

Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

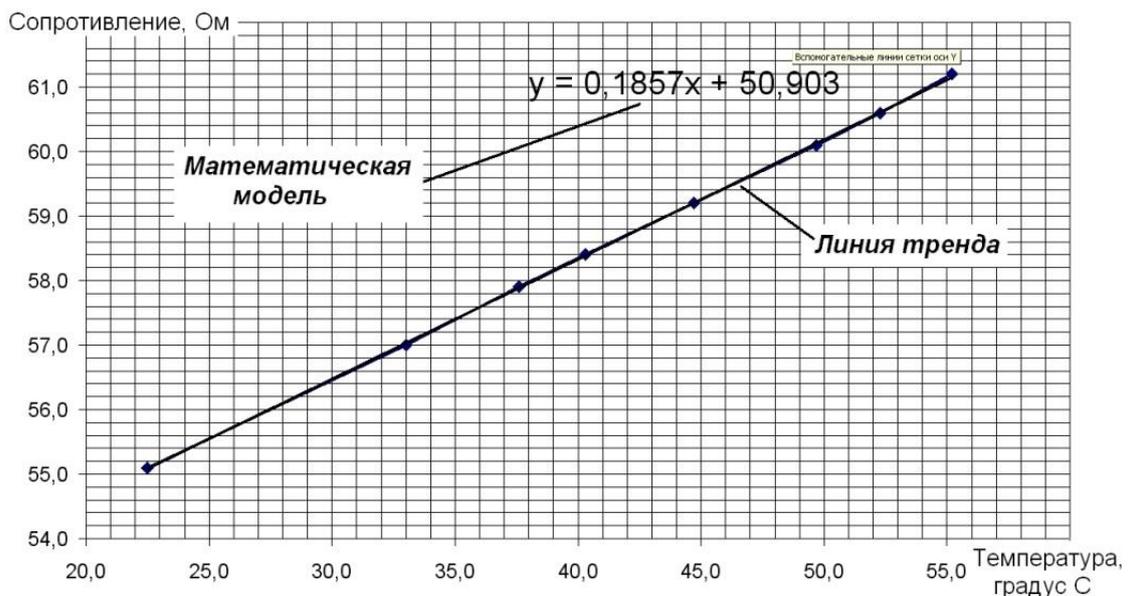


Рис. 7. Добавление линии тренда и получение коэффициента передачи терморезистора

В полученной модели «у» – это сопротивление (выходная величина терморезистора), а «х» – это температура (входная величина терморезистора).

Таким образом, удалось автоматически получить модель терморезистора. Так как исходные данные получены с погрешностями на уровне  $\pm(0,1\dots0,2)\%$ , то и коэффициенты модели получены с погрешностью  $\pm 0,2\%$ . Следовательно, количество знаков после запятой необходимо ограничить. В результате получим:  $y = 0,186 \cdot x + 51$ .

#### *Определение коэффициента передачи терморезистора*

1. Как было сказано выше коэффициент передачи это отношение выходной величины к входной, т.е. поделив в модели обе части уравнения на «х» получим коэффициент передачи:

$$K = 0,186 + 51/x,$$

где х – значение температуры окружающей среды.

#### *Определение постоянной времени терморезистора*

1. Для проведения эксперимента необходимо собрать электрическую схему, представленную на рис. 8.

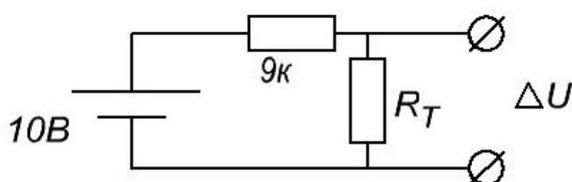


Рис. 8. Схема для записи переходного процесса терморезистора

Согласно паспортным данным на терморезистор дТС014-50М.В3.20/0.5 максимальный ток через него не должен превышать величины 5 мА. В противном случае электрическая мощность начнет выделяться в виде тепла, терморезистор начнет нагреваться и его показания не будут соответствовать температуре окружающей среды. Поэтому в цепь питания терморезистора необходимо включить ограничительное сопротивление, например, 9кОм. Если напряжение питания задать 10В, то через терморезистор протекает ток

$I = \frac{U_{nom}}{9000 + y} \approx 1,1 \text{ мА}$ . С учетом того, что согласно рисунку 4 в диапазоне

температур от 20°C до 60°C  $y = (50...65) \text{ Ом}$ . Такая величина тока вполне допустима.

Падение напряжения  $\Delta U$  на сопротивлении терморезистора составит  $\Delta U = I \cdot y = 1,1(50...65) = (55...72) \text{ мВ}$ . Такую величину падения напряжения вполне можно измерить с погрешностью не хуже 5%.

2. К выходу цепи (рис. 5) подключите электронный осциллограф PDS6062S. С использованием измерительной функции осциллографа во время эксперимента будем определять среднее значение сигнала цепи (функция «Measure»), т.е. среднее значение падения напряжения на терморезисторе.

3. Для обеспечения ступенчатого изменения температуры воспользуемся электронагревателем, блоком питания и термометром на базе мультиметра M890G.

4. На вход схемы подать напряжение 10 В.

5. С использованием щупов подключить вход осциллографа к выходу схемы.

6. Поместить терморезистор и термометр мультиметра в нагреватель. Подать питание на нагреватель.

7. При достижении температуры порядка 60°C снизить напряжение на, подаваемой на нагреватель до 5В. Выждать не менее 15 минут. Это позволит обеспечить постоянство температуры внутри нагревателя и стабилизацию падения напряжения на терморезисторе.

8. Вынуть терморезистор из нагревателя, а по экрану осциллографа следить за изменением во времени среднего значения падения напряжения на терморезисторе. В результате измерений заполнить табл. 3

Табл. 3

Время, с	Среднее значение падения напряжения на терморезисторе $\Delta U$ , мВ	Сопротивление терморезистора $y = \frac{\Delta U}{1,1}$ , Ом
0	...	...
15	...	...
...	...	...

9. Перенести таблицу в файл Microsoft Excel. Формат ячеек данных необходимо сделать числовым. С помощью стандартных функций построим диаграмму (точечную диаграмму, на которой значения соединены отрезками). В результате получим график переходного процесса, например как показан на рис. 9.

10. По графику переходного процесса и добавленной линии тренда (рис. 10) видно, что терморезистор можно описать апериодическим звеном первого порядка. Постоянная времени равна 100 секунд.

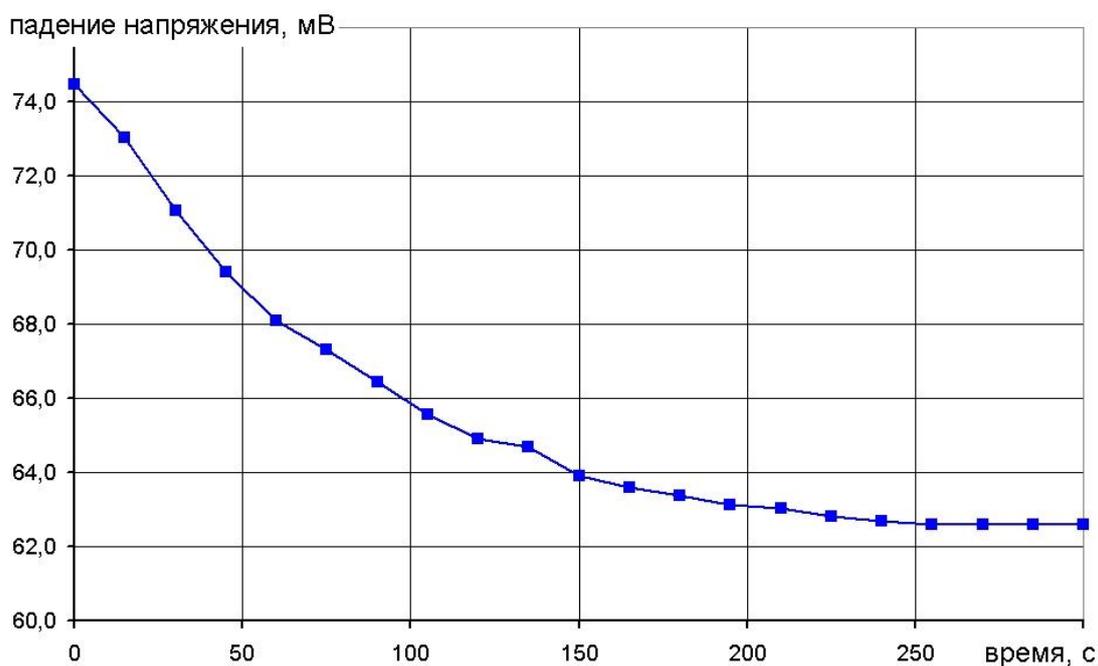


Рис. 9. Вид переходного процесса терморезистора

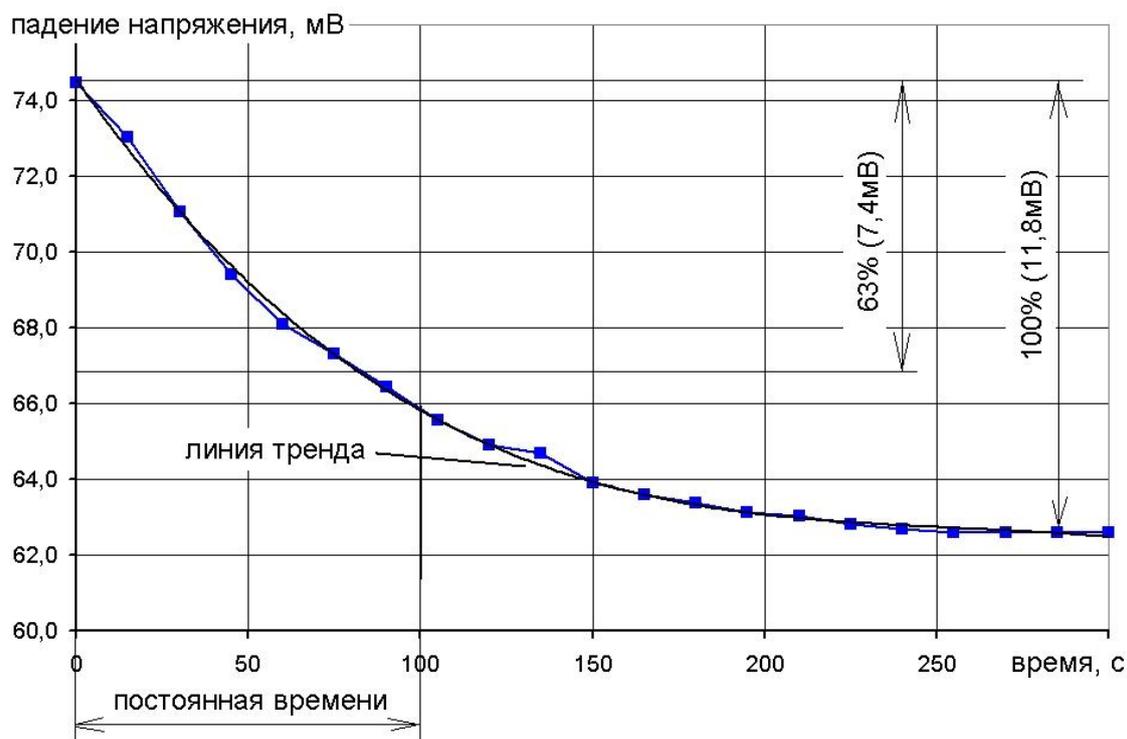


Рис. 10. Аппроксимация переходного процесса терморезистора и определение его постоянной времени

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Описание основных элементов лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблицы, графики, рассчитанные параметры и характеристики терморезистора.
6. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Поясните физические основы функционирования металлического терморезистора.
2. Поясните область применения, достоинства и недостатки металлических терморезисторов.
3. Поясните и опишите основные характеристики терморезистора.
4. Поясните метод определения коэффициента передачи терморезистора.
5. Поясните метод определения постоянной времени терморезистора.

6. Охарактеризуйте применяемую в лабораторной работе систему измерения температуры ТРМ 200.

### **Библиографический список**

1. Левшина Е.С., Новицкий А.В. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

2. Топчеев Ю.И., Цыпляков А.П. Задачник по теории автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 592 с.

3. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Изучение принципа действия потенциметрического преобразователя

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа действия, конструктивных особенностей и основных погрешностей потенциметрических преобразователей угловых и линейных перемещений.

#### Краткие теоретические сведения

Потенциметрический преобразователь (потенциометр) предназначен для получения электрического сигнала, функционально зависящего от перемещения токоъемного элемента (движка с контактами). Потенциометр представляет собой регулируемый делитель напряжения, выполненный на основе резистивного элемента. Резистивным элементом могут быть: проволока, намотанная на каркас (проволочный потенциометр), пленка из высокоомного металла, напыленная на подложку (пленочный потенциометр), графит (графитовый потенциометр).

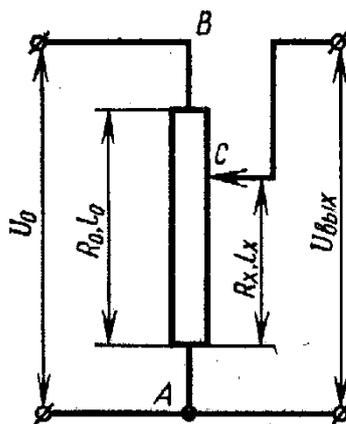


Рис. 1. Электрическая схема подключения потенциометра

При соответствующем включении он может быть использован и как переменное сопротивление. При этом выходной величиной является не само сопротивление, а падение напряжения на нем. Электрическая схема подключения потенциометра показана на рис. 1. Входное напряжение  $U_0$  подводится к точкам A и B потенциометра, а выходное  $U_{\text{вых}}$  снимается с точек A и C (скользящий контакт).

Текущее сопротивление  $R_x$  потенциометра связано с перемещением движка  $l_x$  зависимостью

$$R_x = R_0 \frac{l_x}{l_0},$$

где  $R_0$  и  $l_0$  – соответственно общее сопротивление и полная рабочая длина потенциометра. Тогда

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{l_x}{l_0}. \quad (1)$$

Важной характеристикой потенциометра является **разрешающая способность**.

Поясним это понятие. В проволочных потенциометрах равномерное перемещение движка приводит к дискретному изменению  $U_{\text{вых}}$  (рис. 2). Это объясняется тем, что движок потенциометра переходит с одного витка на другой. Величина скачков напряжения  $\Delta U$ , характеризующая разрешающую способность, обратно пропорциональна числу витков обмотки  $w$ :  $\Delta U = \frac{U_0}{w}$ .

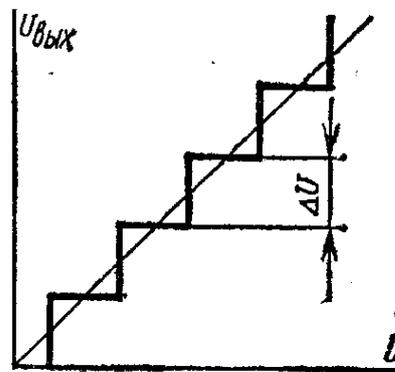


Рис. 2. К пояснению разрешающей способности потенциометра

Для проволочного потенциометра разрешающая способность связана с **витковой погрешностью**  $\delta_v$ , определяемой как наибольшее отклонение, вызванное дискретностью изменения  $U_{\text{вых}}$  от теоретической характеристики. Величина этого отклонения равна половине  $\Delta U$  (рис. 2). Витковая погрешность в процентах может быть определена по выражению:

$$\delta_v = \left( \frac{1}{2w} \right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

Выражение (2) получено в предположении того, что движок одновременно касается только одного витка. На самом деле, при переходе с одного витка на другой происходит замыкание двух соседних витков.

Это приводит к появлению промежуточного скачка напряжения, величина которого зависит от положения движка на потенциометре. В середине обмотки величина промежуточного скачка оказывается равной половине  $\Delta U$  а это, в свою очередь, формально приводит к двукратному уменьшению  $\delta_v$ .

Таким образом, витковая погрешность, определенная по формуле (2) представляет собой максимальное значение, и она лишь условно принимается за постоянную величину.

Для пленочных и графитовых потенциометров разрешающая способность связана с зернистостью напыления (металла или графита), и существенно выше по сравнению с проволочными.

**Общее сопротивление** потенциометра  $R_0$  зависит от геометрических размеров потенциометра и параметров обмотки или покрытия (удельного электрического сопротивления резистивного материала, размеров поперечного сечения каркаса и т. п.). Величина  $R_0$  ограничивается снизу допустимым нагревом потенциометра – чем меньше сопротивление, тем выше при постоянном напряжении питания  $U_0$  протекающий через него ток (а у проволочных потенциометров также и точностью – чем меньше витков, тем больше витковая погрешность), а сверху — технологической сложностью изготовления проводника с малыми размерами поперечного сечения и большим сроком службы (тонкий проводник быстрее изнашивается).

На характеристику потенциометра оказывает влияние величина **сопротивления нагрузки**  $R_H$ . Для потенциометра выражение (1) справедливо только в случае бесконечно большого сопротивления нагрузки. При  $R_H \neq \infty$  (рис. 3):

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha \frac{(1-\alpha)}{k}} \cdot U_0, \quad \text{где } k = \frac{R_H}{R_0}, \alpha = \frac{R_2}{R_0}.$$

Погрешность  $\delta_H$ , обусловленная нагрузкой, равная разности действительного коэффициента передачи потенциометра и коэффициента передачи при  $R_H = \infty$ :

$$\delta_H = \frac{\alpha^2(1-\alpha)}{[k + \alpha(1-\alpha)]} \cdot 100\%. \quad (3)$$

На рис. 3 показаны зависимости  $\delta_H = f(\alpha)$  при различных значениях  $k$ . Из рисунка видно, что  $\delta_H$  тем больше, чем меньше  $k$ .

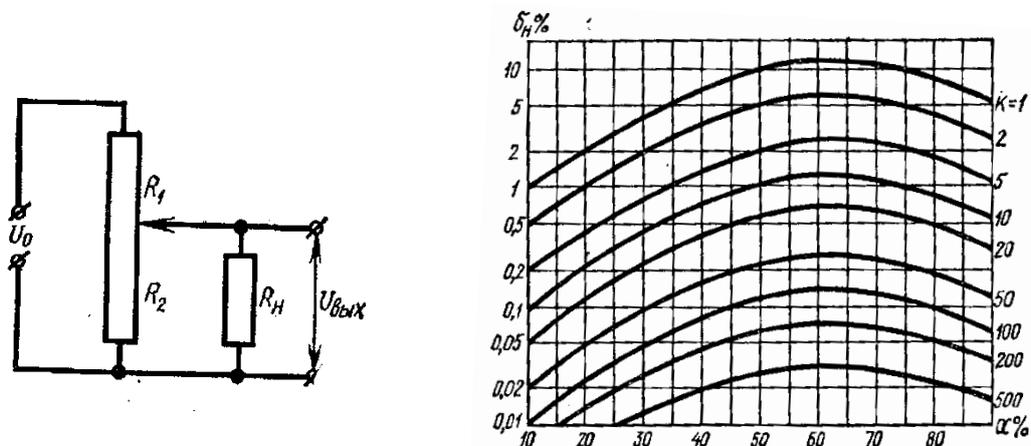


Рис. 3. К расчету погрешности потенциометра, обусловленной сопротивлением нагрузки

При проектировании величина сопротивления нагрузки  $R_H$  обычно бывает заданной. Следовательно, для увеличения  $k$  необходимо выбирать как можно меньше  $R_0$ . Однако чрезмерное уменьшение  $R_0$ , как было указано выше, нежелательно. Поэтому уменьшение величины  $\delta_H$  применяют другие методы, связанные с включением добавочных и шунтирующих сопротивлений.

**Максимальная мощность рассеяния**  $P_{max}$  представляет собой величину мощности, которая может рассеиваться потенциометром без ухудшения его характеристик (изменение  $R_0$  и т. п.). Величина  $P_{max}$  приводится в технических характеристиках потенциометра и зависит от температуры среды, в которой работает потенциометр. При высокой температуре среды мощность рассеяния должна быть соответствующим образом снижена. Величина  $P_{max}$  позволяет определить значение максимально допустимого напряжения питания  $U_{0max}$ :

$$U_{0max} = \sqrt{R_0 P_{max}}.$$

Помимо максимальной мощности рассеяния используют величины **номинальной и действительной мощности**. Под номинальной мощностью рассеяния  $P_{ном}$  подразумевают мощность рассеяния потенциометра при сопротивлением нагрузки  $R_H = \infty$ , т. е.

$$P_{ном} = I^2 R = \frac{U_0^2}{R_0}. \quad (4)$$

Мощность рассеяния при  $R_n \neq \infty$  – действительная мощность рассеяния:

$$P = P_{ном} \frac{k^2}{(1+k)^2}. \quad (5)$$

Номинальная мощность рассеяния потенциометров, как правило, находится в пределах 0,1... 10 Вт.

Резистивный элемент проволочного потенциометра представляет собой проволоку, намотанную на каркас.

Каркасы, используемые для изготовления потенциометров, подразделяются на кольцевые (рис. 4, а), пластинчатые (рис. 4, б), стержневые (рис. 4, в), дуговые (рис. 4, г) и многооборотные (рис. 4, д).

Потенциометры с кольцевыми каркасами используются либо для ограниченного поворота движка на  $300...358^\circ$  (перемещение движка в этом случае ограничивается упорами), либо для кругового движения с периодическим повторением одной и той же функции. Дуговые потенциометры применяются для углов поворота движка на  $40...90^\circ$ , а пластинчатые – для углов поворота  $15...40^\circ$  (с большой длиной щеткодержателя) или для поступательного перемещения движка. Стержневые потенциометры используются только для поступательного перемещения движка.

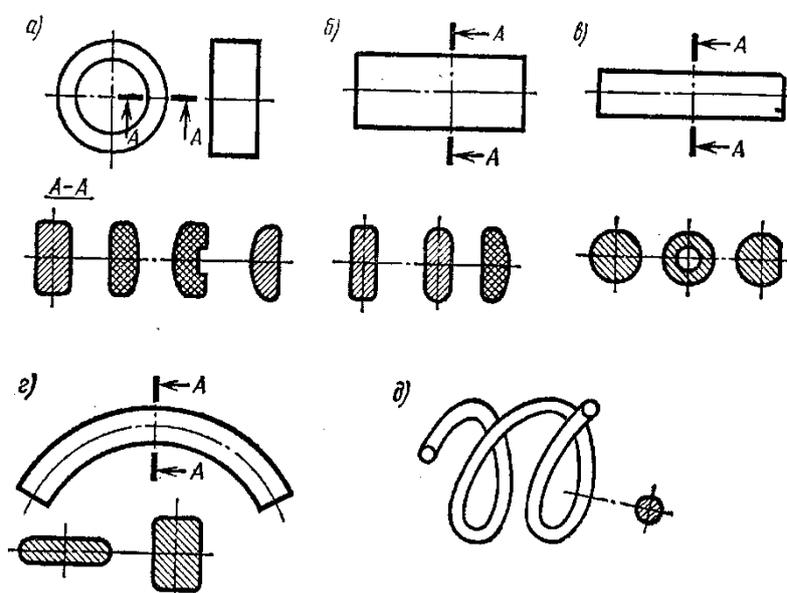


Рис. 4. Виды каркасов проволочных потенциометров

Неметаллические материалы используют для изготовления каркасов потенциометров невысокой точности, так как точность размеров каркасов

получается не выше 3...4-го классов. Использование неметаллических материалов позволяет ввиду их высоких изоляционных качеств отказаться от создания специальных изоляционных пленок на поверхности каркасов. У металлических каркасов такая пленка может быть получена либо нанесением слоя лака, либо при помощи анодирования, в результате чего на поверхности каркаса образуется анодная изоляционная пленка, которую затем пропитывают лаком. Первый способ имеет недостаток, заключающийся в том, что лаковая пленка представляет собой не только электро-, но и теплоизоляционный слой между обмоткой и каркасом. Это сводит на нет одно из главных достоинств использования металлов для изготовления каркасов – улучшение теплового режима потенциометра. Кроме того, получение тонких лаковых пленок постоянной толщины является сложной технологической задачей. При втором способе осуществляется пропитка анодной пленки лаком, а не нанесение лака на поверхность каркаса. После пропитки размеры каркаса практически не изменяются. Пробивное напряжение анодной пленки после пропитки ее лаком колеблется от 400 до 2400В в зависимости от времени анодирования (0,5...2,5 ч). Получающаяся электроизоляционная пленка обладает лучшей теплопроводностью, чем лаковая. Анодные и лаковые пленки, обладающие высокими изоляционными качествами, могут быть получены только на весьма гладких поверхностях. Поэтому шероховатость каркаса до процесса создания пленки должна быть не ниже 9... 10-го классов.

Металлические каркасы помимо высокой теплопроводности выгодно отличаются от неметаллических возможностью получения сложной конфигурации каркаса с высокой точностью размеров. Поэтому для высокоточных потенциометров и используют металлические каркасы, несмотря на трудности создания электроизоляции между каркасом и обмоткой. Металлические каркасы выполняют с допусками 0,01...0,05 мм на номинальные значения в 0,3...3,0 мм толщины и ширины пластинчатых потенциометров и 0,01...0,03 мм на диаметры стержней стержневых потенциометров при номинальном их значении 2...10 мм. Из технологических соображений толщину каркаса рекомендуется брать  $b > 4d$ , (где  $b$  – толщина каркаса,  $d$  – диаметр проволоки обмотки), а радиусы закругления на углах не менее  $2d$ .

К материалу проволоки для обмотки предъявляют следующие требования: высокое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент электрического сопротивления, высокая коррозионная стойкость, высокие прочность и износостойкость. В табл. 1 приведены сведения о наиболее распространенных материалах для обмоточной проволоки.

Константан отличается большим постоянством сопротивления при изменении температуры. При нагреве на поверхности константана образуется окисная пленка, обладающая электроизоляционными свойствами. В ряде конструкций это позволяет производить плотную намотку (виток к витку без изоляции), если напряжение между витками не превышает 1В. С другой стороны, окисная пленка требует применения больших контактных усилий. Обычно константан используется для потенциометров средней точности. Манганин имеет свойства примерно такие же, как и константан. Нихром имеет большое удельное сопротивление, но отличается непостоянством его при изменении температуры, устойчив к окислению на воздухе при высоких температурах. У нихрома есть еще один недостаток – он плохо паяется. Сплавы на основе платины, золота и палладия используются для изготовления обмотки высокоточных потенциометров. Они антикоррозионны. Наиболее широко используется сплав ПДС-40. Его удельное сопротивление такое же, как у константана, и в то же время он позволяет получить небольшое контактное сопротивление при малых контактных усилиях.

Табл. 1. Характеристики материалов обмотки потенциометров

Наименование и марка материала	Удельное сопротивление при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\rho \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$	Температурный коэффициент сопротивления, $\text{град}^{-1} \cdot 10^{-4}$	Допустимая температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$
Константан НМц 40-1,5	0,48.. 0,52	- 0,05	400
Нихром Х20Н80	1,05	- 1,5	1100
Нихром Х15Н60	1,09	- 1,4	1100
Манганин МНМц 3-12	0,43	+0,1	100
Платина – иридий ПИ-25	0,315	- 9,5	–
Платина – никель ПН-5	0,11...0,50	+2,2...7,1	–
Палладий – серебро ПДС-40	0,42	+3	–
Палладий – серебро ПДС-70	0,14...0,16	+3,2...4,1	–
Золото — никель ЗЛН10	0,084...0,5	+2,3...9,4	–

Для намотки потенциометров используют проволоку диаметром 0,03...0,3 мм. Из манганина, обладающего хорошей пластичностью, выпускается также проволока диаметром 0,02 и 0,025 мм.

В случае, если обмотка выполняется из неизолированной проволоки, намотка должна осуществляться с зазором между витками, чтобы устранить возможность замыкания соседних витков. При применении проволоки с изоляцией намотка может осуществляться без зазора. Это повышает разрешающую способность. Крепление обмотки на каркасе может быть осуществлено двумя способами. При первом каркас до намотки покрывается клейким составом и намотка производится на не засохший слой состава. При намотке состав вытесняется между витками, связывая их между собой. При другом способе клейкий состав наносится на предварительно намотанную обмотку. После затвердевания состава осуществляется зачистка контактной дорожки. Зачистка может осуществляться как механическими способами с использованием абразивных материалов, так и химическими и ультразвуковыми способами.

Наиболее часто для подсоединения выводного провода к обмотке используются пайка и сварка. В тех случаях, когда требуется вывод от промежуточных точек потенциометра, рекомендуется такая последовательность его получения. В требуемом месте оттягивают виток обмотки и под нее пропускают конденсаторную бумагу. Этот виток зачищают, после чего под витком пропускают зачищенный расплющенный конец выводного провода. Он огибается вокруг оттянутого витка и припаивается к нему (рис. 5). Место пайки покрывается лаком и закрывается бумагой на клее БФ-4.

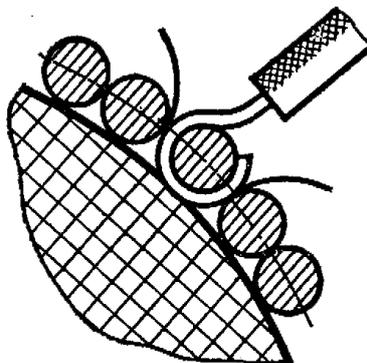


Рис. 5. К пояснению принципа изготовления потенциометра

### **Описание лабораторной установки**

Основные элементы лабораторной установки показаны на рис. 6. Лабораторная установка включает в себя: потенциометрический преобразователь линейных перемещений, потенциометрический преобразователь угловых перемещений, лабораторный блок питания, мультиметр и электронный осциллограф.

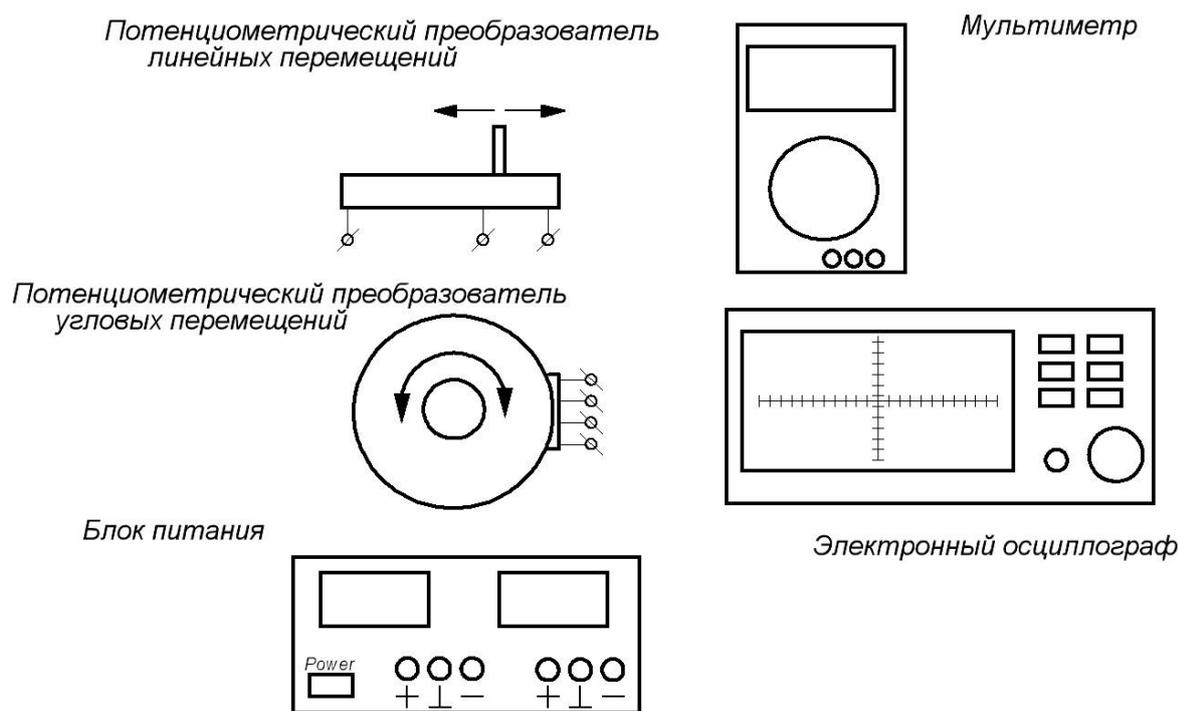


Рис. 6. Основные элементы лабораторной установки

В качестве исследуемых преобразователей использованы: один графитовый потенциометр – преобразователь линейных перемещений и один проволочный потенциометр – преобразователь угловых перемещений.

Блок питания позволяет подать постоянное электропитание на исследуемые преобразователи. С помощью мультиметра можно измерять сопротивление преобразователей. Электронный осциллограф предназначен для отображения падения напряжения на преобразователях.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

#### *Изучение принципа действия и основных погрешностей потенциометрического преобразователя линейных перемещений*

1. Подключить выходные клеммы преобразователя к входным клеммам мультиметра.
2. Установить режим работы мультиметра – измерение сопротивления. Включить мультиметр.
3. Установить движок преобразователя в крайнее левое положение. Измерить сопротивление преобразователя при этом положении движка.

4. Смещая движок вправо на один сантиметр, измерять сопротивление преобразователя.

5. Заполнить таблицу:

Положение движка, мм	0	10	20	30	40	...
Сопротивление, Ом						

6. По данным таблицы построить график зависимости сопротивления преобразователя от положения движка.

7. Подключить преобразователь к блоку питания.

8. Выставить на блоке питания напряжение, не превышающее максимально допустимое для данного преобразователя. Данное напряжение можно рассчитать исходя из максимально допустимой мощности рассеиваемой преобразователем и его сопротивлением. Данная информация размещена на корпусе преобразователя.

9. К выходным клеммам преобразователя подключить осциллограф.

10. Включить блок питания и осциллограф.

11. Перемещая движок преобразователя наблюдать за изменением падения напряжения на нем.

12. С помощью встроенных функций осциллографа определить шумовые характеристики сигнала преобразователя. Данные характеристики занести в отчет.

### *Изучение принципа действия и основных погрешностей потенциометрического преобразователя угловых перемещений*

1. Подключить выходные клеммы преобразователя к входным клеммам мультиметра.

2. Установить режим работы мультиметра – измерение сопротивления. Включить мультиметр.

3. Установить движок преобразователя в крайнее левое положение. Измерить сопротивление преобразователя при этом положении движка.

4. Вращая движок по часовой стрелке, измерять сопротивление преобразователя каждые  $10^\circ$ .

5. Заполнить таблицу.

Угловое положение движка, градус	0	10	20	30	...	330
Сопротивление, Ом						

6. По данным таблицы построить график зависимости сопротивления преобразователя от положения движка.

7. Подключить преобразователь к блоку питания.

8. Выставить на блоке питания напряжение, не превышающее максимально допустимое для данного преобразователя. Данное напряжение можно рассчитать исходя из максимально допустимой мощности рассеиваемой преобразователем и его сопротивлением. Данная информация размещена на корпусе преобразователя.

9. К выходным клеммам преобразователя подключить осциллограф.

10. Включить блок питания и осциллограф.

11. Перемещая движок преобразователя наблюдать за изменением падения напряжения на нем.

12. С помощью встроенных функций осциллографа определить шумовые характеристики сигнала преобразователя. Данные характеристики занести в отчет.

13. Аккуратно перемещая движок на малый угол с помощью осциллографа определить витковую погрешность преобразователя.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты измерений: таблицы, графики, значения шумовых составляющих, витковая погрешность.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните принцип действия потенциметрического преобразователя линейных перемещений.
2. Поясните принцип действия потенциметрического преобразователя угловых перемещений.
3. Приведите и поясните схему включения потенциметрического преобразователя.
4. Поясните основные характеристики потенциметрического преобразователя.

5. Опишите основные конструкции потенциметрических преобразователей.

6. Поясните причины шумовой составляющей в выходном сигнале потенциметрического преобразователя линейных перемещений.

7. Рассчитайте максимально допустимое напряжение питания потенциметрического преобразователя.

8. Поясните причины витковой погрешности проволочного преобразователя угловых перемещений.

### **Библиографический список**

1. Элементы приборных устройств. Курсовое проектирование. В 2-х частях. Ч. 1. Расчеты. Под ред. д.т.н., проф. О.Ф. Тищенко. -М.: Высшая школа, 1978г. 328.

2. Левшина Е.С., Новицкий А.В. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### Изучение принципа действия сумеречного переключателя

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа действия и основных характеристик сумеречного переключателя.

#### Краткие теоретические сведения

Сумеречный переключатель используется в системах автоматического управления лампами освещения в жилых помещениях, промышленных цехах, складских помещениях, ангарах и т.п. Данное устройство позволяет включать освещение в помещении, если световой поток становится меньше допустимого и, соответственно, выключать освещение, если световой поток превышает заданный порог.

Использование данного устройства позволяет значительно экономить электроэнергию, т.к. включение и выключение освещения производится не в фиксированные моменты времени, а зависит от светового потока в месте установки чувствительного элемента.

Чувствительным элементом является фотоприемник. В качестве фотоприемника могут применяться фоторезистор, фотодиод или фототранзистор. Следует помнить, что характеристики перечисленных полупроводниковых приборов зависят не только от освещенности (люксамперная характеристика), но и от длины волны (спектральная характеристика), от температуры окружающей среды и ряда других факторов. Поэтому при проведении экспериментов необходимо поддерживать все факторы кроме светового потока постоянными.

#### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка позволяет исследовать принцип действия и основные характеристики сумеречного переключателя. Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

Выключатель на передней панели предназначен для включения и отключения электропитания установки. Само электропитание (220В 50Гц бытовой электросети) подводится на клеммы в нижней части установки. Люксметр предназначен для измерения светового потока, попадающего на чувствительный элемент установки. Чувствительным элементом является фотоприемник, окно под который находится в верхней части установки.

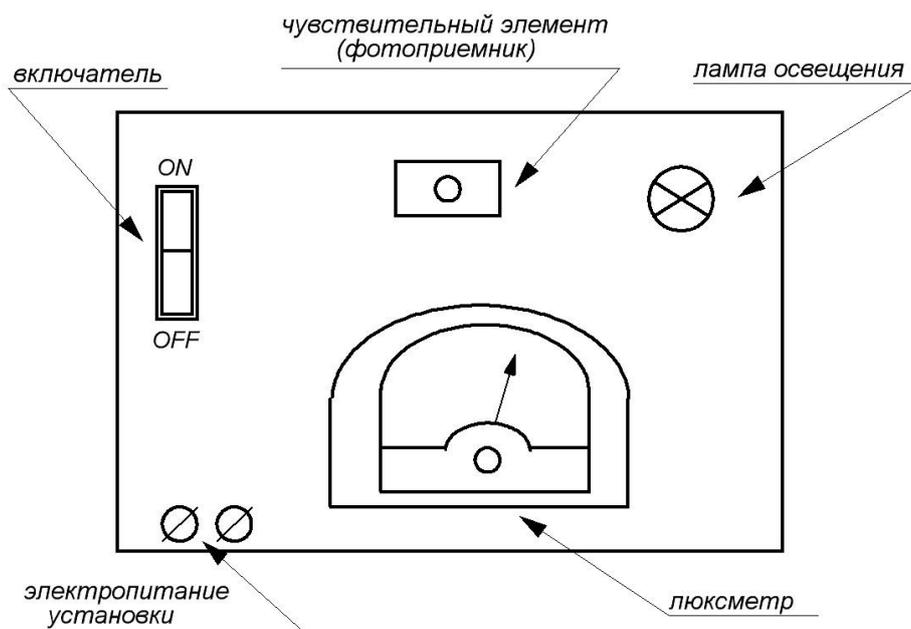


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Лампа освещения является индикатором срабатывания сумеречного переключателя и включается каждый раз, как световой поток становится меньше заданного и, соответственно выключается, когда световой поток становится больше заданного.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Используя резистор подстройки можно изменить характеристики переключателя в части величины срабатывания светового потока. Установив резистор в крайне левое положение определить величину светового потока, при которой включается индикаторная лампа.
2. Вращая резистор по часовой стрелки, измерять люксметром поток срабатывания сумеречного переключателя.
3. Используя секундомер необходимо определить максимальное время срабатывания индикаторной лампы от положения резистора подстройки.

4. Заполнить таблицу.

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Положение резистора подстройки									
Световой поток срабатывания									
Время срабатывания индикаторной лампы									

5. По полученной таблице построить график зависимости светового потока срабатывания сумеречного выключателя от положения резистора подстройки.

6. По полученной таблице построить график зависимости времени срабатывания индикаторной лампы от положения резистора подстройки.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты проведения лабораторной работы (таблица и два графика).
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните область применения сумеречного переключателя.
2. Поясните принцип работы сумеречного переключателя.
3. Поясните факторы, влияющие на работу сумеречного переключателя и причины этого влияния.
4. Опишите лабораторную установку, её основные элементы и принцип функционирования.
5. Поясните вид зависимости светового потока срабатывания сумеречного выключателя от положения резистора подстройки.
6. Поясните вид зависимости времени срабатывания индикаторной лампы от положения резистора подстройки.

### **Библиографический список**

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко .— 4-е изд., стер. — М. : Академия, 2008 .— 336с.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7**

### **Изучение принципа действия оптореле**

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа функционирования и основных характеристик оптореле.

#### **Краткие теоретические сведения**

Оптореле – полупроводниковый оптикоэлектрический прибор, предназначенный для гальванической развязки электрических цепей между собой. Например, если необходимо ввести электрический сигнал на плату АЦП, стоимость которой как правило высока, применение оптореле позволяет защитить входы АЦП от возможных пробоев. Более того, данные приборы обеспечивают одностороннюю передачу управляющих и информационных сигналов, т.е. изолируют измерительные преобразователи от влияния измерительных цепей.

Оптореле представляет собой микросхему, в состав которой входит излучатель и приемник оптического излучения. В качестве излучателя можно использовать светодиод, в качестве приемника: фоторезистор, фототранзистор и т.п. Для получения хороших характеристик спектральные кривые излучателя и приемника должны быть согласованы.

#### **Описание лабораторной установки**

Схема лабораторной установки показана на рис. 1.

В состав лабораторной установки входит оптореле, установленное на плате, блок питания, ПЭВМ, лампа и комплект кабелей. Для функционирования установки в ПЭВМ необходимо ввести программу «Comm.pas», написанную на языке программирования Pascal. Данная программа позволяет управлять реле, задавая частоту включений и длительность работы во включенном и в выключенном состоянии реле.

Принцип работы твердотельного реле состоит в следующем (по схеме, изображенной на лабораторной установке): входной сигнал (управляющий ток) через диод D1 подается на светодиод. Излучение, пройдя некоторое расстояние в корпусе реле (МОС3041), попадает на фотодиодную матрицу (фотоэлектрический генератор). Падающее излучение создает в фотодиодной матрице фото-ЭДС. Наведенное напряжение подается на схему управления, которая в свою очередь формирует необходимый сигнал для управления выходным ключевым каскадом, обеспечивает защиту затвора выходного МОП-

ключа, обеспечивает быстрое выключение ключа. Силовой ключ реализован на элементах C1, C2, R2, R3, и симисторе TR1. Резистор R1 ограничивает ток через светодиод оптореле.

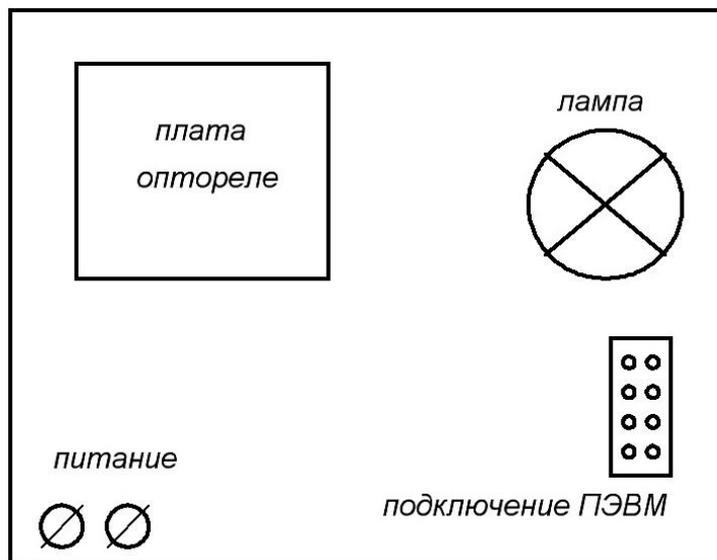


Рис. 1. Схема лабораторной установки

#### Технические характеристики

Управляющее напряжение: 5 - 15 В.

Управляющий ток: 10 мА.

Ток нагрузки, не более: 10 А.

Напряжение коммутации: 220 В.

Размеры печатной платы: 52×38 мм.

#### Перечень элементов

Позиция	Номинал
C1, C2	0,01 мкФ×500 В
R1	500 Ом
R2, R3	470 Ом
DA1	MOS3041
D1	1N4001
TR1	ВТА12-600В, симистор

### Текст программы «Comm.pas»

```
Program Com;
uses crt, dos;
var ch, min, sec, sec100, sec1, sec101, min1: word;
begin
port[$3FB]:=128;
port[$3F8]:=1;
port[$3F9]:=0;
port[$3FB]:=3;
sec1:=0;
gettime(ch, min, sec, sec100);
sec1:=sec; min1:=min;
while not keypressed do
begin
gettime(ch, min, sec, sec100);
if min1<min
then begin sec1:=sec; min1:=min; end;
if (sec-sec1)<=2 {vremiagorenia}
then port[$3F8]:=0
else

if (sec-sec1)>4 {summarnoevremiagorenia+negorenia}
then sec1:=sec;
end;
end.
```

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Собрать лабораторную установку.
2. Подключить лабораторную установку к источнику питания.
3. С использованием программ «Comm.pas» задать время горения лампы 1с и время цикла «включено - не включено» 2с. Таким образом, задается: лампа включена – 1с; лампа выключена – 1с.
4. Запустить выполнение программы.
5. С использованием секундомера оценить частоту включения лампы.
6. Изменяя частоту срабатывания оценить работу реле. При оценке помните об инерционности лампы.

## **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: результаты наблюдений функционирования оптореле.
5. Выводы по проделанной работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте область применения, достоинства и недостатки оптореле.
2. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.
3. Поясните, каким образом с использованием программного обеспечения «Comm.pas» можно менять частоту срабатывания оптореле.
4. 3. Поясните, каким образом с использованием программного обеспечения «Comm.pas» можно менять длительность горения лампы.

## **Библиографический список**

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств. Часть 1, Теория измерительных устройств : в 2 ч. / А.Г. Щепетов . – М. : Стандартинформ, 2006 . – 248с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

### Изучение принципа действия датчика Холла

*Цель лабораторной работы* – изучение эффекта Холла путем измерения основных характеристик преобразователя Холла.

#### Краткие теоретические сведения

Эффект Холла относится к так называемым *гальваномагнитным эффектам*, возникающим в веществе при одновременном воздействии на него электрического и магнитного полей. Эффект Холла связан с возникновением поперечной электродвижущей силы (далее ЭДС) в проводнике, по которому протекает электрический ток, если его поместить в магнитное поле. Возникновение поперечной ЭДС обусловлено действием на носители заряда силы Лоренца, отклоняющей заряженные частицы в направлении, перпендикулярном направлению тока и вектору индукции магнитного поля. Значение силы Лоренца определяется по следующей зависимости:

$$F_L = q[VB], \quad (1)$$

где  $q$  – заряд (электрона или дырки);  $V$  – скорость движения носителей заряда (электрона или дырки);  $B$  – индукция магнитного поля.

Направление действия силы Лоренца поясняется рис. 1 и рис. 2.

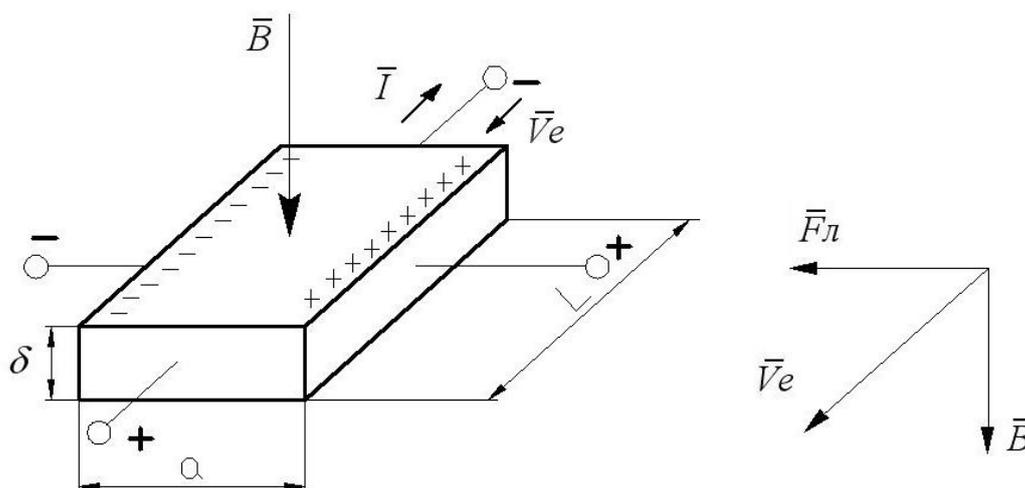


Рис. 1. Направление действия силы Лоренца, действующей на положительные и отрицательные заряды, при некоторых заданных направлениях скорости заряда и индукции магнитного поля в полупроводнике n-типа

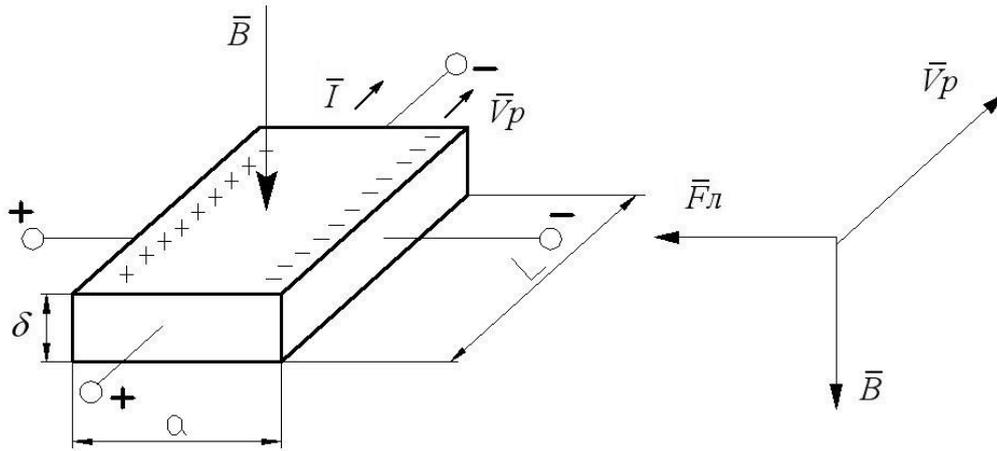


Рис. 2. Направление действия силы Лоренца, действующей на положительные и отрицательные заряды, при некоторых заданных направлениях скорости заряда и индукции магнитного поля в полупроводнике р-типа

Предположим, что основными носителями заряда являются электроны, тогда, считая, что скорости движения электронов равны, действующая сила Лоренца будет смещать электроны к одной из граней, перпендикулярной к направлению электрического поля. В результате эта грань приобретает отрицательный заряд, т.е. возникает поперечное электрическое поле – Холловское поле.

У полупроводника р-типа носителями заряда являются дырки. Т.к. скорость движения направлена вдоль электрического тока, а заряд положителен, то дырки смещаются в ту же сторону, что и электроны, создавая Холловское поле другой полярности. Накопление носителей прекращается, когда сила Лоренца уравновешивается силой Холловского поля. При  $\vec{B} \perp \vec{V}$   $qV\vec{B} = q\vec{E}_x$ ,

где  $E_x = VB$  напряженность Холловского поля.

Таким образом, ЭДС Холла в полупроводнике р-типа:

$$\varepsilon_x = E_x a = VBa = \frac{I}{qra\delta} Ba = \chi \frac{IB}{\delta}, \quad (2)$$

Где  $a$  – линейный размер,  $\chi = \frac{1}{qp}$  – коэффициент Холла для полупроводника р-типа,  $\chi = \frac{-1}{qn}$  – коэффициент Холла для полупроводника n-типа,  $n$ ,  $p$  – избыточная концентрация основных носителей заряда.

Однако экспериментально установлено, что

$$\chi = \frac{A}{qp}, \quad (3)$$

где  $A=1 \div 2$  – коэффициент, зависящий от температуры полупроводника, свойств кристаллической решетки и других параметров.

Преобразователи Холла предназначены для преобразования магнитной индукции в выходное напряжение и являются знакочувствительными как по отношению к направлению магнитной индукции, так и по отношению к полярности управляющего тока. Номенклатура датчиков на эффекте Холла насчитывает множество видов. Датчики классифицируются по области применения на автомобильные, промышленные и общего применения и, в зависимости от назначения, различаются по конструктивным и электрическим характеристикам, а также по рабочему диапазону температур. Однако, несмотря на различия, все приборы имеют схожее устройство.

В данной работе в качестве исследуемого образца применяется датчик Холла типа ДХК-0.5А (рис. 3). Чувствительность данного датчика составляет  $k = 280$  мВ/Тл. Таким образом, ЭДС Холла можно вычислить по зависимости:

$$E_x = Bk. \quad (4)$$

При воздействии на датчик магнитным полем индукцией  $B$ , в соответствии с эффектом Холла между контактами  $+U_x$  и  $-U_x$  образуется Холловская разность потенциалов  $U_x$ .



Рис. 3. Внешний вид, габаритные размеры и назначение контактов датчика Холла ДХК-0,5А

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка выполнена в виде конструктивно законченного изделия. Она включает в себя объект исследования (датчик Холла), источник магнитного поля (электромагнитное реле), измерительного устройства (встроенный милливольтметр). Схема установки представлена на рис. 4, внешний вид приведен на рис. 5.

### Порядок выполнения лабораторной работы

#### 4.1 Определение зависимости ЭДС Холла от магнитной индукции

1. Ознакомиться с теоретической частью работы и описанием лабораторной установки.
2. Включить лабораторную установку. Тумблер «ВОЛЬТМЕТР» перевести в положение «ВНУТРЕННИЙ».
3. Последовательно нажимая кнопки «МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ», зафиксировать значения ЭДС Холла, соответствующую каждому конкретному значению магнитной индукции в рабочем зазоре электромагнитного реле.
4. Используя зависимость (4), вычислить значения ЭДС Холла, при значениях магнитной индукции 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 Тл.

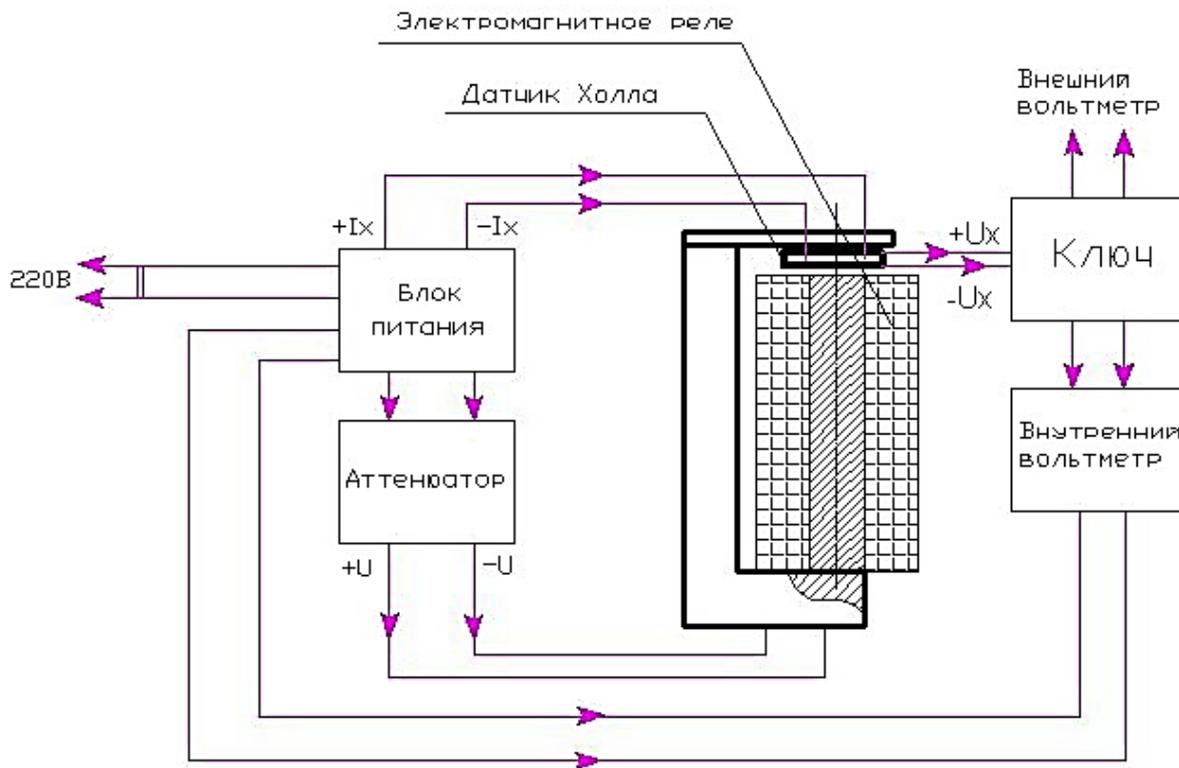


Рис. 4. Схема лабораторной установки

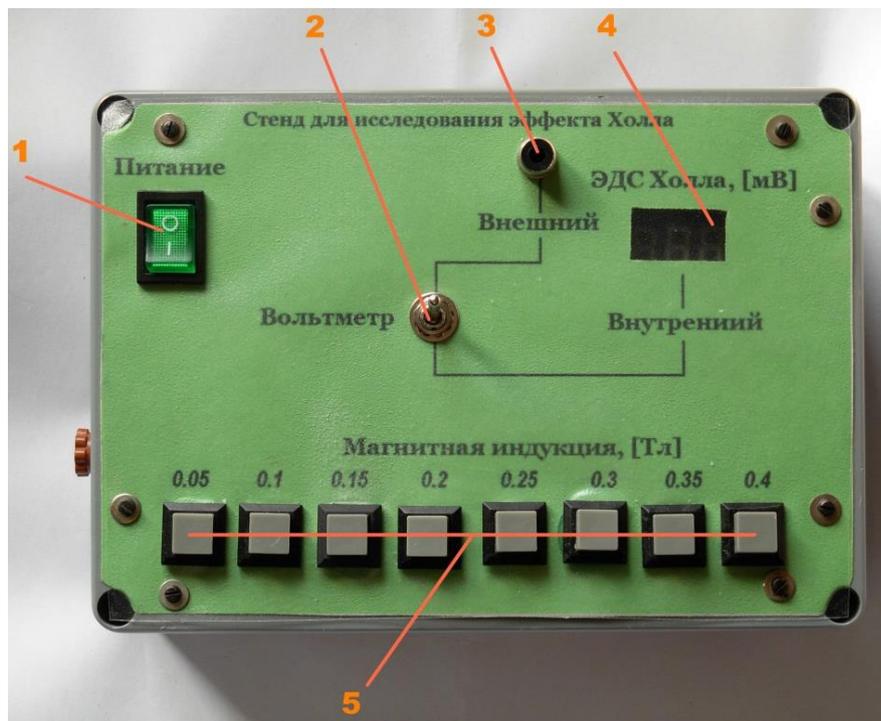


Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки:

- 1-тумблер включения установки;
- 2-тумблер переключения между встроенным и внешним вольтметрами;
- 3-разъем для подключения внешнего вольтметра;
- 4-внутренний вольтметр;
- 5-клавиши установки определенного значения магнитной индукции в рабочем зазоре электромагнитного реле

5. Результаты измерений и расчетов п.3 и п.4 занести в таблицу:

	Магнитная индукция, [Тл]							
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Расчетное значение ЭДС Холла, $E_x$ , [мВ]								
Экспериментальное значение ЭДС Холла, $U_x$ , [мВ]								

5. По данным таблицы построить графики зависимости  $E_x = f(B)$  и  $U_x = f(B)$ .

6. По виду графиков сделать выводы (оценить значение нулевого сигнала, коэффициента передачи и нелинейности статической характеристики).

#### 4.2 Определение времени переходного процесса и постоянной времени датчика Холла

1. Тумблер «ВОЛЬТМЕТР» перевести в положение «ВНЕШНИЙ». К разъему для подключения внешнего вольтметра подключить электронный осциллограф.

2. Руководствуясь инструкцией к электронному осциллографу, получить на его экране осциллограмму переходного процесса, т.е. графически зафиксировать реакцию системы на нажатие кнопки «0.4 Тл». Пример осциллограммы переходного процесса представлен на рис. 6.

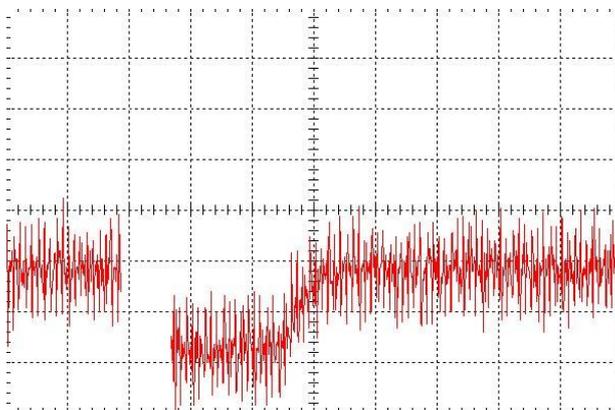


Рис. 6. Примерный график переходного процесса

3. По полученной осциллограмме определить время переходного процесса и постоянную времени системы электромагнитное реле-датчик Холла. Учитывая, что время срабатывания данного типа электромагнитного реле составляет 60 мс, определить постоянную времени датчика Холла.

4. По результатам выполнения лабораторной работы сделать выводы и оформить отчет.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблицы, графики, вычисленные и измеренные параметры датчика Холла.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните физические основы эффекта Холла.
2. Для представленной схемы полупроводника, его включения и направления магнитного поля определить направление силы Лоренца и полярность ЭДС Холла.
3. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.
4. Поясните метод определения времени переходного процесса датчика Холла.
5. Поясните основные область применения и характеристики датчика Холла.

### **Библиографический список**

1. Аронов В.Л. – Испытание и исследование п/п приборов. – М. – изд. «Энергия», 1978.
2. OWON. Цифровые запоминающие осциллографы. Руководство по эксплуатации.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### Емкостной преобразователь

*Цель работы* – изучение физических основ работы емкостного преобразователя различных физических величин.

#### Краткие теоретические сведения

*Емкостные преобразователи* (ЕП) — электростатические преобразователи, у которых входная измеряемая величина связана с изменением емкости системы или с величиной электрического заряда [4].

Действие емкостных преобразователей основано на преобразовании входной величины в изменение емкости конденсатора.

Емкостные датчики используются для детектирования любых параметров движения (перемещение, положение), химического состава, параметров электрического поля и, косвенно, определять многие другие параметры — давление, ускорение, уровень жидкости, состав жидкости, влажности, ускорения, наклона, давления, уровня и т.д.

Производством емкостных датчиков назначения занимаются известные компании: AnalogDevices, Capacitec, Trans-Tek (датчики положения), TexasInstruments (акселерометры, датчики перемещений), Honeywell и Vaisala (датчики влажности). Емкостные датчики используют в составе автомобильных систем компании Bosch, GeneralMotors, Delphi, ContinentalTeves и Visteon.

Чтобы создать емкостной датчик, необходимо посредством варьирования детектируемого параметра произвести изменение емкости конденсатора, которое можно измерить.

Существуют различные пространственные конфигурации конденсаторов, которые можно использовать для данной цели:

- две близко расположенные параллельные пластины — плоский конденсатор;
- диск или сфера;
- цилиндр.

Проиллюстрировать, как именно могут быть созданы емкостные датчики, поможет известное выражение для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума);  $\varepsilon$  – значение относительной диэлектрической проницаемости материала диэлектрика;  $S$  – площадь перекрытия обкладок;  $d$  – расстояние между обкладками.

Важным в определении плоского конденсатора является значительный размер сенсорных электродов (по сравнению с расстоянием  $d$ ).

Чтобы достичь изменения в емкости, необходимо добиться изменения по определенному, предпочтительно линейному, закону свойств диэлектрического материала, геометрии взаиморасположения обкладок или расстояния между ними.

Выделяются *три типа емкостных датчиков*:

1. Датчики с фиксированными обкладками конденсатора: относительное положение обкладок остается неизменным, но емкость конденсатора изменяется в результате помещения близ обкладок различных материалов (рис. 1) [4].

На рис. 1: а – датчик в исходном состоянии при  $x_1 = X$  и  $x_2 = 0$ ; б – датчик с  $x_1 \leq X$  и ненулевым  $x_2$ .

1,2 – нижняя и верхняя обкладки конденсатора, зафиксированные на постоянном расстоянии  $d$ , с максимальной площадью перекрытия  $S$  и полной длиной перекрытия  $X$ ; 3 – слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ ; 4, 5 – зафиксированные печатные платы; 6 – пайка обкладки на плате;  $S_1$  – переменная площадь перекрытия обкладок диэлектриком 3 (с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ ) в пределах детектируемого расстояния  $x_1$ ;  $(S - S_1)$  – переменная площадь перекрытия обкладок воздушным диэлектриком (с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon \approx 1$ ) в пределах переменного расстояния  $x_2 = X - x_1$ ;

в – емкостной датчик зубчатого ротора типа «открытый конденсатор»:  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $F$  – абсолютный и частотные сигналы датчика:  $\varphi$  – сигнал абсолютного углового положения ротора;  $F$ ,  $\omega$  (или  $f$ ) – частота ротора и следования детектируемых элементов, соответственно; 1 – ротор (из металла или диэлектрика); 2 – корпус датчика; 3, 4 – выступающие обкладки плоского конденсатора; 5 – схема питания конденсатора переменным напряжением и обработки сигнала; 6 – проводные терминалы датчика (в трехпроводной

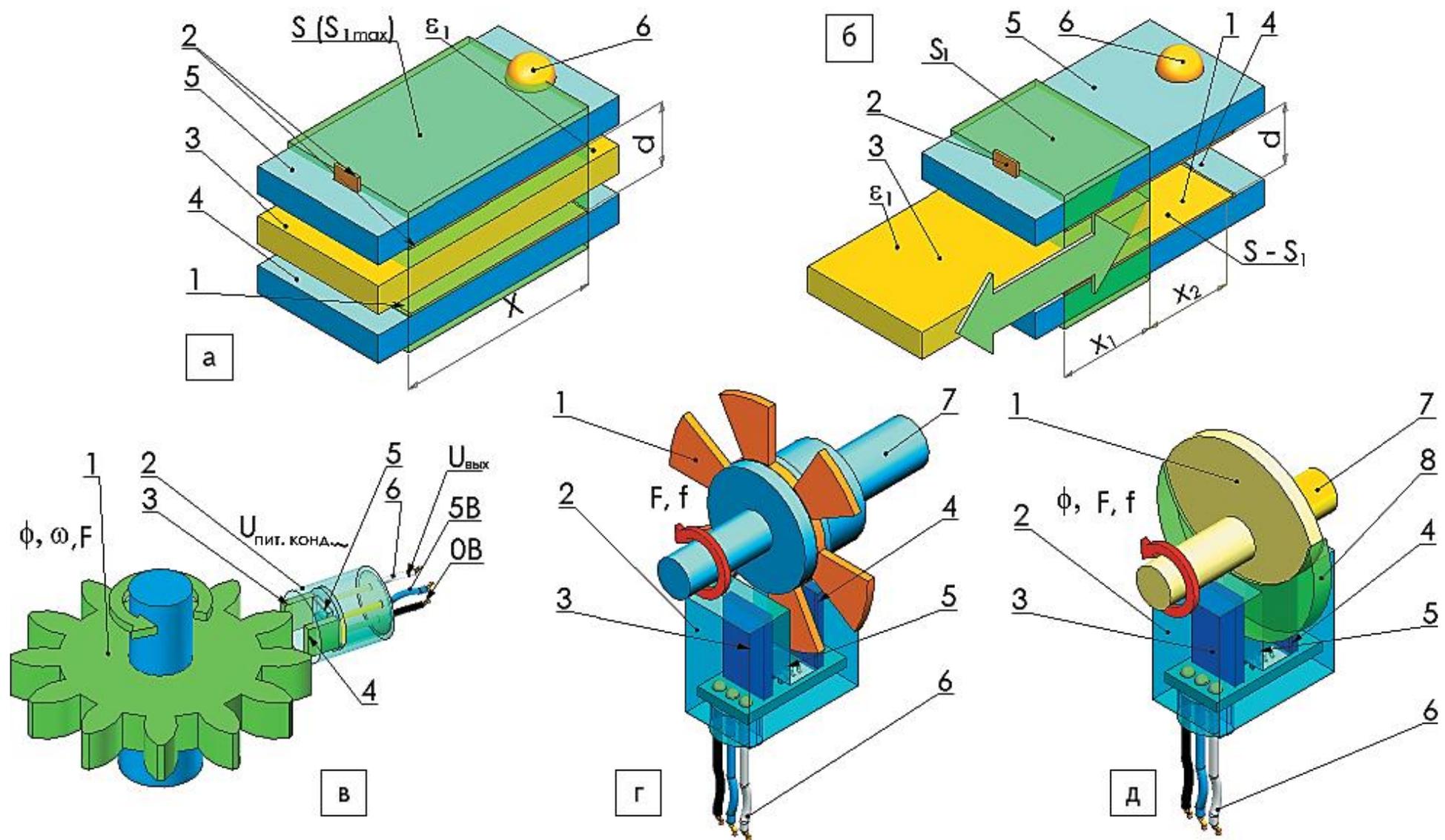


Рис. 1. Линейный емкостной датчик расстояний  $x_1$  и  $x_2$

частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении);  
*г* – угловой емкостной датчик-прерыватель: 1 – ротор-крыльчатка (из металла или диэлектрика); 2 – корпус датчика; 3, 4 – обкладки плоского конденсатора; 5 – схема питания и обработки сигнала; 6 – проводные терминалы датчика (в трехпроводной частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении); 7 – вращающийся вал;  $F, f$  – частотные сигналы датчика; *д* – угловой емкостной датчик абсолютного положения – прерыватель: 1 – ротор с материалом, изменяющим емкостную связь (из металла или диэлектрика); 2 – корпус датчика; 3, 4 – обкладки плоского конденсатора; 5 – схема питания и обработки сигнала; 6 – проводные терминалы датчика (в трехпроводной аналоговой или частотной схеме подключения, работающей на постоянном напряжении); 7 – вращающийся вал; 8 – материал, изменяющий емкостную связь;  $\varphi, F, f$  – абсолютный и частотные сигналы датчика

Например, заземленный проводящий материал уменьшит емкостную связь, материал с высокой диэлектрической проницаемостью увеличит емкость. Эти датчики используются для определения состава материалов, детектирования абсолютного линейного положения (рис. 1, а и б), присутствия детектируемых объектов (датчики близости – рис. 1, в-д). Устройства данного типа легко могут быть преобразованы в массив фиксированных обкладок для детектирования двумерного положения ( $X-Y$ ), если удастся получить определенный (линейный) закон изменения  $\varepsilon(x)$  и  $\varepsilon(y)$ , или образа объекта, а также углового положения – по закону  $\varepsilon(\varphi)$  (рис. 1, д).

2. Датчики, принцип работы которых основан на изменении расстояния между двумя параллельными обкладками конденсатора (рис. 2, а–в). Именно этот тип датчиков позволяет с высокой точностью детектировать малые перемещения до 10-14 м, так как изменение в емкости значительно, хотя и нелинейно (см. выражение (1) и рис. 2, г-д). Данная способность подходит для детектирования перемещений и ускорения и практически используется в микрометрах, акселерометрах, инклинометрах. Линейность при решении многих измерительных задач достигается за счет измерения импеданса, а не емкости (рис. 2, г-д) [4].

На рис. 2: *а* – линейный емкостной датчик расстояния  $d$  (в направлении оси  $Z$ ) с воздушным диэлектриком и постоянной площадью перекрытия  $S$ : 1 – зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 – подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 – зафиксированная печатная плата; 4 – подвижная печатная плата;

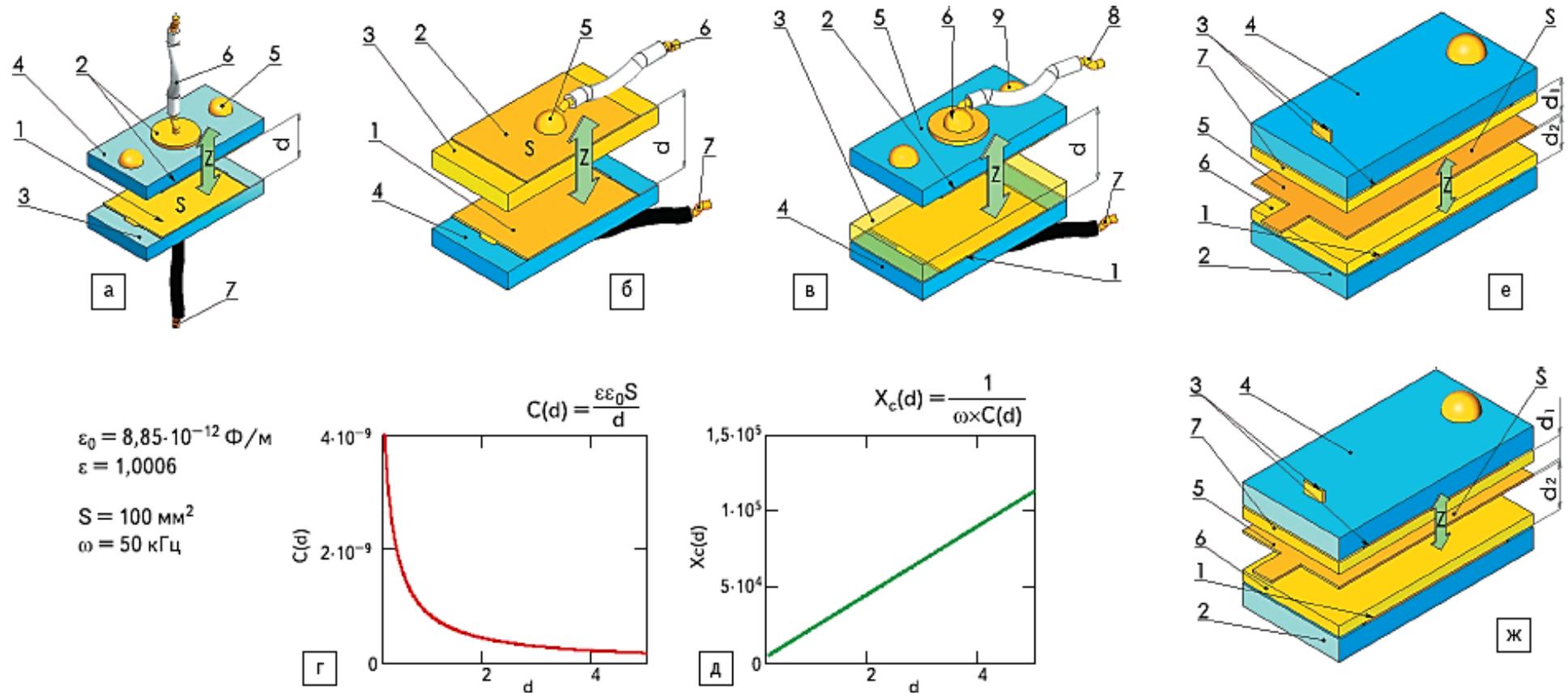


Рис. 2. Иллюстрации конструкций емкостных датчиков, физические принципы которых основаны на изменении емкости при изменении расстояния между обкладками  $C(d)$

5 – пайка обкладки; 6, 7 – терминалы конденсатора; б – линейный емкостной датчик расстояния  $d$  (в направлении оси  $Z$ ) с постоянной площадью перекрытия  $S$  и дополнительным подвижным защитным диэлектрическим слоем: 1 – зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 – подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 – защитный слой диэлектрика; 4 – зафиксированная печатная плата; 5 – пайка обкладки; 6, 7 – терминалы конденсатора;

в – линейный емкостной датчик расстояния  $d$  (в направлении оси  $Z$ ) с постоянной площадью перекрытия  $S$  и фиксированным диэлектрическим слоем: 1 – зафиксированная нижняя обкладка конденсатора; 2 – подвижная верхняя обкладка конденсатора; 3 – фиксированный защитный слой диэлектрика; 4 – зафиксированная печатная плата; 5 – подвижная печатная плата или изолирующий материал; 6 – пайка обкладки и терминалов; 7, 8 – терминалы конденсатора; 9 – пайка обкладки;

г, д – функциональные характеристики датчика расстояния  $d$ : г – изменение емкости; д – изменение импеданса; е, ж – дифференциальный емкостной датчик расстояний  $d_1$  и  $d_2$  (в направлении оси  $Z$ ) 1 – зафиксированная нижняя обкладка; 2 – зафиксированная нижняя печатная плата; 3 – зафиксированная верхняя обкладка; 4 – зафиксированная верхняя печатная плата; 5 – подвижная средняя обкладка, соединяемая с детектируемым объектом; 6 и 7 – фиксированные слои диэлектрика;  $S$  – фиксированная площадь перекрытия обкладок; е – датчик в исходном (нулевом) положении; ж – датчик в смещенном состоянии

Нежелательными являются паразитная поперечная чувствительность к смещениям в направлении оси  $X$  или  $Y$ , чувствительность к наклону, паразитной емкостной связи тыльных сторон обкладок.

При добавлении между двумя фиксированными обкладками третьей подвижной обкладки, например, диафрагмы, достигается дифференциальное соединение двух конденсаторов, что позволяет увеличить чувствительность, амплитуду, улучшить линейность сигнала и обеспечить экранирование (рис. 2, е – ж). Зависимость амплитуды от расстояния  $d$  снижается при наличии схемы обработки соотношения сигналов. Полученная структура датчика с подвижной обкладкой, нагруженной инерционной массой, лежит в основе большинства современных акселерометров.

Из рис. 2, б – в становится понятным, что фиксирование на поверхности обкладки (рис. 2, в) диэлектрического слоя, предотвращающего прилипание

обкладок друг к другу при нагрузках акселерометра выше допустимых пределов – решение, которое способствует также устранению нелинейности, наводимой вследствие неодинакового изменения диэлектрической проницаемости в дифференциальных конденсаторах с подвижным диэлектрическим слоем (рис. 2, б). В отличие от акселерометров, в датчиках положения механическая нагрузка на подвижную обкладку может контролироваться извне, поэтому риск выхода за рабочие пределы датчика менее вероятен. Следовательно, может использоваться только воздушный диэлектрик (рис. 2, а), но в условиях повышенной вибрации или ударов также будет полезен дополнительный диэлектрический слой, как подвижный (тогда зависимость  $\varepsilon(d)$  должна учитываться), так и неподвижный (с  $\varepsilon(d)=0$  при всех значениях  $d$ ).

Высокая чувствительность позволяет использовать и стандартные, и дифференциальные типы датчиков вариации расстояния для измерения малых перемещений, но не позволяет детектировать большие перемещения, поскольку емкость конденсатора с большим расстоянием между обкладками падает до значения, которое сложно измерить, и уровень выходного импеданса значительно увеличивается. Данный тип емкостных устройств подходит для детектирования линейного абсолютного положения, но не актуален для угловых систем.

3. Датчики, в которых происходит перемещение двух параллельных обкладок друг относительно друга, одной подвижной обкладки относительно второй неподвижной или перемещение пластины диэлектрика таким образом, что изменяется рабочая область перекрытия конденсатора  $S$  (рис. 3)[4].

На рис. 3:

а – линейный емкостной датчик перекрытия обкладок  $S$  – расстояний  $x_1$  и  $x_2$  в направлении оси  $X$  (на рис. 3, а показан датчик с  $x \leq X$ ; датчик в исходном состоянии при  $x_1=X$  показан на рис. 1, а): 1 – зафиксированная нижняя обкладка; 2 – подвижная верхняя обкладка конденсатора, отнесенная на постоянное расстояние  $d$ , с максимальной площадью перекрытия с нижней  $S$  и полной длиной перекрытия  $X$ ; 3 – зафиксированный слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ ; 4 – зафиксированная печатная плата; 5 – подвижная печатная плата; 6 – пайка обкладки на плате;  $d$  – постоянное расстояние между обкладками;  $S_1$  – переменная площадь перекрытия обкладок в пределах детектируемого расстояния  $x_1$ ;  $(S-S_1)$  – переменная площадь отсутствия перекрытия обкладок в пределах переменного расстояния  $x_2 = X-x_1$ ;

б, в – функциональные характеристики датчика перекрытия обкладок S: б – изменение емкости; в – изменение импеданса; г, д – линейный датчик расстояний  $x_1$  и  $x_2$  – дифференциальная схема перекрытия обкладок  $S_1$  и  $S_2$  с полным рабочим ходом X (рефлективного типа): 1, 2 – нижние зафиксированные обкладки конденсатора; 3 – верхняя подвижная обкладка, отнесенная на постоянное расстояние d, с площадями перекрытия с нижними  $S_1$  и  $S_2$ , соответственно; 4 – зафиксированный слой диэлектрика (с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ ); 5 – зафиксированная печатная плата; 6 – подвижная печатная плата; г – датчик в исходном (нулевом) положении; д – датчик в смещенном состоянии; е, ж – дифференциальный линейный датчик расстояния  $x_1$  – площади перекрытия обкладок  $S_1$  с полным рабочим ходом X, с воздушным диэлектриком (прерываемого типа): 1, 2 – нижняя и верхняя обкладки, зафиксированные на постоянном расстоянии d, с максимальной площадью перекрытия S и полной длиной перекрытия X; 3 – подвижная обкладка конденсатора, отнесенная от неподвижных обкладок на постоянное расстояние d/2; 4, 5 – зафиксированные печатные платы; 6 – пайка обкладки на плате; е – датчик в исходном состоянии при  $x_1=X$ ; ж – датчик с  $x_1 \leq X$ ;  $S_1$  – переменная площадь перекрытия обкладок в пределах детектируемого расстояния  $x_1$ ;  $(S-S_1)$  – переменная площадь перекрытия обкладок в пределах переменного расстояния  $x_2 = X-x_1$ ; з – угловой емкостной трансивер: 1 – корпус (основание) датчика; 2 – неподвижная печатная плата – трансмиттер; 3 – ротор – печатная плата с емкостным аттенюатором (прерывателем); 4 – неподвижная печатная плата – ресивер; 5 – схема обработки сигнала; 6 – крышка (верхняя часть) датчика; 7 – вращающийся вал; 8 – проводные терминалы датчика; ф – абсолютный сигнал датчика; и – коаксиальный «емкостной LVDT»: 1, 2 – неподвижные дифференциальные обкладки; 3 – подвижная обкладка; 4 – крепежная часть подвижной обкладки для соединения с детектируемым объектом (резьбовый наконечник).

Пропорциональное считывание положения представляет собой метод измерения пропорционального изменения дифференциальных емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , например  $(C_1-C_2)$ ,  $C_1/C_2$  или  $(C_1-C_2)/(C_1+C_2)$ , и выработки в схеме усилителя аналогового выхода напряжения — это позволяет также выполнять радиометричные измерения, когда емкость одного конденсатора является переменной в процессе движения, а второго — фиксированной (полудифференциальный режим).

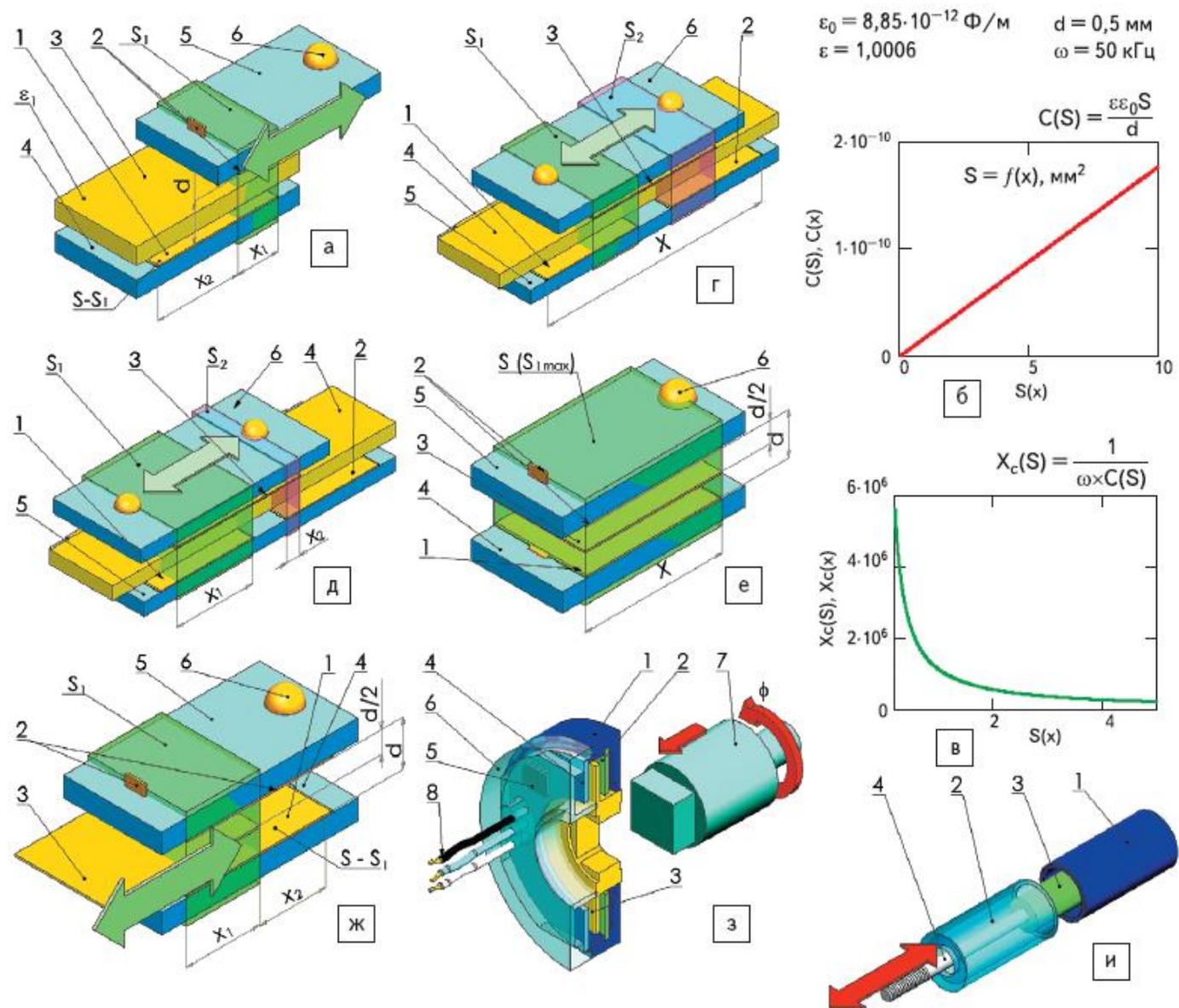


Рис. 3. Иллюстрации конструкций емкостных датчиков, физические принципы которых основаны на изменении емкости при изменении площади перекрытия обкладок  $C(S)$

Анализ соотношения  $C1/C2$  или  $(C1-C2)/(C1+C2)$  в измерительной схеме позволяет уменьшать эффекты влияния температуры и изменений в диэлектрической проницаемости вследствие влажности и (или) давления.

Кроме того, при анализе соотношения емкостей типа  $C1/C2$  измерительная схема с одной переменной емкостью может быть линеаризована типом движения датчика: для получения линейного выхода  $C1$  может быть переменной емкостью конденсатора с перекрытием обкладок ( $C2$  – опорная емкость), либо  $C2$  – переменная емкость конденсатора с вариацией расстояния  $d$  ( $C1$  – опорная емкость).

Для увеличения емкости датчиков (с целью повышения чувствительности и разрешения – детектирования еще меньших перемещений) и уменьшения импеданса подходят методы параллельного включения нескольких или многих конденсаторов (соединение обкладок с одинаковой полярностью). Во многих дифференциальных схемах два конденсатора соединяются последовательно – с чередованием полярностей обкладок – что уменьшает емкость, увеличивает импеданс, но повышает измерительную точность устройств.

Для улучшения точности применяется массив обкладок со схемой обработки, подобной оптическим энкодерам (с демодулятором – счетчиком обкладок для грубого определения положения и интерполяции между обкладками для более точного измерения).

За счет изменения области перекрытия может детектироваться значительное линейное перемещение с соблюдением линейного закона приращения емкости (рис. 3, а–б), а также угловое положение в пределах  $\leq 360^\circ$  (рис. 3, в и 1, г–д). Однако этот тип датчиков чувствителен к зазору между обкладками  $d$  (он должен быть малым (1 мм) и не должен иметь существенных погрешностей значения), к наклону в направлении любой оси и к паразитной емкостной связи тыльных сторон обкладок.

В дифференциальном или полудифференциальном режиме (рис. 3, г–ж) характеристики датчиков с перекрытием улучшаются. Если добавить вторую фиксированную обкладку выше подвижной (рис. 3, е–ж), зависимость от расстояния  $d$  при этом обнуляется. В этой же конфигурации или при размещении двух неподвижных обкладок с одной стороны подвижной обкладки (рис. г–д) уменьшается чувствительность датчика к наклону и обеспечивается экранирование, которое уменьшает паразитную емкостную связь.

## *Погрешности емкостных преобразователей*

К погрешностям ЕИП относятся:

- погрешности, обусловленные зависимостью емкости преобразователя от внешних условий, например температуры окружающей среды;
- погрешность, обусловленная паразитными токами утечки;
- погрешность, обусловленная влиянием паразитных емкостей.

Номинальная емкость ЕИП обычно составляет единицы – сотни пикофарад. На низких частотах сопротивление преобразователя достигает больших значений, что приводит к возникновению погрешности, обусловленной *паразитными токами утечки*. Для уменьшения этой погрешности увеличивают частоту напряжения питания до нескольких килогерц и даже мегагерц.

В ЕИП, кроме собственной емкости преобразователя, присутствуют емкости между электродами и заземленными деталями конструкции, между жилой соединительного кабеля и его заземленным экраном, которые приводят к появлению *погрешности, обусловленной влиянием паразитных емкостей*. Причем параметры кабеля могут изменяться. Для уменьшения этой погрешности измерительную цепь и вторичный прибор располагают вблизи преобразователя. Как следует из вышеизложенного, область применения емкостных преобразователей весьма разнообразна, однако наиболее широко они используются для измерения малых перемещений и величин, легко преобразуемых в перемещение, например, давлений.

*Достоинствами ЕИП* являются:

- принципиальное отсутствие шумов;
- отсутствие самонагрева;
- простота конструкции, малая масса и габариты;
- возможность соответствующим выбором формы подвижного и неподвижного электродов получить заданную функциональную зависимость между изменением емкости и входным линейным или угловым перемещением;
- малая сила притяжения электродов;
- возможность применения как для статических, так и для динамических измерений.

К *недостаткам* емкостных преобразователей можно отнести:

- малую емкость и высокое выходное сопротивление преобразователя;
- зависимость результата измерения от изменения емкости кабеля.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из емкости с диэлектрической жидкостью; штатива; подвижной планки, позволяющей регулировать глубину погружения электродов в жидкость; двух крепежных устройств, посредством которой можно менять расстояние между закрепленными на них электродами; прибора для измерения емкости, набора пластин.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.

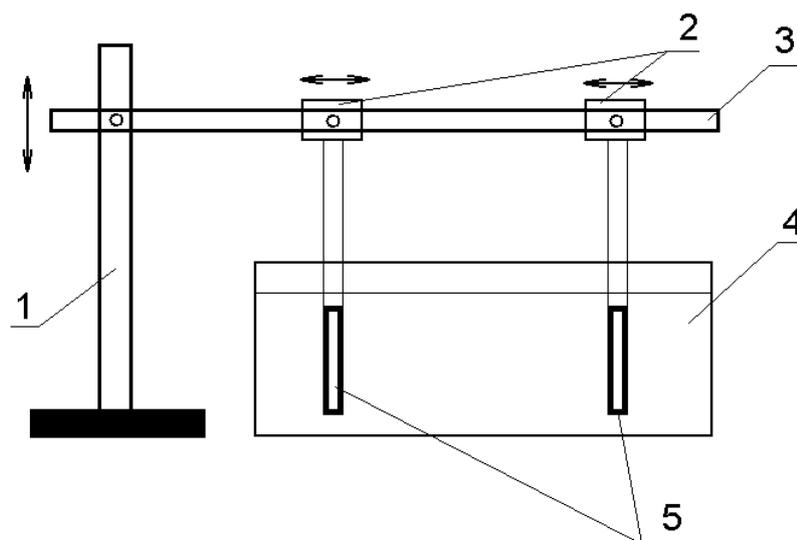


Рис. 2. Схема лабораторной установки: 1 – штатив; 2 – подвижная планка; 3 – крепежные устройства; 4 – емкость с диэлектрической жидкостью; 5 – пластины конденсатора

В качестве жидкости в установке используется трансформаторное масло, обладающее хорошими диэлектрическими свойствами.

В состав установки также входит мультиметр, используемый для измерения емкости.

## Порядок выполнения лабораторной работы

*Емкостной преобразователь линейных перемещений.*

1. Закрепить на установке пластины таким образом, чтобы между ними было расстояние 3 мм.
2. Измерить емкость получившегося воздушного конденсатора.
3. Изменяя расстояние между пластинами, измерить емкость и заполнить табл. 1.

Табл. 1

Расстояние между пластинами, мм	3	6	9	...
Емкость, пФ				

4. По данным таблицы построить график зависимости емкости конденсатора от расстояния между пластинами.

5. Сделать вывод о зависимости емкости конденсатора от расстояния между пластинами.

6. По формуле (1) рассчитать емкость конденсатора для расстояния между пластинами 6 мм.

7. Сравнить расчетное значение емкости с экспериментальным.

8. Рассчитать относительную погрешность измерения по формуле:

$$\gamma = \frac{|C_{\text{э}} - C_{\text{расч}}|}{C_{\text{расч}}} \cdot 100\%$$

*Емкостной преобразователь угловых перемещений.*

1. Закрепить на установке пластины, таким образом, чтобы между ними было расстояние 3 мм и они полностью перекрывали друг друга.

2. Измерить емкость получившегося воздушного конденсатора.

3. Изменяя угол наклона одной из пластин с шагом 20° и измеряя для этих положений значение емкости, заполнить табл. 2.

Табл. 2.

Угол между пластинами, град	20	40	60	...
Емкость, пФ				

4. По данным таблицы построить график зависимости емкости конденсатора от площади перекрытия пластин (угла поворота одной пластины относительно другой).

5. Сделать вывод о зависимости емкости конденсатора от площади перекрытия пластин (угла поворота одной пластины относительно другой).

*Емкостной преобразователь уровня диэлектрической жидкости.*

1. Взять емкость с диэлектрической жидкостью.

2. Опустить пластины конденсатора на глубину 10 мм. Измерить емкость конденсатора.

3. Изменяя глубину погружения пластин конденсатора в жидкость и измеряя емкость, заполнить таблицу 3.

Табл 3.

Глубина погружения пластин, мм	10	20	30	...
Емкость, пФ				

4. По данным таблицы построить график зависимости емкости конденсатора от глубины погружения пластин в диэлектрическую жидкость.

5. Определить значение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрической жидкости.

6. Сделать вывод о зависимости емкости конденсатора от диэлектрической проницаемости диэлектрика находящегося между обкладками конденсатора.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблица, графики и расчетное значение относительной погрешности определения емкости.
5. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Поясните назначение конденсаторов.
2. Поясните устройство и принцип функционирования конденсатора.
3. Поясните термин электроемкости конденсатора.
4. Поясните, от чего зависит электроемкость конденсатора.
5. Поясните принцип действия емкостного преобразователя линейных перемещений.
6. Поясните принцип действия емкостного преобразователя угловых перемещений.
7. Поясните принцип действия емкостного преобразователя уровня диэлектрической жидкости.

### Библиографический список

1. Левшина Е.С., Новицкий А.В. Электрические измерения физических величин : Измерительные преобразователи. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

3. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 11. Емкостные датчики – новые игроки автомобильного рынка [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии. 2006. №4. [http://kit-e.ru/articles/sensor/2006\\_4\\_14.php](http://kit-e.ru/articles/sensor/2006_4_14.php)

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

### Пьезоэлектрический измерительный преобразователь

*Цель лабораторной работы* – изучение принцип функционирования и основных характеристик пьезоэлектрического измерительного преобразователя.

#### Краткие теоретические сведения

Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого в некоторых кристаллах (кварц, турмалин, сегнетовая соль и др.) и текстурных (пьезокерамики: титанат бария, цирконат-титанат свинца, титанат бария свинца и др.).

Сущность *прямого* пьезоэлектрического эффекта состоит в появлении электрических зарядов на гранях пластин, изготовленных из названных материалов, при их механической деформации. Пьезоэффект является обратимым – при приложении к граням упомянутых пластин электрического поля последние деформируются, изменяя свою толщину.

Для пояснения пьезоэлектрического эффекта в кристаллах обычно используют приближенные представления о том, что кристаллическая структура элементарной ячейки кварца ( $\text{SiO}_2$ ) в плоском срезе (в данном случае в плоскости чертежа) можно представить в виде шестиугольника (рис. 1, а), в вершинах которого расположены положительные ионы кремния и отрицательные ионы кислорода. При сжатии кристалла в направлении оси  $x$  (рис. 1, б) с силой  $F$  кристалл деформируется, расстояние между ионами и электродами А и В изменяется, а ионы, расположенные в непосредственной близости от электродов, перемещаются в глубь ячейки. Это вызывает на электродах индуцированные заряды, знак которых совпадает со знаком ближайших к электродам ионов. Такие же по знакам заряды могут индуцироваться на электродах  $a$  и  $b$  и при растяжении рассматриваемой ячейки в направлении, перпендикулярном оси  $x$ .

При растяжении ячейки кристалла кварца вдоль оси  $x$  (рис. 1, в) на электродах возникают заряды противоположного знака. Сжатие ячейки в направлении, перпендикулярном оси  $x$ , приводит к появлению на электродах таких же зарядов, как и при растяжении по оси  $x$ .

Сущность *обратного* пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что приложение электрического поля к пластине из пьезоэлектрика способно вызывать ее механическую деформацию. Действительно, при подаче к электродам разности потенциалов вследствие действия электростатических сил

ионы притягиваются к электродам с противоположными знаками, что создает механическое смещение прилегающей к пластине среды.

Так, приложение к электродам А и В соответственно положительного и отрицательного потенциалов вызывает сжатие ячейки кварца (рис. 1, б) и наоборот (рис. 1, в).

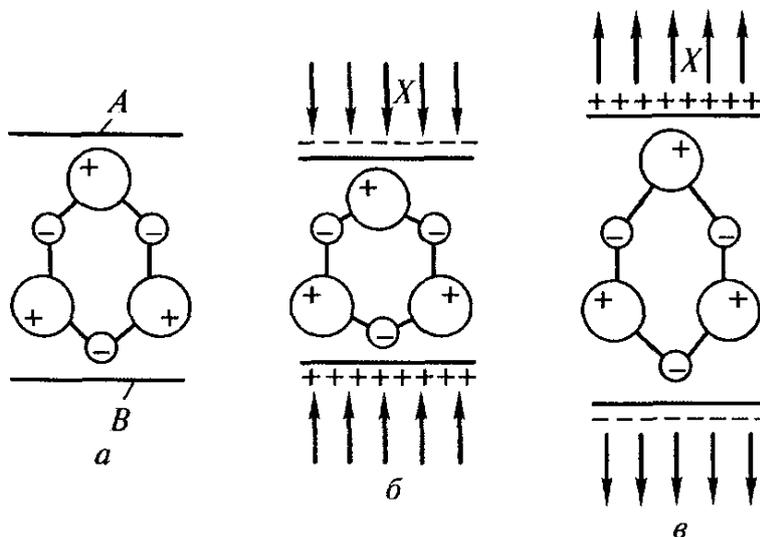


Рис. 1. К пояснению пьезоэлектрического эффекта

Обратный пьезоэлектрический эффект широко используется в технике для создания звуковых и ультразвуковых колебаний в газообразных, жидких и твердых средах.

Изложенные представления о сущности прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов упрощены. На самом деле пьезоэлектрический эффект зависит как от пьезоэлектрических, так и от диэлектрических и механических свойств пьезоматериалов.

У пьезоэлектриков различают три взаимно перпендикулярные оси: электрическую, механическую и оптическую. Появление электрических зарядов в пьезоэлектриках наблюдается при их деформации вдоль электрической и механической осей. Пьезоэффект, вызываемый действием силы вдоль электрической оси, называют продольным, а пьезоэффект, возникающий под действием силы, направленной по механической оси поперечным.

Пьезоэлектрические преобразователи силы конструктивно выполняются в виде одной пластины из пьезоэлектрика, снабженной металлическими обкладками (рис. 2, а), либо (для увеличения чувствительности) в виде набора (двух и более) пьезоэлектрических пластин, разделенных металлическими обкладками (рис. 2, б). Находят применение биморфные пьезоэлектрические

преобразователи (рис.2, в), которые представляют собой две склеенные по всей поверхности пьезоэлектрические пластины, ориентированные так, что при воздействии силы верхняя испытывает растяжение, а нижняя — сжатие.

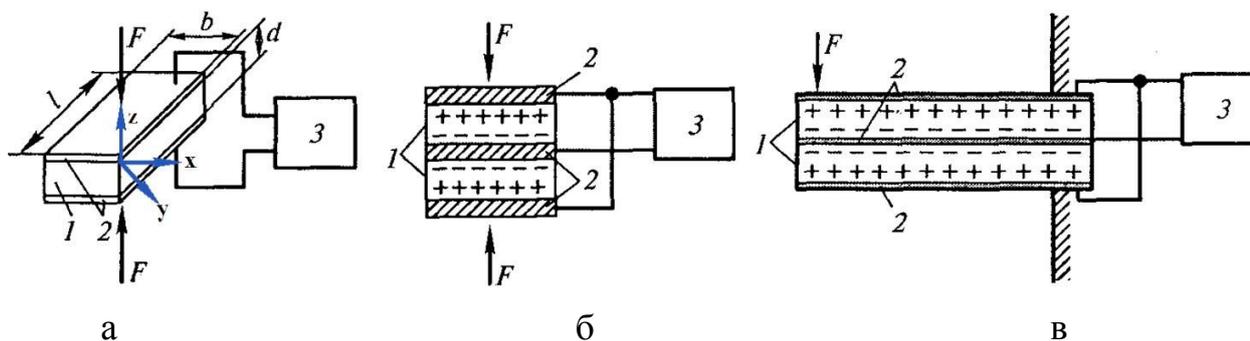


Рис. 2. Схемы пьезоэлектрических преобразователей:  
 1— пьезоэлектрическая пластина; 2— обкладки (электроды);  
 3— усилитель с большим входным сопротивлением

Так как пьезоэлектрический преобразователь (рис.2, г) одновременно является конденсатором, электродвижущая сила  $E$ , возникающая на его обкладках, может быть описана выражением

$$E = k \frac{d}{lb} F,$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от материала пьезоэлектрика, используемого в оси, деформации и его диэлектрической проницаемости;  $l$ ,  $b$  и  $d$  — длина, ширина и толщина пьезоэлектрической пластины;  $F$  — преобразуемая сила.

Выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей мала, а собственное сопротивление значительно ( $10^8 - 10^{10}$  Ом), поэтому необходимо предварительное усиление их сигналов. Для этого используют электронные усилители с большим входным сопротивлением.

Заряды, возникающие на гранях пьезоэлектрических пластин, достаточно быстро (за десятые доли секунды) стекают как через материал самой пластины, так и через сопротивление нагрузки. При этом ЭДС изменяется по закону:

$$E = E_0 e^{-\frac{t}{T}},$$

где  $E_0$  — начальное значение ЭДС, имеющее место в момент приложения силы;  $T$  — постоянная времени, определяемая параметрами пьезоэлектрической пластины и входной цепи электронного усилителя.

Этим определяется тот факт, что пьезоэлектрические преобразователи не представляется возможным использовать для измерения статических сил. Их

применяют для измерений быстроизменяющихся во времени нагрузок. Погрешность пьезоэлектрических преобразователей составляет  $\pm(0,5-1,0) \%$ .

Пьезоэлектрический эффект является обратимым явлением. Т.е. при приложении к кристаллу электрического напряжения он начинает деформироваться.

Пьезоэлектрический эффект можно оценить через вектор поляризации  $\bar{P}$ :

$$\bar{P} = \bar{P}_{xx} + \bar{P}_{yy} + \bar{P}_{zz}, \quad (1)$$

где  $x, y, z$  координатные оси, связанные с кристаллом.

Слагаемые этого выражения определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{xx} &= d_{11}\bar{\sigma}_{xx} + d_{12}\bar{\sigma}_{yy} + d_{13}\bar{\sigma}_{zz} \\ \bar{P}_{yy} &= d_{21}\bar{\sigma}_{xx} + d_{22}\bar{\sigma}_{yy} + d_{23}\bar{\sigma}_{zz}, \\ \bar{P}_{zz} &= d_{31}\bar{\sigma}_{xx} + d_{32}\bar{\sigma}_{yy} + d_{33}\bar{\sigma}_{zz} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma$  - осевое механическое напряжение,  $d$  - соответствующие пьезоэлектрические коэффициенты.

Величина заряда, генерируемого на поверхности пьезоэлектрического кристалла, пропорциональна силе, приложенной например, вдоль оси  $x$ :

$$Q_x = d_{11}F_x \quad (3)$$

Кристалл, с нанесенным на него электродами (рис. 2) представляет собой конденсатор, обладающий емкостью  $C$ . Напряжение на этом конденсаторе:

$$U = \frac{Q_x}{C} = \frac{d_{11}}{C} F_x. \quad (4)$$

В реальности необходимо учитывать емкости кабеля и входную емкость измерительного устройства.

Таким образом, измеряя напряжение на выходе пьезоэлектрического преобразователя можно судить о приложенной силе (давлении, механическом напряжении, деформации).

### Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят: электронный осциллограф, вибростенд, вибропреобразователь ДН-3.

В лабораторной установке применяется пьезоэлектрический вибропреобразователь ДН-3, общий вид которого приведен на рис.3.

Вибропреобразователь состоит из основания 1, пьезоэлементов 2 инерционной массы 5, втулки 6, контакта 7 для снятия электрического потенциала. Статическая нагрузка на пьезоэлементы осуществляется гайкой 3.

Сверху вибропреобразователь закрывается крышкой 4. Принцип работы вибропреобразователя основан на прямом пьезоэффекте.

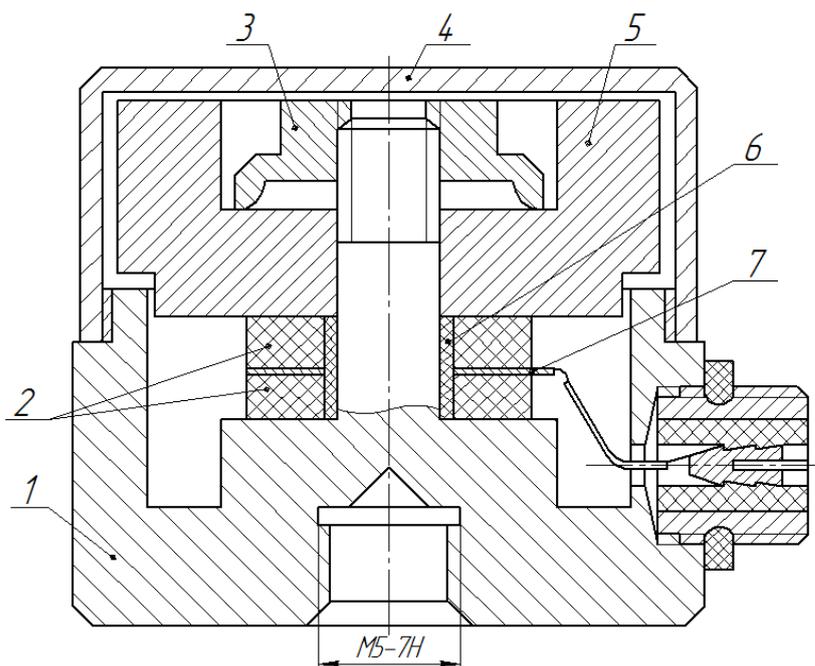


Рис. 3. Чертеж общего вида преобразователя ДН-3:

- 1 – основание; 2 – пьезоэлементы; 3-гайка пружинная; 4 – крышка;  
5 – масса инерционная; 6 – втулка; 7 – контакт

При воздействии механических колебаний на основание вибропреобразователя с ускорением  $a$  инерционная масса  $m$  испытывает действие силы  $P$ :

$$P = m \cdot a$$

Пьезоэлементы вибропреобразователя подвергаются деформации сжатия, в результате чего на гранях пьезоэлементов возникают электрические заряды, пропорциональные действующему ускорению.

На рис. 4 приведен внешний вид вибропреобразователя ДН-3, его усилителя заряда, блока питания и электронного осциллографа.

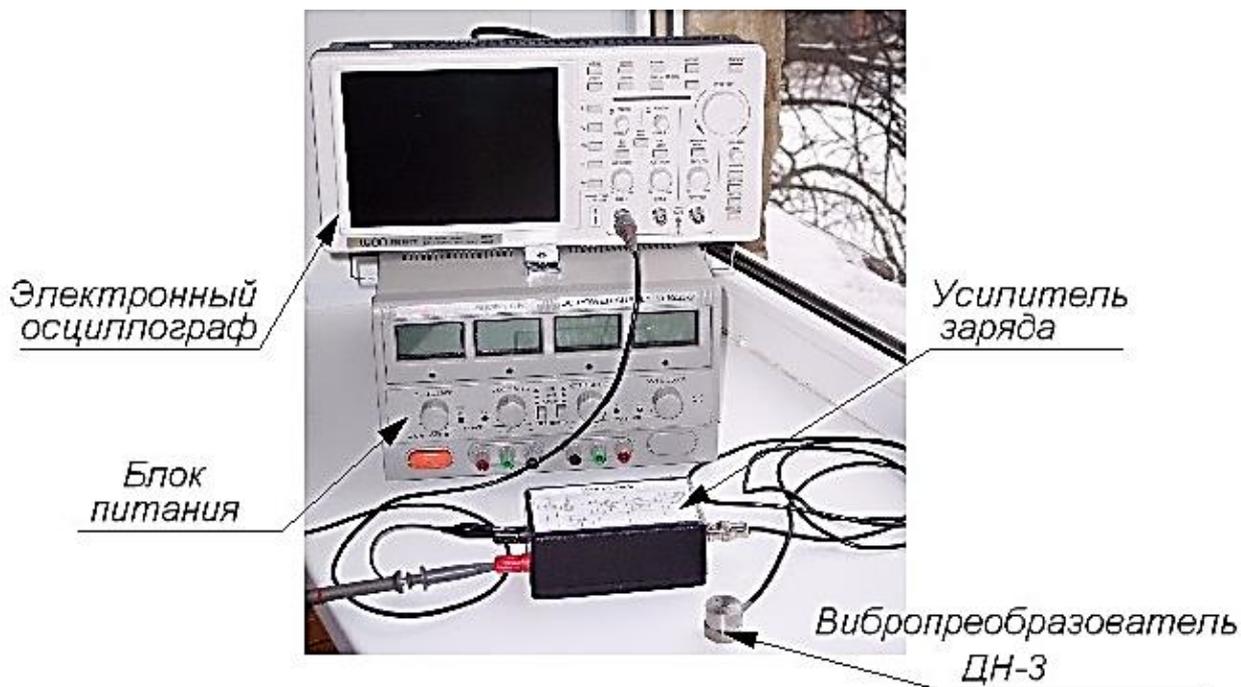


Рис. 4. Внешний вид элементов лабораторной установки

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Собрать лабораторную установку.
2. Проверить работоспособность пьезопреобразователя.
3. Установить пьезопреобразователь на стол вибрационного стенда.
4. Задавая различные амплитуды и частоты вибраций необходимо измерять выходной сигнал пьезопреобразователя. Пример выходного сигнала показан на рис. 5.



Рис. 5. Пример осциллограммы выходного сигнала

5. Рассчитать амплитуду виброускорения, виброскорость и перемещения для каждой строчки таблицы.

Амплитуда сигнала преобразователя, мВ	Вибро-ускорение, м/с <sup>2</sup>	Виброскорость м/с	Перемещение, м
...	...	...	...

6. Для равных ускорений построить график зависимости амплитуды выходного сигнала от частоты вибрации.

7. Рассчитать коэффициент передачи для каждой частоты.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблицы, графики, измеренные и вычисленные параметры пьезопреобразователя.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните физические основы функционирования пьезопреобразователя.
2. Поясните область применения достоинства и недостатки пьезопреобразователя.
3. Поясните метод определения полосы пропускания пьезопреобразователя.
4. Поясните метод определения коэффициента передачи пьезопреобразователя.
5. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.

### **Библиографический список**

1. Левшина Е.С., Новицкий А.В. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Илясов Л.В. Биомедицинская измерительная техника: Учеб. пособие для вузов/Л.В. Илясов. — М.: Высш. шк., 2007. – 342 с.

*Учебное издание*

АНТОНЕНКО Светлана Валентиновна  
БОГДАНОВ Максим Борисович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

**Учебно-методическое пособие**

**Часть 1**

**Полупроводниковые, резистивные, емкостные и пьезоэлектрические  
измерительные преобразователи**

**Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тульский государственный университет»**

**Антоненко С.В., Богданов М.Б.**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

**Учебно-методическое пособие  
Часть 2  
Элементы навигационных систем**

**Издательство ТулГУ  
2013**

УДК 681.2.082  
А 72  
ББК 32.842-5я73

**Антоненко С.В., Богданов М.Б.** Физические основы получения информации. Часть 2. Элементы навигационных систем: учебно-методическое пособие. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – 75 с.

Приводятся методические указания для проведения лабораторных работ по дисциплине «Физические основы получения информации» с целью практического ознакомления студентов с физическими эффектами, используемыми для получения измерительной информации.

Предназначено для подготовки бакалавров по направлению 200100 «Приборостроение».

Ил. 46. Табл. 10. Библиограф.: 19 назв.

Печатается по решению библиотечно-издательского совета Тульского государственного университета.

Рецензенты:

доцент кафедры «Приборы управления» ТулГУ, к.т.н. Погорелов М.Г.

доцент кафедры радиоэлектроники ТулГУ, к.т.н. Лаппо А.Ю.

ISBN

© Антоненко С.В., Богданов М.Б., 2013

© Издательство ТулГУ, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. Измерение осевого момента инерции твердых тел .	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Исследование принципа действия и свойств электромагнита .	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Трехстепенной гироскоп. ....	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Микромеханический датчик угловой скорости .	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. Микромеханический акселерометр. ....	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. Измерение угловой скорости вращения Земли с помощью волоконно-оптического гироскопа .	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. Изучение принципа функционирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем. ....	57
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. Изучение физических основ спутниковой радионавигационной системы .	63

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы получения информации» является базовой для подготовки бакалавров направлению 200100 «Приборостроение». Данное учебно-методическое пособие предназначено для практического ознакомления студентов с физическими эффектами, лежащими в основе измерительных преобразований и средств их реализации. Также в пособии изложены принципы работы датчиков и методы анализа и синтеза физических явлений для создания различных средств измерения, диагностики и контроля.

Учебно-методическое пособие состоит из двух частей в соответствии с количеством семестров, отведенных на изучение данной дисциплины.

*Часть 1* данного пособия посвящена изучению физических основ и принципа работы полупроводниковых, резистивных, емкостных и пьезоэлектрических измерительных преобразователей; *часть 2* – элементов навигационных систем.

Освоение лабораторных работ, приведенных в пособии, позволит студентам приобрести практические навыки в области получения информации с помощью различных измерительных систем, а также навыки для осуществления грамотного инженерного выбора вида преобразователей при разработке конкретного измерительного устройства или автоматизированного комплекса.

*Авторы выражают благодарность:* заведующему лабораторией кафедры «Приборы и биотехнические системы» Федосову Алексею Ивановичу и лаборанту Варламову Сергею Ивановичу за помощь в изготовлении лабораторных установок, а также студентам группы 120261 Андриюшину Антону, Галкину Александру, Гинцбургу Денису, Кирьянову Александру, Костомарову Дмитрию, Молкерову Максиму, Назаренко Дмитрию, Нестерову Алексею, Пронюшкину Илье, Сафронову Алексею, Соцкову Вадиму, Субботину Денису, Тимошину Сергею, Федько Наталье, Шестопалову Даниилу, Чайке Евгении и аспиранту Данилову Максиму за разработку и изготовление лабораторных установок.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## Измерение осевого момента инерции твердых тел

*Цель лабораторной работы* – освоение экспериментального метода определения момента инерции тел, имеющих сложную геометрическую форму и получение практических навыков применения данного метода.

### Краткие теоретические сведения

Моментом инерции материальной точки относительно некоторой оси называется произведение массы  $m$  этой точки на квадрат её расстояния  $h$  до этой оси, т.е. величина  $mh^2$ .

Моментом инерции материальной системы (тела) относительно оси называется сумма моментов инерции всех точек системы (тела) относительно той же оси.

Так, например, момент инерции тела относительно некоторой оси АВ равен:

$$J_{AB} = \sum_{k=1}^n m_k h_{kAB}^2, \quad (1)$$

где  $J_{AB}$  – момент инерции тела относительно оси АВ (осевой момент инерции),  $k$  – номер точки тела,  $n$  – количество точек тела,  $m_k$  – масса  $k$ -ой точки тела,  $h_{kAB}$  – расстояние  $k$ -ой точки тела до оси АВ.

При непрерывном распределении массы в теле сумма (1) переход в интеграл:

$$J_{AB} = \int h_{AB}^2 dm. \quad (2)$$

Размерность момента инерции в системе СИ равна  $\text{кгм}^2$ .

По определению момент инерции представляет собой положительную величину. В нуль момент инерции может обратиться только в одном частном случае, когда все точки системы расположены на оси, относительно которой вычисляется момент инерции.

Моменты инерции тела относительно трех взаимно перпендикулярных осей обладают важным свойством: момент инерции относительно любой из осей всегда меньше суммы моментов инерции относительно двух других осей, но больше их разности.

В табл. 1 приведены формулы для расчета момента инерции простых однородных тел. В табл. 2 приведены значения плотности некоторых металлов и сплавов.

Табл.1. Формулы для расчета момента инерции простых однородных тел

Тело	Относительно оси	Момент инерции
Тонкий стержень длины $l$	перпендикулярной к стержню и проходящей через его середину	$\frac{ml^2}{12}$
Круглый диск или цилиндр радиуса $r$	перпендикулярной к плоскости диска и проходящей через его центр	$\frac{mr^2}{2}$
Шар радиуса $r$	совпадающей с диаметром	$0,4mr^2$
Тонкая труба или кольцо радиуса $r$	совпадающей с осью трубы	$mr^2$
Круглый цилиндр длины $l$ и радиуса $r$	перпендикулярной к оси цилиндра и проходящей через его середину	$m\left(\frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4}\right)$

Табл. 2. Значения плотности некоторых металлов и сплавов

Вещество	Плотность $\rho \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$	Вещество	Плотность $\rho \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$
Алюминий	2,7	Медь	8,93
Бронза	8,7-8,9	Никель	8,9
Вольфрам	19,34	Олово	7,29
Дюралюминий	2,79	Свинец	11,35
Железо	7,88	Серебро	10,5
Золото	19,31	Сталь	7,7-7,9
Латунь	8,4-8,7	Чугун	7,0

Определение момента инерции тела сложной формы – задача сложная и трудоемкая. Как правило данную задачу решают путем разбиения тела на элементарные простые объемы (диск, стержень, кольцо, шар и т.п.), рассчитывают их моменты инерции по соответствующим формулам (табл. 1), а затем суммируют по формуле (1) полученные моменты инерции. Точность определения момента инерции в этом случае зависит от количества

элементарных объемов, на которые разбивается тело, точности измерений параметров этих объемов (длина, ширина, радиус и т.п.). Погрешность данного метода для сложных в геометрическом плане тел, как правило, значительна и может превышать величины 20%. Поэтому часто применяется экспериментальный метод определения момента инерции.

Рассмотри крутильные колебания вокруг оси  $OC$  диска посаженного на торсион (упругий стержень, работающий на кручение), второй конец которого жестко закреплен в корпусе (рис. 1). При повороте диска на малый угол  $\varphi$  возникает момент восстанавливающей силы, который в области упругой деформации торсиона пропорционален углу поворота  $\varphi$ :

$$M_B = -k\varphi, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент угловой жесткости упругого элемента, т.е. момент который создал бы упругий элемент с линейной характеристикой при  $\varphi = 1$  рад.



Рис. 1. К выводу уравнения крутильных колебаний

Если пренебречь моментом инерции торсиона, то момент сил инерции крутильного маятника:

$$M_{и} = -J\ddot{\varphi}, \quad (4)$$

где  $J$  – момент инерции диска вокруг оси  $OC$  динамической симметрии.

Пренебрегая моментом сопротивления колебаниям (демпфирования) уравнения колебаний диска можно записать в виде:

$$J\ddot{\varphi} = -k\varphi. \quad (5)$$

Поделив на коэффициент при старшей производной получим:

$$\ddot{\varphi} + \frac{k}{J}\varphi = 0. \quad (6)$$

Перепишем последнее уравнение в виде:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0, \quad (7)$$

где  $\omega_0$  – частота собственных незатухающих колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}}. \quad (8)$$

Период собственных колебаний равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}}. \quad (9)$$

При определении момента инерции тела способом крутильных колебаний тело подвешивают на торсионе (упругом стержне или струне), так чтобы центр масс тела лежал на продолжении оси стержня (рис. 2). Закрутив стержень, жестко связанный с телом, на малый угол  $\varphi$ , измеряют период колебания системы  $T$ .

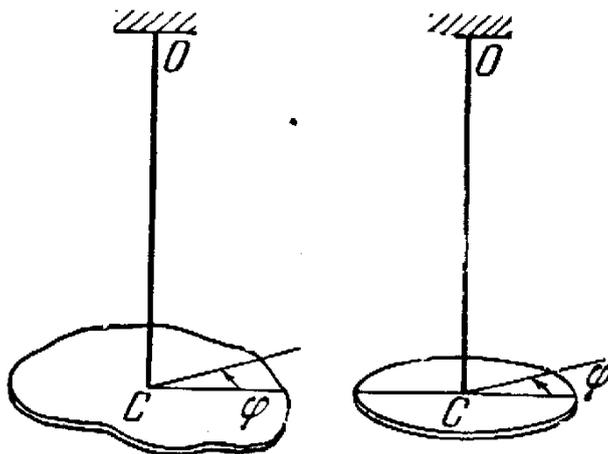


Рис. 2. К пояснению экспериментального метода определения момента инерции тела

Затем на тот же стержень подвешивают тело (например, диск), момент инерции которого относительно оси  $OC$  известен и равен  $J'$ , и измеряют период колебаний  $T'$ . Этот период колебаний определяется формулой:

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{J'}{k}}. \quad (10)$$

Исключив из уравнений (9) и (10) неизвестный параметр  $k$  получим формулу для определения момента инерции

$$J = J' \left( \frac{T}{T'} \right)^2. \quad (11)$$

Таким образом, полученные математические выражения позволяют экспериментальным методом определить момент инерции любого твердого тела.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой крутильный маятник (рис. 3). В качестве торсиона используется стальная струна.

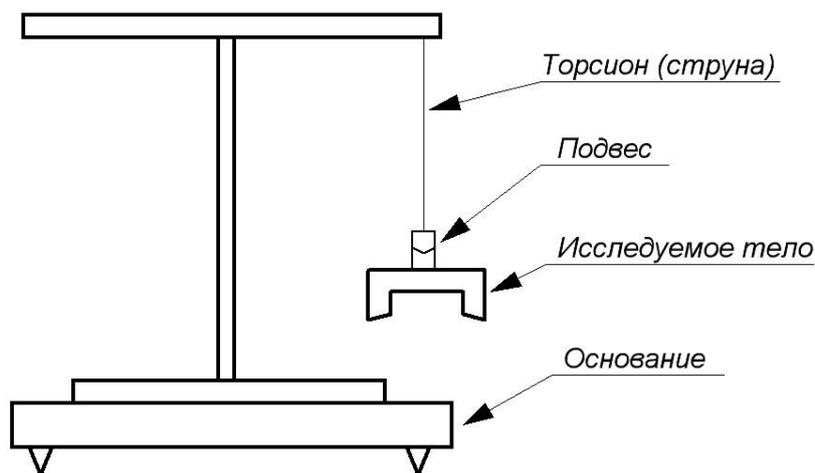


Рис. 3. Схема лабораторной установки

К установке прилагается: 1 алюминиевый диск, 1 латунный диск и исследуемое тело, которым является рамка гироскопа (рис. 4).

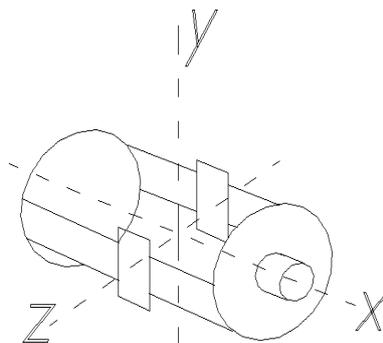


Рис. 4. Схема рамки гироскопа, момент инерции которой необходимо определить экспериментально

### Порядок выполнения лабораторной работы

*Определение погрешностей экспериментального метода измерения момента инерции.*

1. По формуле  $\frac{m_{\text{лат}} r_{\text{лат}}^2}{2}$  (где  $m_{\text{лат}}$ ,  $r_{\text{лат}}$  масса и радиус диска) рассчитать момент инерции  $J_{\text{лат}}$  латунного диска. Для определения массы найти объем диска  $V_{\text{лат}} = \pi r_{\text{лат}}^2 h_{\text{лат}}$  (где  $h_{\text{лат}}$  – высота диска). Тогда  $m_{\text{лат}} = V_{\text{лат}} \rho_{\text{лат}}$  (где  $\rho_{\text{лат}}$  – плотность латуни (см. табличные данные)).

2. Подвесить латунный диск на струне и измерить период крутильных колебаний  $T_{\text{лат}}$ . При закручивании отклонять диск на угол  $\varphi \leq 15^\circ$ .

3. Подвесить на струне алюминиевый диск и измерить период крутильных колебаний  $T_{\text{ал}}$ .

4. По формуле  $J_{\text{ал}}^{\text{экс}} = J_{\text{лат}} \left( \frac{T_{\text{ал}}}{T_{\text{лат}}} \right)^2$  рассчитать экспериментальное значение момента инерции алюминиевого диска.

5. По формуле  $\frac{m_{\text{ал}} r_{\text{ал}}^2}{2}$  рассчитать действительный момент инерции алюминиевого диска  $J_{\text{ал}}$ .

6. Рассчитать абсолютную  $(J_{\text{ал}} - J_{\text{ал}}^{\text{экс}})$  и относительную  $\frac{(J_{\text{ал}} - J_{\text{ал}}^{\text{экс}})}{J_{\text{ал}}} 100\%$  погрешности экспериментального определения момента инерции алюминиевого диска.

7. По формуле  $J_{\text{лат}}^{\text{экс}} = J_{\text{ал}} \left( \frac{T_{\text{лат}}}{T_{\text{ал}}} \right)^2$  рассчитать экспериментальное значение момента инерции латунного диска.

8. Рассчитать абсолютную  $(J_{\text{лат}} - J_{\text{лат}}^{\text{экс}})$  и относительную  $\frac{(J_{\text{лат}} - J_{\text{лат}}^{\text{экс}})}{J_{\text{лат}}} 100\%$  погрешности экспериментального определения момента инерции латунного диска.

*Измерение моментов инерции рамки гиротакметра.*

1. Подвесить рамки гиротакметра на струне, при этом продольная ось струны должна совпадать с продольной осью рамки  $Ox$ .

2. Измерить период крутильных колебаний  $T_p^x$ .

3. По формуле  $J_p^x = J_{ал} \left( \frac{T_p^x}{T_{ал}} \right)^2$  рассчитать момент инерции рамки

относительно оси Ох.

4. Повторить операции, при этом подвесить рамку на струне так, что бы продольная ось струны совпадала с осью Oz рамки, измерить  $T_p^z$  и рассчитать  $J_p^z$  - момент инерции рамки гиротаксметра относительно оси Oz.

5. Подвесить рамку гиротаксметра на струне так, что бы продольная ось струны совпадала бы с осью Oy. Для этого в местах посадки осей ротора закрепить стальной стержень.

6. Измерить период колебаний системы  $T_{p+ст}^y$ .

7. По формуле  $J_{cm}^y = m_{cm} \left( \frac{l_{cm}^2}{12} + \frac{r_{cm}^2}{4} \right)$  (где  $l_{ст}$  - длина,  $m_{ст}$  - масса и  $r_{ст}$  -

радиус стержня, рассчитать момент инерции стального стержня относительно оси Oy.

8. По формуле  $J_{p+cm}^y = J_{ал} \left( \frac{T_{p+cm}^y}{T_{ал}} \right)^2$  рассчитать момент инерции рамки со

стержнем относительно оси Oy.

9. По формуле  $J_p^y = J_{p+cm}^y - J_{cm}^y$  рассчитать момент инерции рамки относительно оси Oy.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты определения погрешностей метода.
5. Результаты измерения моментов инерции рамки гиротаксметра относительно различных осей.
6. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните понятие момента инерции.
2. Запишите формулы для расчета момента инерции простых однородных тел.
3. Выведите уравнение для определения момента инерции твердого тела экспериментальным путем.
4. Поясните, каким путем можно определить погрешность экспериментального метода определения момента инерции твердого тела.
5. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.
6. Поясните и покажите на лабораторной установке каким образом можно определить момент инерции рамки гирихтометра относительно оси  $Ox$ .
7. Поясните и покажите на лабораторной установке каким образом можно определить момент инерции рамки гирихтометра относительно оси  $Oy$ .
8. Поясните и покажите на лабораторной установке каким образом можно определить момент инерции рамки гирихтометра относительно оси  $Oz$ .

### **Библиографический список**

1. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Том 2. Динамика. – М: Наука. 1977. – 464 с.
2. Савельев В.В. Теория колебаний: колебания осцилляторов с одной степенью свободы. Учебное пособие. – Тула: ТулГУ. 1998. – 159 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Исследование принципа действия и свойств электромагнита

*Цель лабораторной работы* – исследовать принцип действия и основные свойства электромагнита.

#### Краткие теоретические сведения

В приборах различного назначения широко применяются электромагнитные механизмы – устройства, работа которых основана на взаимодействии ферромагнитного подвижного элемента с магнитным полем, создаваемым намагничивающей обмоткой. Электромагнитный механизм состоит из двух основных узлов: электромагнита (ЭМ) и исполнительного механизма (механическая часть). Принцип работы заключается в преобразовании электромагнитной энергии ЭМ в механическую энергию исполнительного механизма.

На рис. 1 изображен простейший ЭМ, состоящий из двух основных элементов: двух обмоток и магнитной цепи. Обмотки (одна, две или три) служат для создания магнитного потока, а магнитная цепь – для его проведения. Магнитная цепь – это совокупность всех элементов, через которые замыкается магнитный поток. Она содержит воздушные зазоры и магнитопровод. Последний состоит из сердечников 1 (одного или нескольких), на которые насаживаются обмотки 2, подвижного элемента – якоря 3 и ярма 4 – участка магнитопровода, соединяющего якорь и сердечник или сердечники между собой.

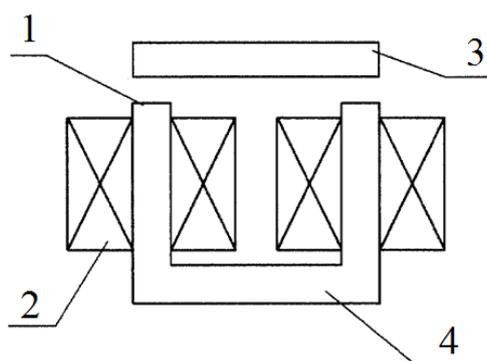


Рис. 1. Схема электромагнита: 1 – сердечники, 2 – обмотки, 3 – якорь, 4 – ярмо

Магнитные поля представляют с помощью картин поля, полученных, например, ориентированным расположением в нем железных опилок. Вид картин поля позволяет ассоциировать магнитное поле с некоторым «застывшим» потоком жидкости. Говоря о движении жидкости, вводят понятие

потока, который определяется количеством жидкости, протекающим через поверхность, нормальную к направлению движения жидкости, в единицу времени, а так же плотности этого потока, которая равна потоку, проходящему через единичную площадку. Для характеристики магнитного поля вводят аналогичные понятия потока  $\Phi$  [Вб] и его интенсивности или плотности  $B$  [Тл]. В соответствии с определением:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поверхности, через которую проходит поток  $\Phi$ .

В качестве основных величин магнитного поля используют индукцию  $B$  и абсолютную магнитную проницаемость  $\mu$  [Г/м]. Для удобства выполнения расчетов в дополнение к основным величинам вводят вспомогательную величину – напряженность поля  $H$  [А/м], не давая ей физического толкования:

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (2)$$

где  $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [Г/м] – магнитная постоянная.

Порядок величин для ЭМ с магнитной цепью из магнитомягких материалов: для  $H$  – сотни [А/м], для  $B$  от сотых долей до 2 [Тл].

Одной из основных характеристик ЭМ является сила притяжения якоря  $F$  [Н]. Для ЭМ, у которых магнитное поле в рабочем зазоре нормально к поверхности якоря, равномерно распределено по этой поверхности, магнитопровод не насыщен, поток рассеивания незначителен выражение для  $F$  может быть представлено в виде (формула Максвелла):

$$F = \frac{B_{\delta}^2 S_p}{2\mu_0}, \quad (3)$$

где  $S_p$  – площадь одного полюса,  $B_{\delta}$  – индукция в зазоре между полюсом и якорем.

Аналитический расчет магнитных цепей – сложная и трудоемкая задача. Поэтому для упрощения вычислений используют схемы замещения магнитных цепей электрическими, которые рассчитывают с использованием основных законов электрических цепей. Используют следующие замены: силу тока  $I$  заменяют магнитным потоком  $\Phi$ , напряжение  $U$  – магнитодвижущей силой  $D$  [А], а электрическое сопротивление  $R$  – магнитным сопротивлением  $R_m$  [1/Г].

Магнитодвижущую силу вычисляют по формуле:

$$D = Iw, \quad (4)$$

где  $I$  – сила тока в обмотке,  $w$  – количество витков обмотки.

Магнитные сопротивления элемента цепи и воздушного зазора между полюсом и якорем вычисляют соответственно по формулам:

$$\text{для элемента цепи} \quad R_m = \frac{L}{\mu S}, \quad (5)$$

$$\text{для воздушного зазора} \quad R_m = \frac{\delta}{S_p} \mu_0, \quad (6)$$

где  $S, L, \mu$  – соответственно длина, сечение и магнитная проницаемость участка цепи;  $\delta, S_p, \mu_0$  – соответственно протяженность воздушного зазора, площадь полюса и магнитная постоянная.

Упрощенная схема замещения для ЭМ (без учета вредных потоков и в предположении идентичности плеч магнитопровода), изображенного на рис. 1, имеет вид, изображенный на рис. 2.

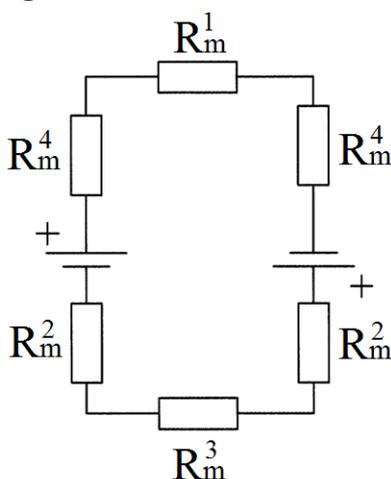


Рис. 2. Упрощенная схема замещения ЭМ клапанного типа:  $R_m^1$  – магнитное сопротивление якоря,  $R_m^2$  – магнитное сопротивление сердечника,  $R_m^3$  – магнитное сопротивление ярма,  $R_m^4$  – магнитное сопротивление воздушного зазора

Закон Ома для такой цепи имеет вид:

$$\Phi = \frac{2D}{R_m^1 + 2R_m^2 + R_m^3 + 2R_m^4}. \quad (7)$$

### Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3. Управление работой электромагнита осуществляется изменением протекающего по

обмоткам тока, который измеряется с помощью амперметра.

В ходе проведения экспериментов в качестве якоря ЭМ используются пластины, изготовленные из различных металлов: №1 – сталь ЭП 562, №2 – сталь 30, №3 – никель, №4 – феррит.

Характеристики электромагнита, используемого в лабораторной установке: количество витков одной обмотки  $w=250$ ; площадь одного полюса  $S_p = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ .

На рис. 4 показана схема соединений лабораторной установки.

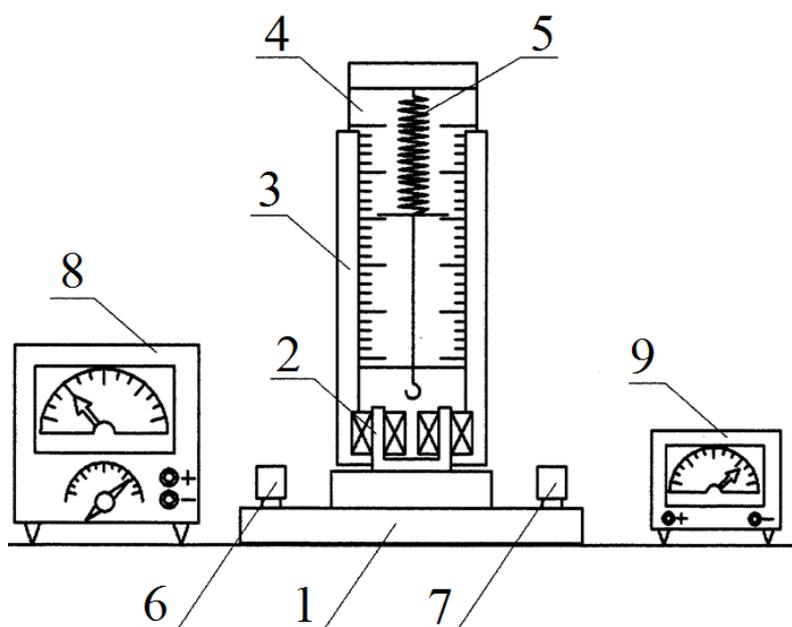


Рис. 3. Схема лабораторной установки: 1 – основание, 2 – электромагнит, 3 – направляющая, 4 – шкала, 5 – пружина, 6, 7 – клеммы для подключения источника питания и амперметра, 8 – источник питания, 9 – амперметр

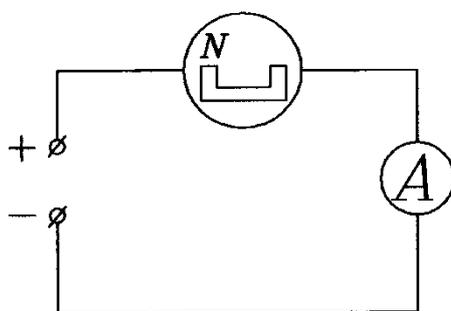


Рис. 4. Схема соединений лабораторной установки

### Порядок проведения лабораторной работы

1. Ознакомится с теоретической частью работы и описанием лабораторной установки.

2. В соответствии с рисунком 4 подключить источник электропитания (блок питания со встроенным стабилизатором тока Б5-45) и амперметр.

*Изучение свойств электромагнита при отсутствии воздушного зазора между полюсами и якорем*

3. Установить на полюсы магнита пластину №1.

4. Установить на блоке питания напряжение 3,5 В и ток 10 мА.

5. Медленно перемещая шкалу динамометра по направляющим вверх замерить силу отрыва:

$$F_{\text{отр}} = (F - P),$$

где  $F$  – сила притяжения пластины к полюсам магнита,  $P$  – вес пластины.

6. Изменяя дискретно с помощью блока электропитания ток в цепи на 10 мА повторить пункты 4 и 5. Величину тока контролировать с помощью амперметра.

**Внимание!** Величина тока в цепи не должна превышать 250 мА.

Результаты измерений занести в таблицу:

Пластина	Ток в цепи, I, мА	10 мА	20 мА	...	250 мА
№1	Сила притяжения, F, Н	$F_1$	$F_2$	...	$F_{25}$

7. Поочередно устанавливая на полюсы магнита пластины №2, №3 и №4 повторить пункты 4-6.

8. Отключить блок электропитания.

9. Используя экспериментальные данные построить четыре графика функции силы притяжения якоря от тока в обмотке  $F = f_1(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин.

10. Используя зависимость (3) и экспериментальные данные построить четыре графика функции индукции от тока в обмотке  $B_{\delta} = f_2(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин.

11. Используя зависимость (1) (принять  $B = B_{\delta}$  и  $S = S_p$ ) и экспериментальные данные построить четыре графика функции магнитного потока в цепи от тока в обмотке  $\Phi = f_3(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин.

12. Используя зависимости (4), (7) и экспериментальные данные построить четыре графика функции магнитного сопротивления цепи от тока в

обмотке  $(R_m^1 + 2R_m^2 + R_m^3 + 2R_m^4) = f_4(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин.

*Изучение свойств электромагнита при наличии воздушного зазора между полюсами и якорем*

13. Повторить пункты 3-12 при наличии листа бумаги (для организации малого воздушного зазора) между полюсами ЭМ и якорем.

14. По результатам выполнения сделать выводы по лабораторной работе и оформить отчет.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: четыре графика функции силы притяжения якоря от тока в обмотке  $F = f_1(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин, четыре графика функции индукции от тока в обмотке  $B_\delta = f_2(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин, четыре графика функции магнитного потока в цепи от тока в обмотке  $\Phi = f_3(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин, четыре графика функции магнитного сопротивления цепи от тока в обмотке  $(R_m^1 + 2R_m^2 + R_m^3 + 2R_m^4) = f_4(I)$  для ЭМ с каждой из четырех пластин, а также аналогичные графики для экспериментов, проведенных при наличии малого воздушного зазора.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные части и опишите принцип функционирования ЭМ механизма.
2. Начертите и поясните упрощенную схему замещения ЭМ клапанного типа.
3. Запишите и поясните основные законы магнитной цепи: формула Максвелла, формулы для магнитодвижущей силы и магнитного сопротивления, закон Ома для магнитной цепи.
4. Назовите основные элементы лабораторной установки.

5. Поясните вид экспериментально полученных графиков.

### **Библиографический список**

1. Элементы приборных устройств: Курсовое проектирование. Учебное пособие для вузов. В 2-х ч. Ч.1. Расчеты / Н.П. Нестерова, А.П. Коваленко, О.Ф. Тищенко и др.; Под ред. О.Ф. Тищенко. – М.: Высшая школа, 1978. – 328с.

2. Элементы приборных устройств: Учебное пособие для вузов. В 2-х ч. Ч.2. Приводы, преобразователи, исполнительные устройства / О.Ф. Тищенко, Л.Т. Киселев и др.; Под ред. О.Ф. Тищенко. – М.: Высшая школа, 1982. – 263с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Трехстепенной гироскоп

Цель лабораторной работы – изучение физических основ функционирования трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе.

#### Краткие теоретические сведения

Пусть симметричный маховик (однородное тело вращения), имеющий неподвижную точку  $O$  (рис. 1), совпадающую с центром масс, вращается с абсолютной угловой скоростью  $\bar{\omega}$ . С осью динамической симметрии маховика жестко свяжем ось  $Oz_1$  ортогональной системы координат  $Ox_1y_1z_1$ , начало которой совместим с неподвижной точкой  $O$ .

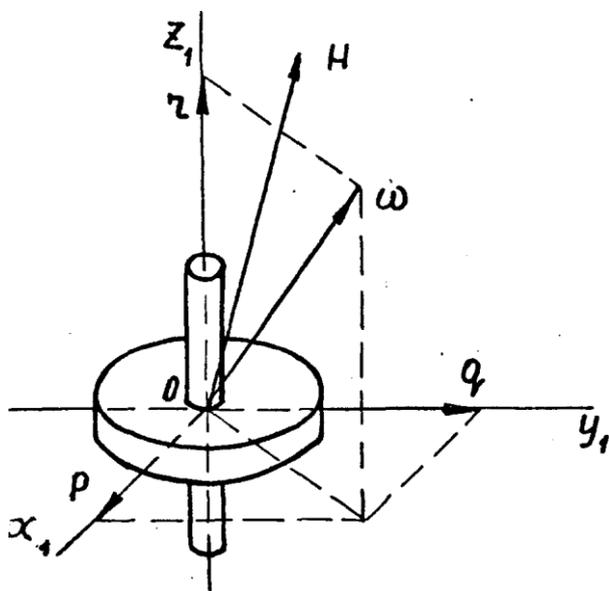


Рис. 1. Маховик, вращающийся вокруг неподвижной точки

Координатные оси  $Ox_1$  и  $Oy_1$  расположены в экваториальной плоскости маховика и не участвуют во вращении последнего вокруг оси симметрии.

Проекции угловой скорости  $\bar{\omega}$  маховика на оси  $Ox_1$ ,  $Oy_1$ ,  $Oz_1$ , являющиеся главными центральными осями инерции, обозначим соответственно  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$ ,  $\bar{r}$ . Если  $A$  – момент инерции маховика относительно экваториальной оси, а  $C$  – момент инерции относительно оси динамической симметрии, то проекции вектора главного момента количества движения  $\bar{H}$  на оси  $Ox_1$ ,  $Oy_1$ ,  $Oz_1$

$$\bar{H}_x = A \cdot \bar{p}; \bar{H}_y = A \cdot \bar{q}; \bar{H}_z = A \cdot \bar{r}$$

Обычно  $C > A$ .

Вектор  $\bar{H}$  главного момента количества движения можно представить в виде

$$\bar{H} = \bar{H}_x + \bar{H}_y + \bar{H}_z.$$

Модуль вектора главного момента количества движения

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2},$$

где  $H_x, H_y, H_z$  – модули проекций главного момента количества движения маховика.

Таким образом, можно назвать три непараллельных направления: направление оси симметрии маховика, по которой направлена проекция угловой скорости  $\bar{r}$ , направление абсолютной угловой скорости  $\bar{\omega}$  и направление вектора момента количества движения  $\bar{H}$  маховика.

Если угловая скорость  $\gamma$  вокруг оси динамической симметрии маховика велика и значительно превышает угловые скорости  $p$  и  $q$  относительно экваториальных осей, то рассматриваемый маховик является гироскопом.

Для современных гироскопов угловая скорость маховика относительно оси динамической симметрии составляет тысячи радианов в секунду, а угловые скорости относительно экваториальных осей обычно не превышают долей радиана в секунду. Учитывая это, в элементарной теории гироскопа вектор главного момента количества движения тела относительно неподвижной точки принимают равным

$$\bar{H} = \bar{H}_z = C \cdot \bar{r}, \quad (1)$$

т.е. полагают, что главный момент количества движения, который в дальнейшем будем называть кинетическим моментом, направлен по оси  $Oz_1$  динамической симметрии гироскопа. Соотношение (1) будет тем более точным, чем  $\gamma$  больше  $p$  и  $q$ .

Для изучения движения гироскопа воспользуемся теоремой об изменении момента количества движения, согласно которой справедливо равенство

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = \bar{M}_{\text{вн}}, \quad (2)$$

где  $\bar{M}_{\text{вн}}$  – момент всех внешних сил относительно неподвижной точки 0 (главный момент).

Вспомним, что производная от вектора  $\bar{H}$  по времени представляет собой «скорость»  $\bar{U}$  конца этого вектора,  $d\bar{H}/dt = \bar{U}$  и, следовательно, равенство (2) можно записать в виде

$$\bar{U} = \bar{M}_{\text{вн}}. \quad (3)$$

Полученное равенство представляет собой теорему Резаля: скорость конца вектора кинетического момента равна главному моменту внешних сил.

Согласно равенству (1) вектор  $\bar{H}$  кинетического момента направлен по оси  $Z_1$  – оси гироскопа. Это означает, что с по мощью зависимостей (2) и (3) можно исследовать движение оси гироскопа.

Рассмотрим основные свойства гироскопа.

1. Пусть момент внешних сил относительно неподвижной точки 0 равен нулю,  $\bar{M}_{\text{вн}} = 0$ . Тогда согласно теореме об изменении момента количества движения (2)  $\bar{H} = \text{const}$ . Следовательно, если на гироскоп не действуют моменты внешних сил, то ось гироскопа сохраняет неизменным свое направление в пространстве.

2. Если на гироскоп подействовать кратковременной силой (удар), создающий момент  $\bar{M}_{\text{вн}}$  относительно неподвижной точки, то скорость  $\bar{U}$  конца вектора  $\bar{H}$  не будет равна нулю лишь в течение весьма короткого промежутка времени действия силы и ось гироскопа практически не изменит своего положения. Таким образом, ось гироскопа сохраняет положение в пространстве устойчиво. В действительности, после действия удара ось гироскопа совершает колебания с большой частотой и весьма малой амплитудой (нутационные колебания), но в элементарной теории гироскопа этими колебаниями пренебрегают.

3. Момент внешних сил относительно неподвижной точки постоянен:  $\bar{M}_{\text{вн}} = \text{const}$ . Приложим к гироскопу силу  $\bar{P}$  на расстоянии  $a$  от точки подвеса, как показано на рис. 2. Согласно теореме Резаля конец вектора  $\bar{H}$

приобретает скорость  $\bar{U} = \bar{M}_{BH}$ . В результате ось гироскопа начнет движение в направлении момента  $\bar{M}_{BH}$ , т.е. перпендикулярно к линии действия приложенной силы. По прекращении действия момента внешних сил ось гироскопа мгновенно останавливается. Такое движение оси гироскопа называют прецессией, а угловую скорость оси – угловой скоростью прецессии. Прецессионное движение гироскопа является движением без инерции.

Найдем модуль угловой скорости прецессии  $\omega_{пр}$ . Согласно формуле  $\bar{V} = [\bar{\omega} \cdot \bar{r}]$ , применяемой для вычисления скорости точки твердого тела ( $\bar{\omega}$  – угловая скорость твердого тела;  $r$  – расстояние от рассматриваемой точки твердого тела до неподвижной точки), скорость  $\bar{U}$  конца вектора  $\bar{H}$  определяем по формуле

$$\bar{U} = [\bar{\omega}_{пр} \cdot \bar{H}]$$

или, учитывая равенство (3), по формуле

$$\bar{M}_{BH} = [\bar{\omega}_{пр} \cdot \bar{H}]. \quad (4)$$

Отсюда

$$\omega_{пр} = \frac{M_{BH}}{H \cdot \sin \theta}, \quad (5)$$

где  $\theta$  – угол между осью гироскопа  $Z_1$  (вектором  $\bar{H}$ ) и угловой скоростью прецессии  $\bar{\omega}_{пр}$ . На рис. 2 угол  $\theta = 90^\circ$ , но в общем случае он может быть отличен от прямого.

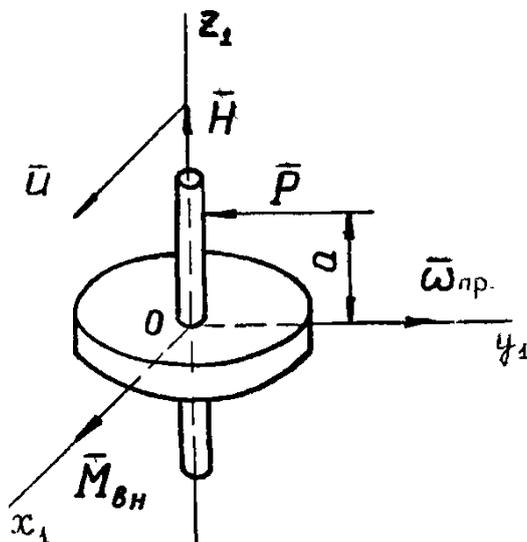


Рис. 2. К определению прецессии гироскопа

Следовательно, при действии на гироскоп момента внешних сил  $\bar{M}_{BH}$  ось  $Oz_1$  гироскопа вращается (прецессирует) с угловой скоростью, определяемой равенством (5) та ким образом, как если бы вектор  $\bar{H}$  стремился совместиться с вектором момента  $\bar{M}_{BH}$ , перемещаясь по кратчайшему пути. Это свойство гироскопа называют законом прецессии оси гироскопа .

Применим закон прецессии к анализу движения волчка (волчка) под действием силы тяжести. На волчок действуют две внешние силы: сила тяжести  $P$  и реакция опоры  $O$  (рис. 3).

Момент реакции относительно точки  $O$  равен нулю, а модуль момента силы тяжести относительно точки  $O$  определяется по равенству

$$M_{BH} = P \cdot a \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

где  $a$  – расстояние от точки  $O$  до центра масс волчка;  $\theta$  – угол между осью волчка и вертикалью.

Так как вектор момента  $\bar{M}_{BH}$  всегда перпендикулярен к вертикальной плоскости, проходящей через ось  $Oz_1$  волчка, то вектор скорости  $\bar{U}$  конца вектора  $\bar{H}$  горизонтален. Следовательно, ось волчка описывает вокруг вертикали поверхность круглого конуса. Угловая скорость прецессии согласно формуле (5) с учетом равенства (6)

$$\omega_{пр} = \frac{P \cdot a}{H} \quad (6.1)$$

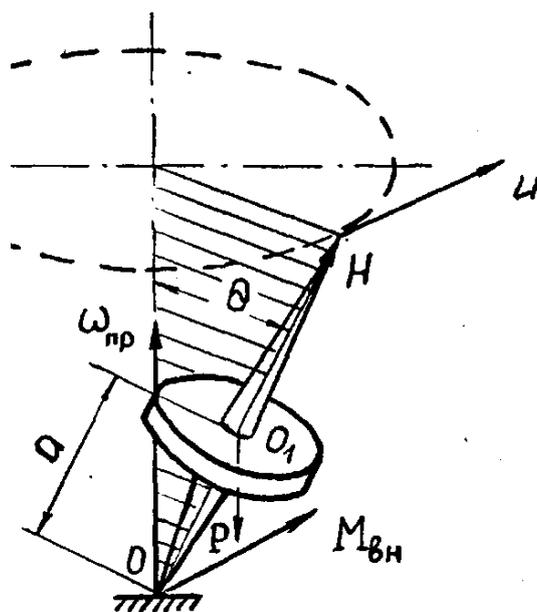


Рис. 3. К анализу движения волчка

Выясним природу сил, которые препятствуют вращению гироскопа вокруг оси момента  $\bar{M}_{\text{вн}}$ . Предположим, что гироскоп (рис. 4) прецессирует под действием момента внешних сил  $\bar{M}_{\text{вн}}$ . Этот момент создается силами  $Q$  и  $Q'$ , приложенными со стороны опор к валу маховика.

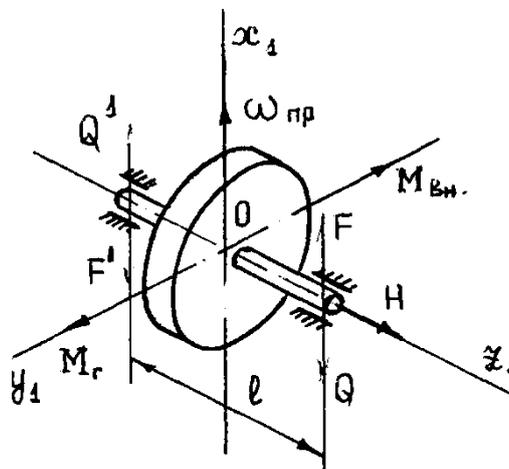


Рис. 4. К определению гироскопического момента

На основании третьего закона Ньютона можно утверждать, что со стороны гироскопа на подшипники будут действовать силы  $F$  и  $F'$ , равные по модулю и направленные противоположно силам  $Q$  и  $Q'$ . Момент этих сил относительно точки  $O$  равен по величине и противоположен по направлению моменту  $\bar{M}_{\text{вн}}$ . Такой момент называется моментом гироскопической реакции или просто гироскопическим моментом. Гироскопический момент

$$\bar{M}_Г = -\bar{M}_{\text{вн}} = [\bar{H} \cdot \bar{\omega}_{\text{пр}}]. \quad (7)$$

Направление гироскопического момента таково, что он стремится совместить вектор кинетического момента гироскопа с вектором угловой скорости прецессии. По модулю  $M_Г = H \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot \sin \theta$ .

В рассмотренном случае  $\theta = 90^\circ$ .

### Описание лабораторной установки

На рис. 5 показана схема трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе. Ротор имеет одну степень свободы и может вращаться относительно своей оси вращения. Внутренняя рамка вместе с ротором образуют гиروزел. Гиروزел может вращаться относительно оси вращения внутренней рамки.

Гироузел закреплен в наружной рамке, которая может вращаться относительно своей оси вращения. Тем самым карданов подвес обеспечивает две степени свободы вращающегося ротора, т.е. ротор имеет три угловые степени свободы.

По осям вращения внутренней и наружной рамок установлены шкалы угловых отсчетов, позволяющие определить угол поворота внутренней рамки относительно наружной и наружной рамки относительно основания.

Для питания электромотора используется специальный блок питания, обеспечивающий трехфазное электропитание 36В 400Гц.

К лабораторной установке прикладываются также два калиброванных груза.

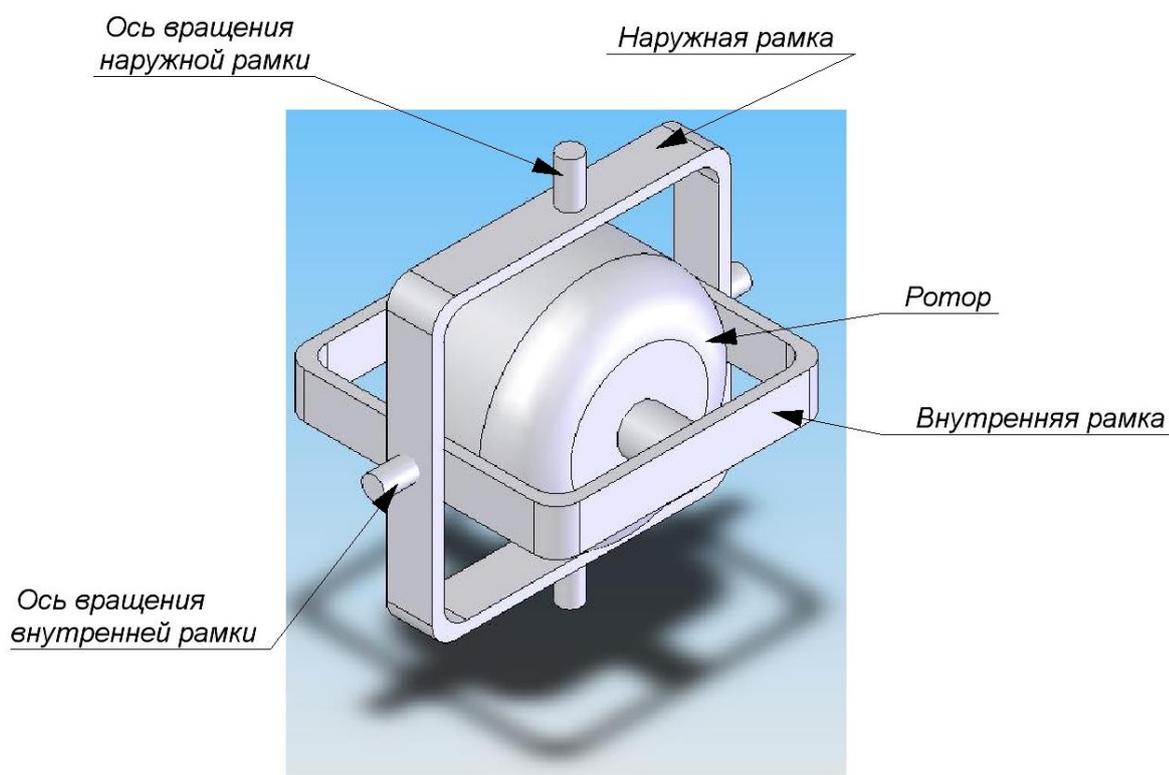


Рис. 5. Схема трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Запитать гиromотор напряжением 36В, 400Гц.
2. Подождать 3 минуты, для того чтобы гиromотор раскрутился.
3. Отключить питание гиromотора.

*Изучение основных свойств гироскопа.*

1. Убедиться, что ось гироскопа сохраняет неизменным свое положение в пространстве, в отсутствии моментов внешних сил.

2. Убедитесь, что ось гироскопа практически не изменяет своего положения в пространстве под действием удара.

3. Убедитесь, что под действием момента внешних сил ось гироскопа начинает прецессировать.

4. Убедитесь, что прецессионное движение является движением по инерции.

#### *Изучение прецессии трехстепенного гироскопа.*

1. На внутреннюю рамку гироскопа с левой стороны повесить груз массой  $m$ .

2. Определить скорость прецессии гироскопа, следующим образом. Замерить время  $t$ , когда гироскоп повернется на  $45^\circ$ . Вычислить  $\omega_{\text{пр}}=45^\circ/t$ .

3. Определить с помощью (4) направление  $\vec{\omega}_{\text{пр}}$ . В тетрадь зарисовать схему гироскопа с указанием  $M_{\text{вн}}$ ,  $\vec{\omega}_{\text{пр}}$ ,  $R$ .

4. Определить погрешность вычисления  $\omega_{\text{пр}}$ , если погрешность измерения угла  $\pm 2,5^\circ$ , а погрешность измерения времени  $\pm 0,5$  с.

5. На внутреннюю рамку гироскопа с правой стороны повесить груз массой  $m$ . Повторить пункты 2, 3 и 4.

6. По проведенным измерениям определить среднее значение  $\omega_{\text{пр}}$ .

#### *Определение средней скорости вращения ротора.*

1. Измерить плечо действия силы  $mg$ , т.е. расстояние от оси вращения ротора до точки подвеса грузика.

2. С учетом (6.1) вычислить кинетический момент ротора ( $H$ ).

3. По формуле (1) определить скорость вращения ротора ( $\omega$ ). Момент инерции ротора определять как момент инерции диска  $J = \frac{mr^2}{2}$ . Плотность материала ротора принять  $\rho=7,8$  гр/см<sup>3</sup>. (Все расчеты проводить в системе СИ).

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.

4. Результаты выполнения лабораторной работы: измеренные и вычисленные параметры трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните понятие гироскопа.
2. Назовите три основных свойства трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе.
3. Поясните физические основы основных свойств трехстепенного гироскопа.
4. Поясните явление прецессии.
5. Поясните поведение волчка под действие силы тяжести.
6. Поясните природу гироскопического момента.
7. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.

### **Библиографический список**

1. Савельев В.В. Гироскопы, гироскопические приборы и системы. Учебное пособие. – Тула: Тульский государственный технический университет, 1994. – 165 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Микромеханический датчик угловой скорости

*Цель лабораторной работы* – изучение принцип действия и определение основных характеристик микромеханического гироскопа.

#### Краткие теоретические сведения

Микромеханический датчик угловой скорости, также называемый микромеханическим гироскопом – малогабаритный прибор, предназначенный для измерения угловой скорости вращения. Данные приборы изготавливаются по микромеханической технологии – технологии по которой изготавливаются и микросхемы.

По существу, технология изготовления основана на модификации метода фотолитографического создания плоских и пространственных структур. Фотолитография - это целая группа процессов, среди которых есть простые типа фотокопирования и более сложные, например лазерная запись. Фотокопирование позволяет создать на обрабатываемом изделии некоторую структуру. Она может быть как двумерной, т.е. представлять собой некоторое изображение, так и трехмерной. Эти структуры обычно получают химическим травлением, однако иногда используют и дополнительные приемы. Например, лазерный, электронный или ионный пучок, ускоряющий скорость химической реакции. На практике получаемые травлением структуры обычно являются двумерными и имеют большую площадь в плоскости подложки при относительно небольшой толщине.

Основой большинства микромеханических изделий является кремний. Кремний имеет прекрасные механические свойства. Он прочнее стали и имеет очень высокую температуру плавления. В настоящее время удалось объединить в одном микрочипе миниатюрную механическую конструкцию гироскопа и электросхемы, обеспечивающие его работу.

В каждом микромеханическом гироскопе есть рабочее тело [3], которое, в простейшем случае, совершает возвратно-поступательное движение в одной плоскости. Если поставить это тело на вращающуюся платформу, плоскость которой совпадает с плоскостью колебаний, то на колеблющуюся массу начнет действовать сила Кориолиса  $F_C = 2m[\Omega \times v]$ , где  $\Omega$  — вектор угловой скорости (перпендикулярен плоскости вращения),  $v$  — вектор линейной скорости тела относительно вращающейся платформы,  $m$  — масса тела. Модуль  $F_C = 2m\Omega v \cdot \sin \varphi$ , где  $\varphi$  — угол между векторами линейной и угловой скорости.

Следовательно, сила Кориолиса направлена перпендикулярно направлению колебаний (рис. 1) и оси вращения.

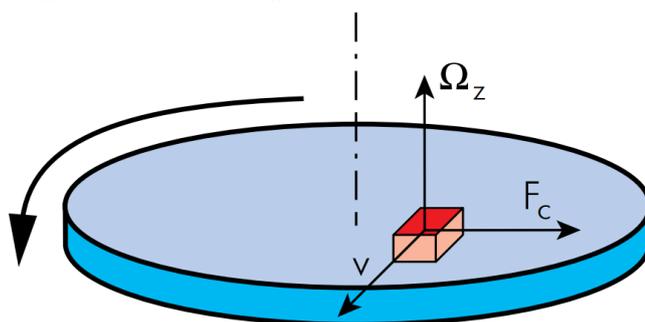


Рис. 1. К пояснению принципа действия микромеханического гироскопа

При противоположных направлениях движения сила Кориолиса также действует в противоположных направлениях. Определив силу Кориолиса и зная линейную скорость тела, несложно вычислить угловую скорость и ее изменение (угловое ускорение).

Все конструкции вибрационных гироскопов, при широком их разнообразии, можно свести к нескольким типам. Одними из самых первых были балочные гироскопы. Их принцип действия таков: консольную балку (пластину) заставляют колебаться с помощью пьезоэлементов в направлении оси X (рис.2) [3]. Под действием силы Кориолиса при вращении относительно оси Z, параллельной продольной оси балки, возбуждаются колебания вдоль оси Y. Они регистрируются другими пьезоэлементами.

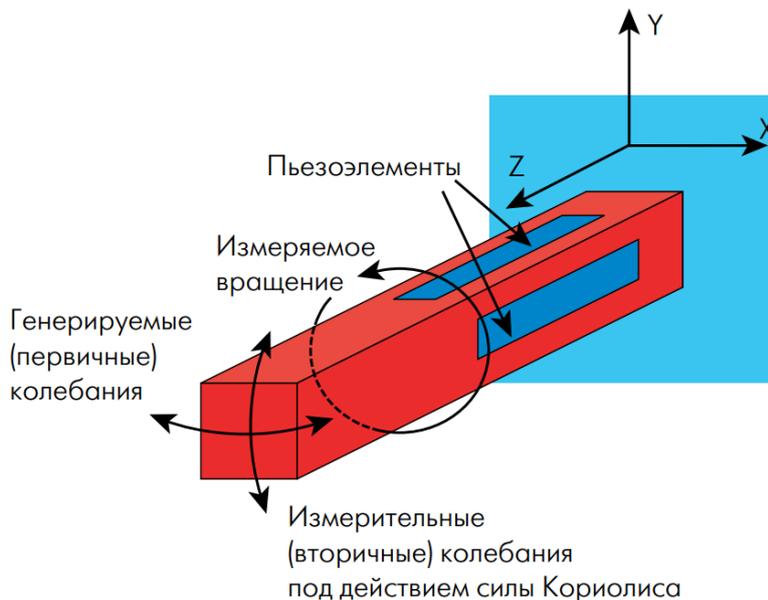


Рис. 2. Принцип действия вибрационного гироскопа

Конструкции балок могут быть самыми разными. Например, стальная балка с поперечным сечением в виде равностороннего треугольника. К каждой грани

балки приклеено по пьезоэлементу: на нижней стороне – возбуждающий вибрацию, на боковых гранях – измерительные. Основным недостатком таких гироскопов – их низкая технологичность (сложно обеспечить стабильные параметры клеевого соединения металла и пьезокермики и т.п.). Поэтому во всем мире распространение получили так называемые биморфные вибрационные гироскопы.

В биморфных гироскопах резонатор представляет собой две склеенные пьезоэлектрические пластины, поляризованные в противоположных направлениях. К пластинам (или к одной из них) прикладывают напряжение, одна пластина начинает сжиматься, другая растягиваться, в результате возникают колебания. При вращении под действием силы Кориолиса возбуждаются вторичные колебания, которые можно детектировать теми же электродами.

Пластины либо биморфные, либо наклеенные на металлическое основание униморфные. Каждая из пластин состоит из трех частей с противоположными направлениями поляризации. При вращении относительно оси  $Z$  возникают вторичные колебания (вдоль длины пластин). Хотя первичные колебания пластин происходят в противофазе, сигналы их генерации синфазны. Вторичные же колебания, обусловленные силой Кориолиса, вызывают дополнительные противофазные сигналы на электродах, разность которых пропорциональна угловой скорости вращения.

При вращении под действием силы Кориолиса возбуждаются вторичные колебания, которые можно детектировать теми же электродами. Так, один из лидеров (и зачинателей) промышленного освоения вибрационных пьезоэлектрических гироскопов — компания Murata — запатентовала структуру, в которой резонатор представляет собой пару колеблющихся в противофазе пластин (рис.3).

Одним из достоинств таких гироскопов является отсутствие вращающихся подшипников. МЭМС с колебательным элементом в форме бокала разрабатывали по крайней мере 25 лет, но несмотря на это он не нашел широкого применения до сих пор. Это обусловлено тем, что для получения высокой чувствительности необходима чрезвычайно высокая точность производства деталей. Производство осуществляется с допусками до сотен или даже тысяч слоев кремния, но чувствительность датчика ограничена малой массой. Тем не менее, микромеханический кремниевый гироскоп еще не раскрыл весь свой потенциал.

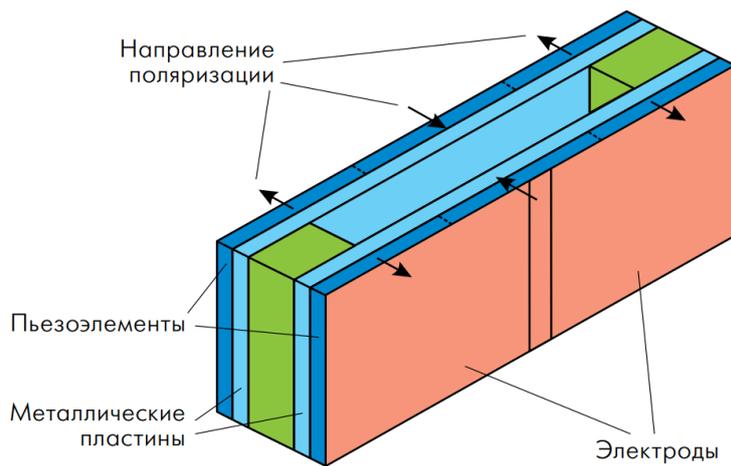


Рис. 3. Конструкция вибратора гироскопа компании Murata

На рис.4 показаны различные примеры микромеханических структур гироскопов.

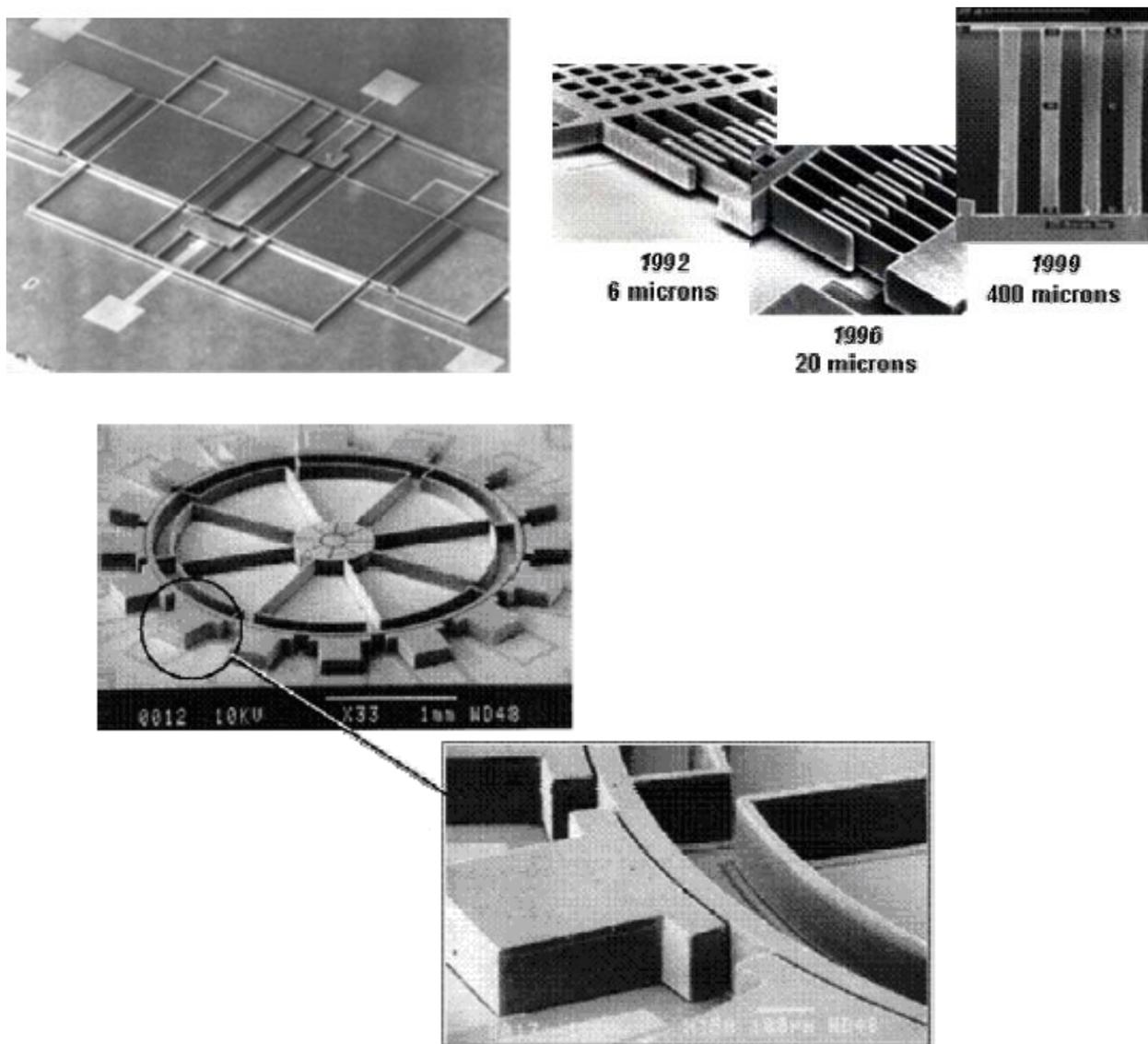


Рис. 4. Примеры структуры микромеханического гироскопа

### Описание лабораторной установки

В качестве примера микромеханического гироскопа в данной лабораторной работе используется прибор ENV-05 производства японской фирмы «Murata». Внешний вид прибора показан на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид микромеханического гироскопа Murata ENV-05V

Данный прибор является далеко не самым миниатюрным и имеет массу порядка 20 грамм. Питание данного прибора производится от лабораторного блока питания.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики гироскопа ENV-05F.

Табл. 1. Технические характеристики гироскопа ENV-05F.

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	$5 \pm 0,5$
Максимально потребляемый ток, мА	15
Диапазон измерений, °/с	$\pm 80$
Нулевой сигнал, мВ	$2,5 \pm 0,35$
Коэффициент передачи, мВ/°/с	$25 \pm 3,3$
Разрешающая способность, °/с	0,3
Температурная зависимость коэффициента передачи, %	10
Нелинейность статической характеристики, %	0,5
Случайный дрейф нуля, °/с	менее 9
Скорость отклика, Гц	10
Среднеквадратический уровень шума, мВ	менее 20
Диапазон рабочих температур, °С	-30...+80
Масса, грамм	20

Выходной сигнал необходимо подать на электронный осциллограф.

Для проведения исследований данного прибора в лабораторной установке используется лабораторный стенд вращения, позволяющий воспроизводить различные угловые скорости вращения.

На рис. 6 показана схема лабораторной установки.

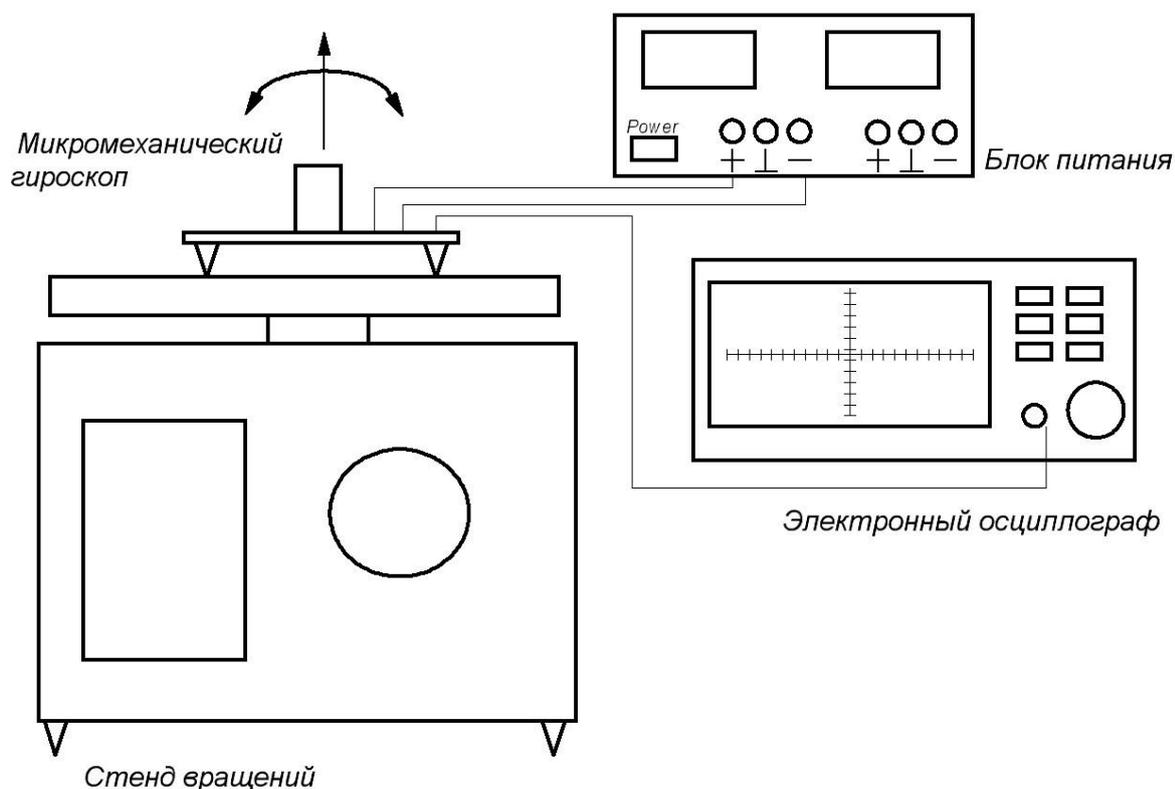


Рис. 6. Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Собрать лабораторную установку.
2. Включить электропитание микромеханического гироскопа.
3. С использованием встроенных функций электронного осциллографа определить нулевой сигнал микромеханического гироскопа и его шумовые характеристики (математическое ожидание и дисперсию).
4. С использованием вращательного стенда, задавая различные скорости вращения и различные направления вращения, получить значения выходного сигнала прибора.
5. Заполнить таблицу.

Скорость вращения стенда, градус/с	Выходной сигнал гироскопа, В
...	...

6. По данным таблицы построить статическую характеристику гироскопа.
7. По статической характеристике определить среднее значение коэффициента передачи прибора, нелинейность характеристики, диапазон измерений гироскопа.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: таблицы, графики, измеренные и вычисленные параметры микромеханического гироскопа.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните область применения, достоинства и недостатки микромеханических гироскопов.
2. Поясните принцип функционирования микромеханического гироскопа.
3. Поясните технологию изготовления микромеханических гироскопов.
4. Опишите и поясните принцип функционирования лабораторной установки.
5. Поясните метод построения статической характеристики микромеханического гироскопа.
6. Поясните метод определения коэффициента передачи микромеханического гироскопа.

### **Библиографический список**

1. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергаториздат, 1989. – 272 с.
3. Шахнович И. МЭМС-гироскопы – единство выбора // Электроника: НТБ. 2007. – Вып. 1. [Электронный ресурс] . – Режим доступа: [http://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/0/article\\_512\\_885.pdf](http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_512_885.pdf), – свободный. – Загл. с экрана.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Микромеханический акселерометр

#### Цель работы

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа работы и функционирования микромеханического акселерометра.

#### Краткие теоретические сведения

Акселерометр является датчиком линейного ускорения и предназначен для измерения ускорения движущегося объекта.

Следует различать низкочастотные акселерометры и виброакселерометры. Низкочастотные акселерометры используются для систем ориентации и автоматического управления движущимися объектами. Виброакселерометры – для оценки прочностных характеристик конструкций.

#### *Классификация акселерометров*

1. По характеру зависимости между измеряемым ускорением и выходным сигналом, акселерометры можно разделить на простые, однократно интегрирующий, двукратно интегрирующие.

2. По виду перемещения инерционной массы акселерометры разделяются на датчики с линейным – осевым перемещением подвижной системы – маятниковые акселерометры.

3. По способу подвеса инерционной массы акселерометры подразделяются на четыре группы:

- с пружинным подвесом подвижной системы;
- с механическим подвесом подвижной системы в жестких опорах;
- с гидравлическим, гидростатическим или гидродинамическим подвесом подвижной системы;
- с комбинированным подвесом системы.

4. По виду преобразования измеряемой величины акселерометры разделяются на датчики с прямым преобразованием и на акселерометры с уравновешивающим преобразованием, которые получили название компенсационных.

Наибольшее распространение в технике получили низкочастотные акселерометры, устанавливаемые для решения задач управления на самолетах, кораблях, ракетах.

На рис. 1 приведена схема акселерометра с линейным подвесом. Чувствительный элемент 3 массой  $m$  подвешен в корпусе 1 на двух упругих

пружинах 2. Успокоение колебаний чувствительного элемента производится при помощи демпфера 4, который может быть магнитоиндукционным, жидкостным или воздушным. Перемещение чувствительного элемента относительно корпуса акселерометра можно измерить с помощью потенциометрического преобразователя 5.

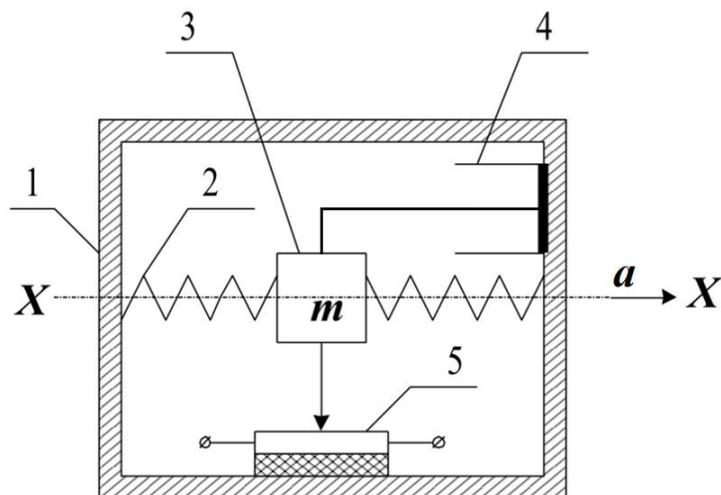


Рис. 1. Схема акселерометра линейных ускорений:

- 1 – корпус, 2 – пружины подвеса, 3 – чувствительный элемент (ЧЭ) – сейсмическая масса, 4 – воздушный демпфер, 5 – потенциометрический преобразователь

Акселерометр представляет собой колебательное звено. При наличии ускорения  $a$  его работа описывается уравнением второго порядка

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = -ma + F_{гр},$$

где  $x$  – перемещение чувствительного элемента относительно корпуса,  $k$  – коэффициент демпфирования,  $c$  – суммарная жесткость пружин,  $F_{гр}$  – равнодействующая гравитационных сил в направлении измерительной оси  $X$ . Первый член уравнения характеризует силу инерции, второй – демпфирование, третий – позиционную силу, создаваемую упругостью пружины.

В земных условиях, в большинстве случаев, можно учитывать лишь силу тяжести Земли, тогда  $F_{гр} = mg \cdot \cos \alpha$ , где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – угол между направлением измерительной оси акселерометра и направлением вектора ускорения свободного падения.

К основным *достоинствам* этих датчиков следует отнести их относительную простоту и удобство в эксплуатации.

К *недостаткам*:

- сравнительно большую основную погрешность до 3% и нелинейность градуировочной характеристики;

- низкую частоту собственных колебаний, которая имеет значения единиц – десятков Гц и как следствие, возможность измерить с малой динамической погрешностью только постоянные и инфранизкочастотные ускорения;
- значительные перемещения чувствительного элемента, что сказывается на ресурсе датчиков.

На сегодняшний день наиболее часто используется емкостной датчик перемещения груза (рис. 2). Подвижная часть системы – классический грузик на подвесах. При наличии ускорения грузик смещается относительно неподвижной части акселерометра. Обкладка конденсатора, прикрепленная к грузику, смещается относительно обкладки на неподвижной части. Емкость меняется, при неизменном заряде меняется напряжение – это изменение можно измерить и рассчитать смещение грузика. Зная его массу и параметры подвеса, легко найти и ускорение.

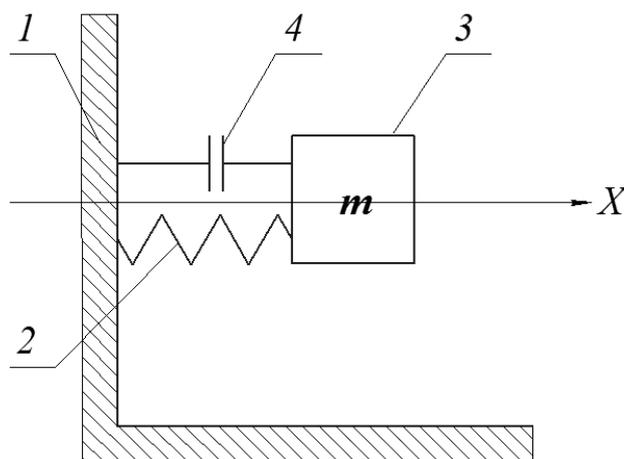


Рис. 2. Схема акселерометра линейных ускорений с емкостным датчиком

Современные микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой сформированные на единой подложке датчики схемы управления с размерами элементов от нескольких сотен до нескольких единиц микрон (рис. 3).

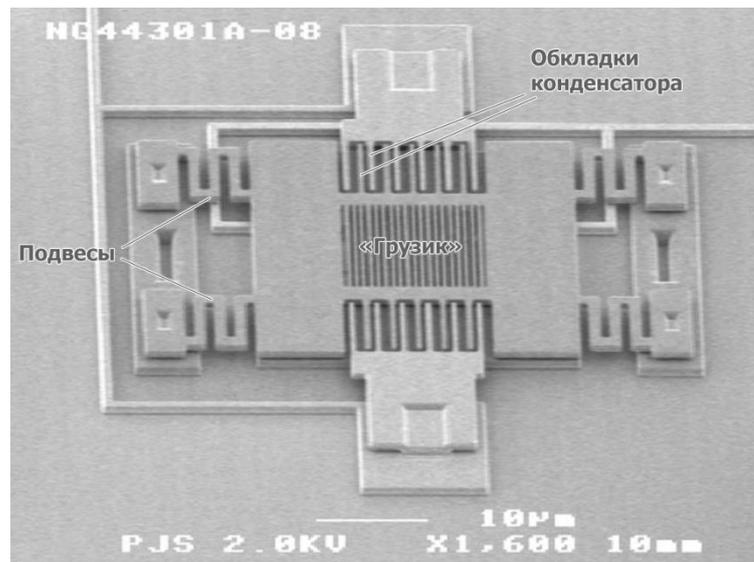


Рис. 3. Чувствительный элемент акселерометра, увеличенный в 1600 раз

В отличие от микросхем, МЭМС, как правило, имеют трехмерную структуру. Для их изготовления используют технологические операции, полностью или частично позаимствованные у микроэлектроники: окисление, фотолитографию, травление, легирование, металлизацию, создание контактов, резку и т.п.

Базовым материалом для микромеханических приборов, как и для полупроводниковых приборов, служит кремний. Это объясняется наличием на рынке кремниевых пластин высокой степени чистоты и кристаллографического совершенства.

Выполненные на кремнии МЭМС легко объединяются с электронными устройствами управления и обработки данных. К тому же монокристаллический кремний известен своими превосходными механическими характеристиками.

В настоящей лабораторной работе используется акселерометр LIS3LV02DL (ST Microelectronics), использующий внутренние комбинированные кремниевые структуры из фиксированных и подвижных частей. Данный акселерометр позволяет измерять ускорения относительно трех измерительных осей (рис. 4).

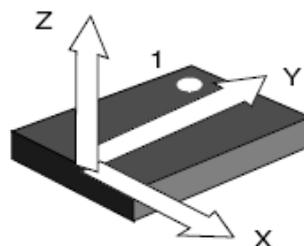


Рис. 4. Схема акселерометра LIS3LV02DL: X, Y, Z – оси чувствительности

LIS3LV02DL обеспечивает переключаемые диапазоны измеряемых ускорений  $\pm 2g$  и  $\pm 6g$ . Основные параметры акселерометра LIS3LV02DL приведены в табл. 1.

Табл. 1. Основные параметры акселерометра LIS3LV02DL

Ускорение, $\pm g$	2, 6
Измерительные оси	XYZ
Чувствительность, LSB/g:	
При $\pm 2 g$ , разрешение 12 бит	1024
При $\pm 6 g$ , разрешение 12 бит	340
Разрешение, бит	12
Частота среза, Гц	40, 160, 640, 2560
Интерфейс	I <sup>2</sup> C, SPI
Напряжения питания $V_{CC}$ , В	от 2,16 до 3,6
Ток потребления $I_{CC}$ , мА	0,65
Температурный диапазон $T$ , °С	от -40 до 85
Габаритные размеры, мм	7,5×4,4×0,92

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из платы акселерометра LIS3LV02DL, отладочной платы на основе микроконтроллера PIC18F4550 фирмы Microchip и персонального компьютера с программным обеспечением.

На *плате акселерометра* (рис. 5) установлены следующие элементы: акселерометр LIS3LV02DL, источник опорного напряжения (ИОН) REF196GSZ фирмы Analog Devices, конденсатор танталовый 1 мкФ 35В, конденсатор танталовый 10 мкФ 35 В, SMD 1206 конденсатор керамический 0,1 мкФ, SMD 1206 резистор 1 кОм, два штыревых разъема PLS-12 с шагом контактов 2 мм.

*Отладочная плата* (рис. 6) предназначена для опроса значений ускорений с акселерометра LIS3LV02DL и передачи этих значений в персональный компьютер посредством USB интерфейса. Питание осуществляется от порта USB.

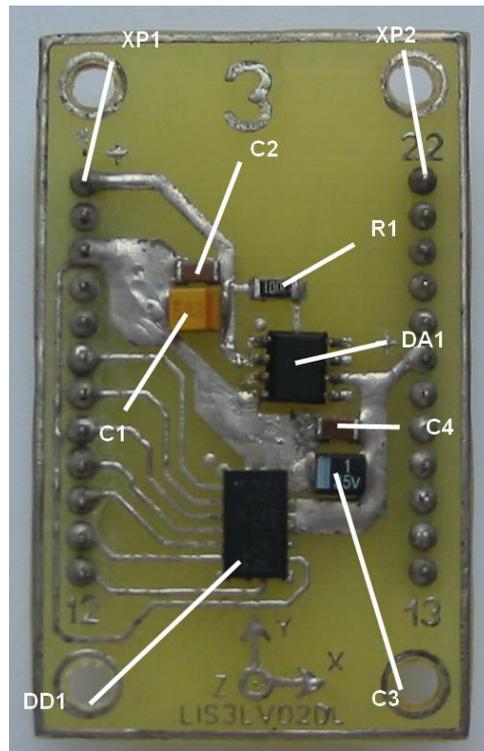


Рис. 5. Плата акселерометра LIS3LV02DL: DD1 – акселерометр

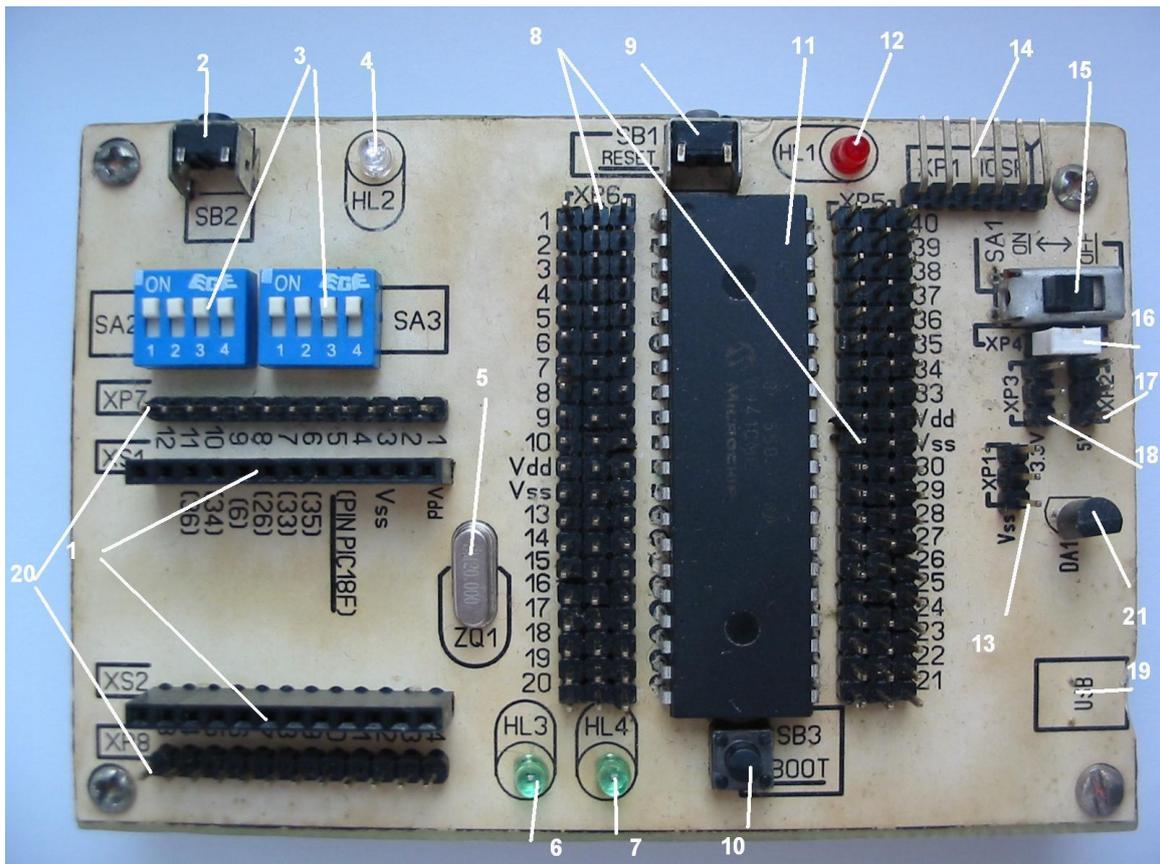


Рис. 6. Отладочная плата

На рис. 6:

1 – разъемы для платы акселерометра; 2 – кнопка (не используется); 3 – DIP-переключатели контактов платы акселерометра; 4 – светодиод, мерцающий при работе; 5 – кварцевый резонатор; 6 – светодиод, мерцающий при программировании отладочной платы (не используется); 7 – светодиод, мерцающий при программировании отладочной платы (не используется); 8 – штекеры PLS, дублирующие контакты микроконтроллера; 9 – кнопка сброса микроконтроллера; 10 – кнопка перевода в режим программирования микроконтроллера (не используется); 11 – микроконтроллер PIC18F4550; 12 – светодиод, горящий при питании микроконтроллера; 13 – штекер земли; 14 – штекер разъема программирования ICSP (не используется); 15 – переключатель подачи питания; 16 – переключатель; 17 – штекер 5 вольт; 18 – штекер 3,3 вольт; 19 – находится разъем USB; 20 – штекеры, дублирующие контакты разъема платы акселерометра; 21 – микросхема стабилизации напряжения на 3,3 вольта.

*Программное обеспечение (LIS3LV02DL.exe), разработанное в интегрированной среде C++Builder 6.0, позволяет принимать данные значений ускорений с отладочной платы и осуществлять форматированный вывод в текстовый файл с расширением \*.xls.*

Программное обеспечение позволяет выбрать номер СОМ-порта определившегося в ОС, отслеживать время записи значений ускорений, наблюдать текущее значение ускорений.

### **Порядок проведения лабораторной работы**

1. Установите плату акселерометра в гнездо отладочной платы (выводы платы акселерометра и разъемов отладочной платы должны совпадать, т.е. «1-1, 2-2,..., 22-22»; нумерация выводов нанесены на платах) (рис. 7).

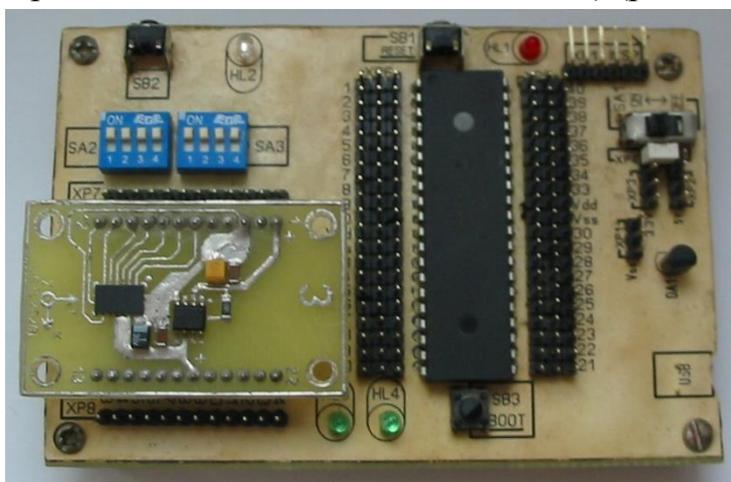


Рис. 7

2. Убедитесь, что DIP-переключатели установлены в положение «ON» и перемычка установлена на 3,3 В (рис. 8)

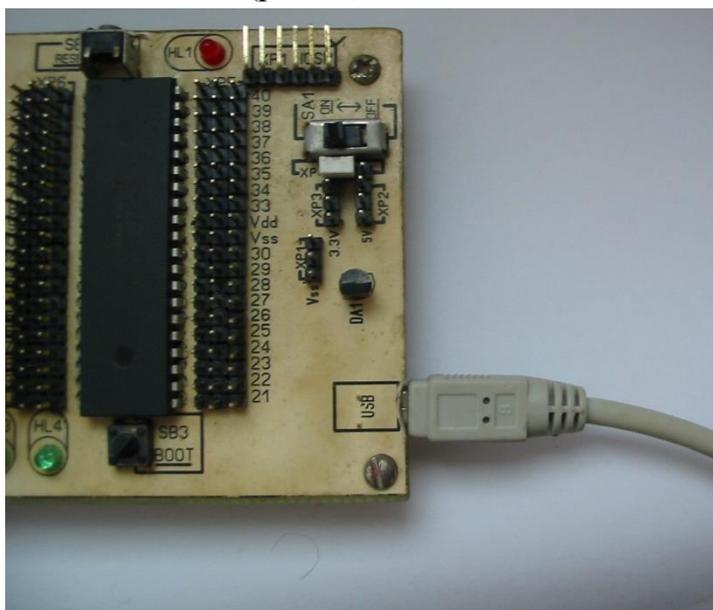


Рис. 8

3. Включите ПК.

4. Подсоедините отладочную плату к порту USB ПК с помощью mini-USB кабеля

5. Включите питание отладочной платы с помощью переключателя (положение «ON»)

6. Найдите номер COM-порта: Мой компьютер → Свойства → Оборудование → Диспетчер устройств → Порты(COM и LPT) (при первом подключении необходимо установить драйвер COM-порта) (рис. 9).

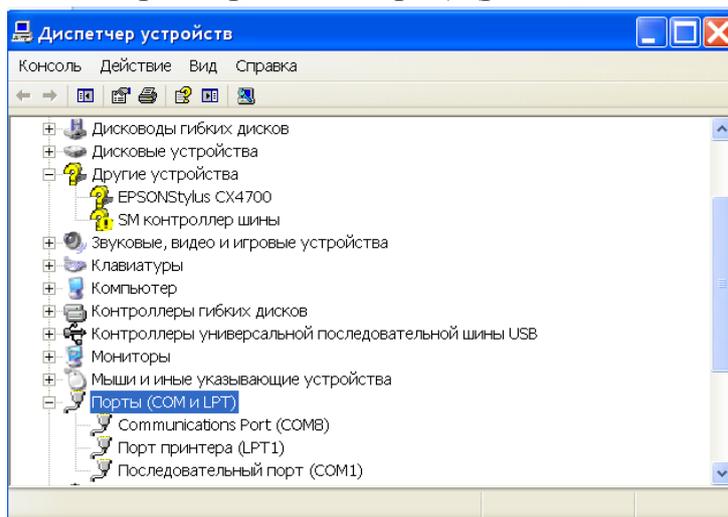


Рис. 9

7. Запустите программу для опроса датчика LIS3LV02DL.exe. Данная программа записывает значения ускорения выдаваемые акселерометром с частотой 40 Гц. Диапазон измерений акселерометра  $\pm 2g$ . (рис. 10)

8. Выберите соответствующий номер COM-порта.



Рис. 10. Программное обеспечение для работы с акселерометром

10. Нажмите кнопку «Старт». Начнется запись значений проекции ускорений в файл с расширением \*.xls в директории, где находится файл LIS3LV02DL.exe, а также текущее отображение значений проекций ускорения в единицах перегрузки g. Чтобы прервать запись, необходимо нажать кнопку «Стоп».

11. Откройте файл с расширением \*.xls. Убедиться в правильности показаний акселерометра. Для удобства, записывается время выдачи проекций ускорения акселерометром (рис. 11).

	1	2	3	4	5
1		Акселерометр			
2	T, c	X, g	Y, g	Z, g	
3	0.000000	-0.004	0.003	0.980	
4	0.025000	-0.004	0.001	0.980	
5	0.050000	-0.004	0.002	0.979	
6	0.075000	-0.003	0.004	0.980	
7	0.100000	-0.004	0.002	0.982	
8	0.125000	-0.004	0.002	0.980	
9	0.150000	-0.003	0.003	0.980	
10	0.175000	-0.004	0.002	0.979	

Рис. 11

12. Установите отладочную плату с платой акселерометром на наклонное основание.

13. С помощью наклонного основания и квадранта последовательно направьте каждую из трёх измерительных осей акселерометра вдоль и против вектора ускорения силы тяжести  $G$ . При этом записывайте показания акселерометра в файл.

14. Постройте статическую характеристику измерительной оси  $X$  акселерометра. Для этого с помощью наклонного основания и квадранта обеспечить поворот оси  $X$  относительно вектора ускорения силы тяжести в диапазоне  $+90$  градусов с дискретностью  $90$  градусов. Разворот производите вокруг оси  $Y$ , положение которой должно быть горизонтальной. Для каждого угла записать показания акселерометра

15. С помощью формулы  $U = 9,81 \cdot \sin a$  определите величину проекции ускорения  $G$  на ось  $X$  (где  $a$  – угол между плоскостью горизонта и осью  $X$ ,  $-90 \leq a \leq +90$ , дискретность  $10$  градусов). Заполните табл. 2.

Табл. 2.

Показания акселерометра, g	$a$ , градус	$U$ , g
...	-90	...
...	-80	...
...	...	...
...	+90	...

16. Постройте статическую характеристику Показания акселерометра =  $f(U)$ . По статической характеристике определите основные погрешности акселерометра.

### Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Результаты выполнения лабораторной работы.
5. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия акселерометра линейных ускорений.
2. Каковы достоинства и недостатки акселерометров с линейным подвесом.

3. Назовите виды акселерометров и область их применения.
4. Поясните назначение программного обеспечения, используемого в лабораторной работе.
5. Поясните статическую характеристику акселерометра.

#### **Библиографический список**

1. В.Я. Распопов Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение. – 2007. – 407 с.
2. Дрожжин А. MEMS: микроэлектромеханические системы, часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectromechanical-systems-Part-1>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Автомобильные акселерометры // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005\\_8\\_32.php](http://www.kit-e.ru/articles/sensor/2005_8_32.php), свободный. – Загл. с экрана.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### Измерение угловой скорости вращения Земли с помощью волоконно-оптического гироскопа

*Цель лабораторной работы* – освоить принцип функционирования волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) и приобрести навыки обработки его сигнала.

#### Краткие теоретические сведения

*Волоконно-оптический гироскоп и принцип его работы.*

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – датчик угловой скорости, построенный на основе эффекта Саньяка.

*Эффект Саньяка* (вихревой эффект, открыт в 1913 году): если в замкнутом оптическом контуре в противоположных направлениях распространяются два световых луча, то при неподвижном контуре разница фаз обоих лучей равна нулю, при вращении контура вокруг оси, перпендикулярной плоскости контура, разница фаз лучей отлична от нуля.

Для объяснения эффекта Саньяка воспользуемся кинематической моделью. На рис. 1 показан замкнутый оптический контур радиусом  $R$ . Луч света подается в контур извне (оптический диод) и с помощью системы зеркал  $Z_1$  и  $Z_2$  расщепляется на два луча 1 и 2, распространяющиеся в контуре в разные стороны (один – по часовой стрелке, другой – против).

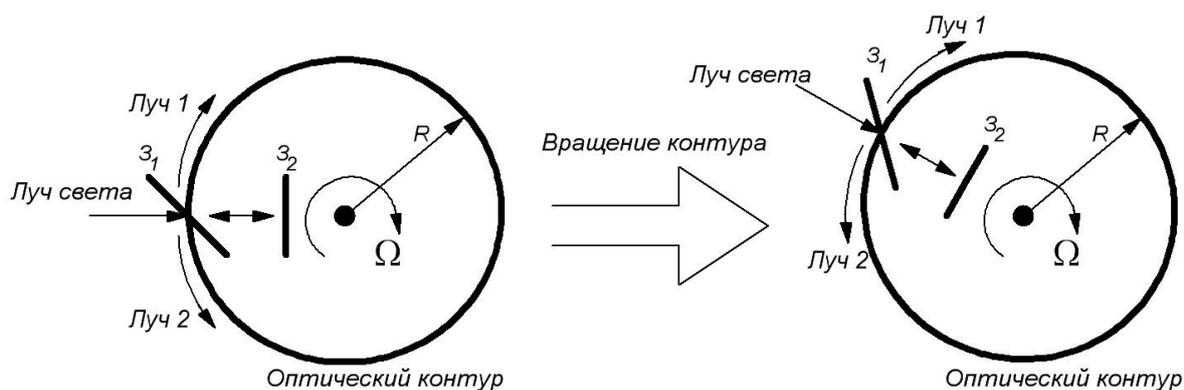


Рис. 1. К пояснению эффекта Саньяка

Если контур неподвижен, то оба луча проходят одинаковый путь:

$$2\pi R = c\tau, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $\tau$  – время, необходимое лучу света на прохождение оптического контура.

Если контур вращается с постоянной угловой скоростью  $\Omega = const$ , то луч 1 пройдет путь  $2\pi R + R\Omega\tau_1$ , а луч 2 путь  $2\pi R - R\Omega\tau_2$ , где  $\tau_1, \tau_2$  – время движения луча 1 и 2 соответственно.

Так как  $2\pi R + R\Omega\tau_1 = c\tau_1$ , а  $2\pi R - R\Omega\tau_2 = c\tau_2$ , то:

$$\tau_1 = \frac{2\pi R}{c - R\Omega} \text{ и } \tau_2 = \frac{2\pi R}{c + R\Omega}. \quad (2)$$

Разница времен  $\tau_1$  и  $\tau_2$  равна:

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = \frac{4\pi R^2\Omega}{c^2 - R^2\Omega^2}. \quad (3)$$

С учетом  $R\Omega \ll c$  можно записать:

$$\Delta\tau = \frac{4\pi R^2\Omega}{c^2} = \frac{4S}{c^2}\Omega, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь оптического контура.

Фаза Саньяка равна  $\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta\tau$ , где  $\omega$  – частота света ( $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$ , где  $\nu$  – частота света в Герцах,  $\lambda$  – длина волны света). Тогда:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi S}{\lambda c}\Omega. \quad (5)$$

Таким образом, фаза Саньяка (разница фаз встречных лучей) прямопропорциональна угловой скорости вращения контура. На этом принципе и построен ВОГ. В качестве оптического контура применяют оптическое волокно, намотанное на катушку. Для повышения чувствительности на катушку наматывают множество витков, тогда разница фаз Саньяка равна:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi SN}{\lambda c}\Omega, \quad (6)$$

где  $N$  – количество витков оптического волокна.

Разницу фаз  $\Delta\varphi$  измеряются фотодетектором, после преобразования сигнала которого, получают напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения  $\Omega$ .

ВОГ позволяет измерять абсолютную угловую скорость, т.е. скорость вращения относительно инерциального пространства. ВОГи применяются в системах управления и навигации различных подвижных объектов: самолеты, малогабаритные ракеты, современные танки, морские и речные катера, железнодорожный транспорт и др.

В лабораторной работе используется ВОГ марки VG949P (или в русскоязычных документах и рекламе ВГ949П) производства фирмы «Физоптика». Внешний вид VG949P представлен на рис. 2. На рис. 3 показан тот же прибор в разобранном виде. На рис. 4 показана структура и взаимосвязь элементов ВОГ.



Рис. 2. Внешний вид VG949P в пластиковом прозрачном корпусе



Рис. 3. Прибор VG949P и его элементы

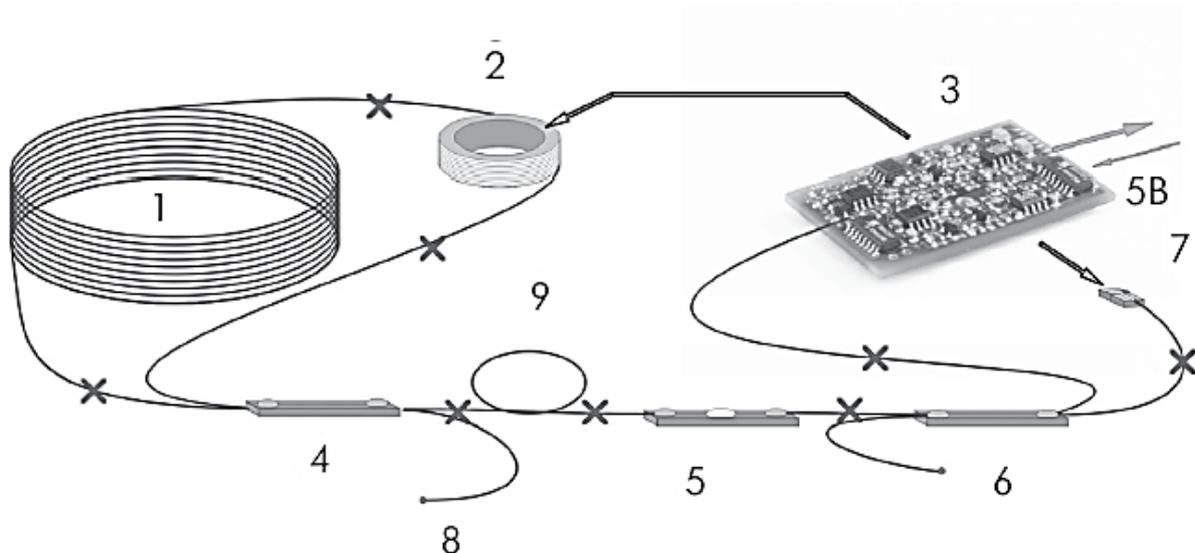


Рис. 4. Структура и взаимосвязь элементов ВОГ: 1 – оптический контур (катушка с намотанным оптическим волокном), 2 – пьезокерамический модулятор, 3 – блок электроники, 4 – первый ответвитель, 5 – поляризатор, 6 – второй ответвитель, 7 – СЛД модуль (полупроводниковый лазерный излучательный диод), 8 – оптическая заклешка, 9 – пространственный (модовый) фильтр. Крестиками показаны места сварки оптического волокна

Оптический контур представляет собой, намотанное на катушку оптическое волокно. Диаметр волокна – 40мкм, длина от 100 метров до 2000 метров (для различных моделей ВОГ).

Полупроводниковый лазер является излучающим элементом, длина волны света порядка 0,85мкм.

Табл. Основные характеристики VG949P

Максимальная измеряемая угловая скорость, °/с	Для разных моделей от ±230 до ±300
Масштабный коэффициент, мВ/°/с	6
Стабильность масштабного коэффициента, % (стационарные условия, $1\sigma$ )	0,1
Стабильность нулевого сигнала, °/час (стационарные условия, $1\sigma$ )	20
Шум, градус/ $\sqrt{\text{час}}$	0,05
Полоса пропускания, Гц	0...1000
Масса, грамм (приблизительно)	55

Размер, мм	63×63×22
Энергопотребление, Ватт	1
Напряжение питания, В	+5±0,25
Время включения, с	0,02
Рабочий диапазон температур, °С	
Вибрации, g (в диапазоне частот 2 Гц ... 500 Гц)	2
Удар, g (в течение 1 мс)	90

*Метод измерения угловой скорости вращения Земли с помощью ВОГ.*

На рис. 5 схематично показана Земля и направление вектора угловой скорости её вращения. Лабораторная работа проводится в Туле (точка на рис. 5). Поэтому вектор угловой скорости наклонен относительно линии местной вертикали на угол  $(90 - \phi)$ .

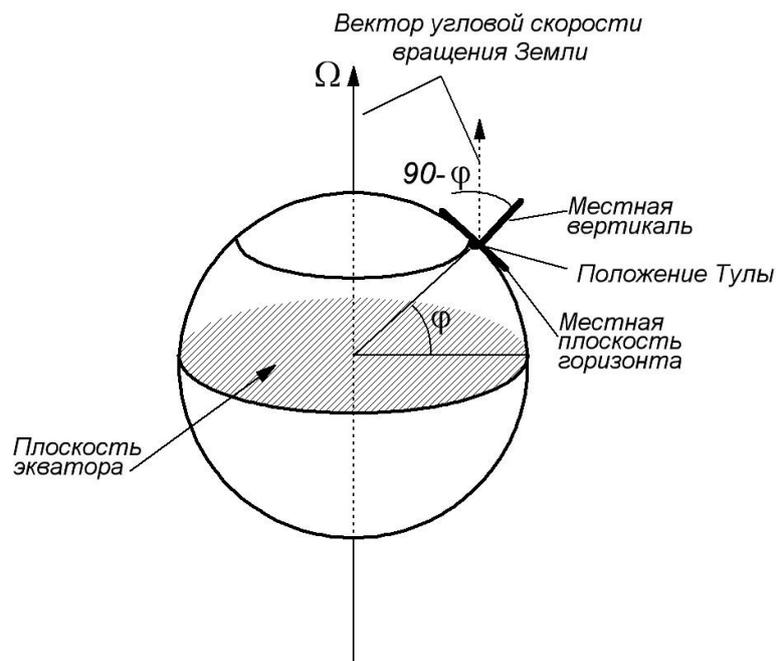


Рис. 5. К пояснению метода измерения угловой скорости вращения Земли

Для измерения угловой скорости необходимо направить измерительную ось ВОГа вдоль вектора угловой скорости вращения Земли. Поэтому её необходимо расположить в плоскости меридиана и наклонить на угол  $(90 - \phi)$  от местной вертикали в сторону Севера.

Для места проведения лабораторной работы географическая широта равна  $\phi = 54,2^\circ$ . Угловая скорость вращения Земли равна  $\Omega_3 = 15$  градус/ч.

### Описание лабораторной установки

Для измерения угловой скорости Земли используется один из ВОГ, установленный в БИНС (см. лабораторную работу «Изучение принципа функционирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем»).

Схема расположения ВОГ в БИНС, а также обозначение измерительных осей показаны на рис. 6.

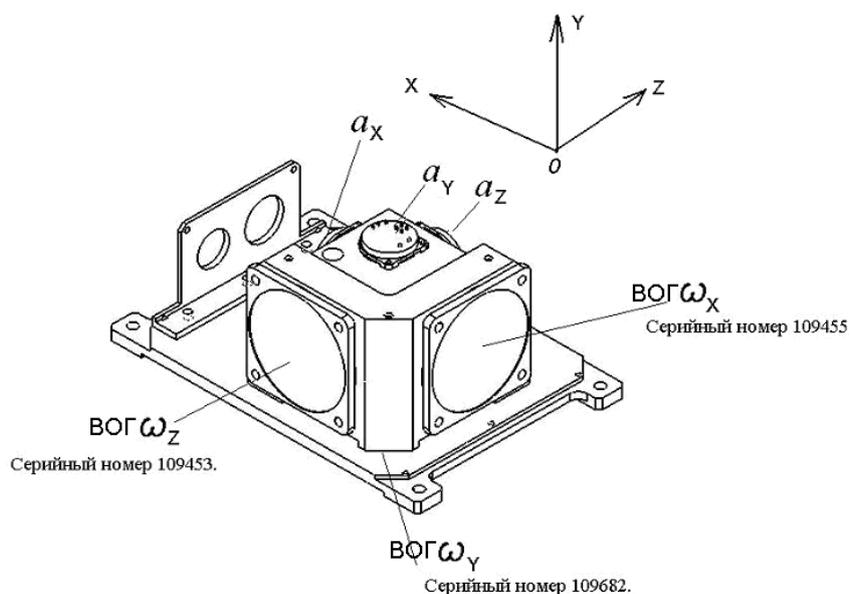
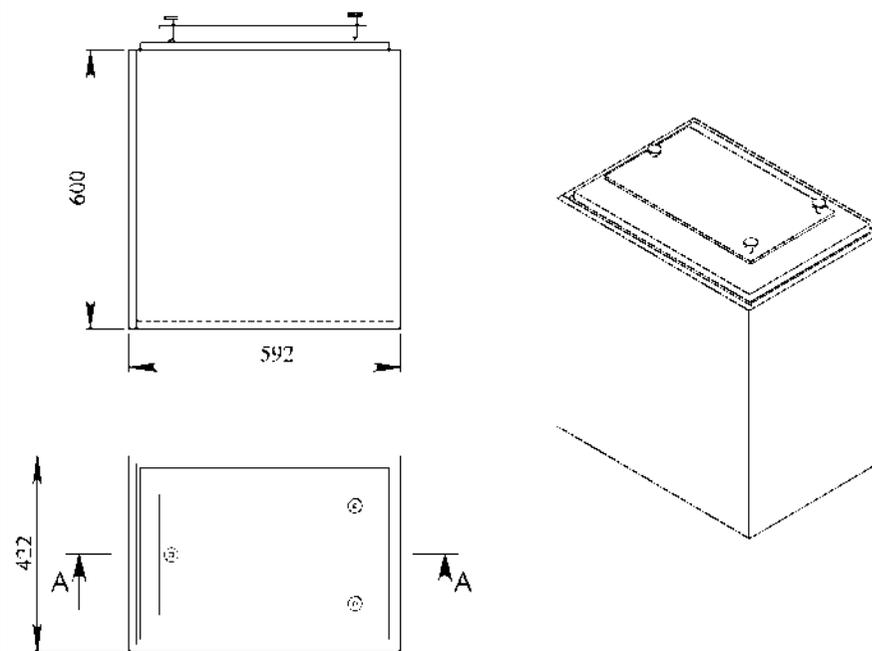
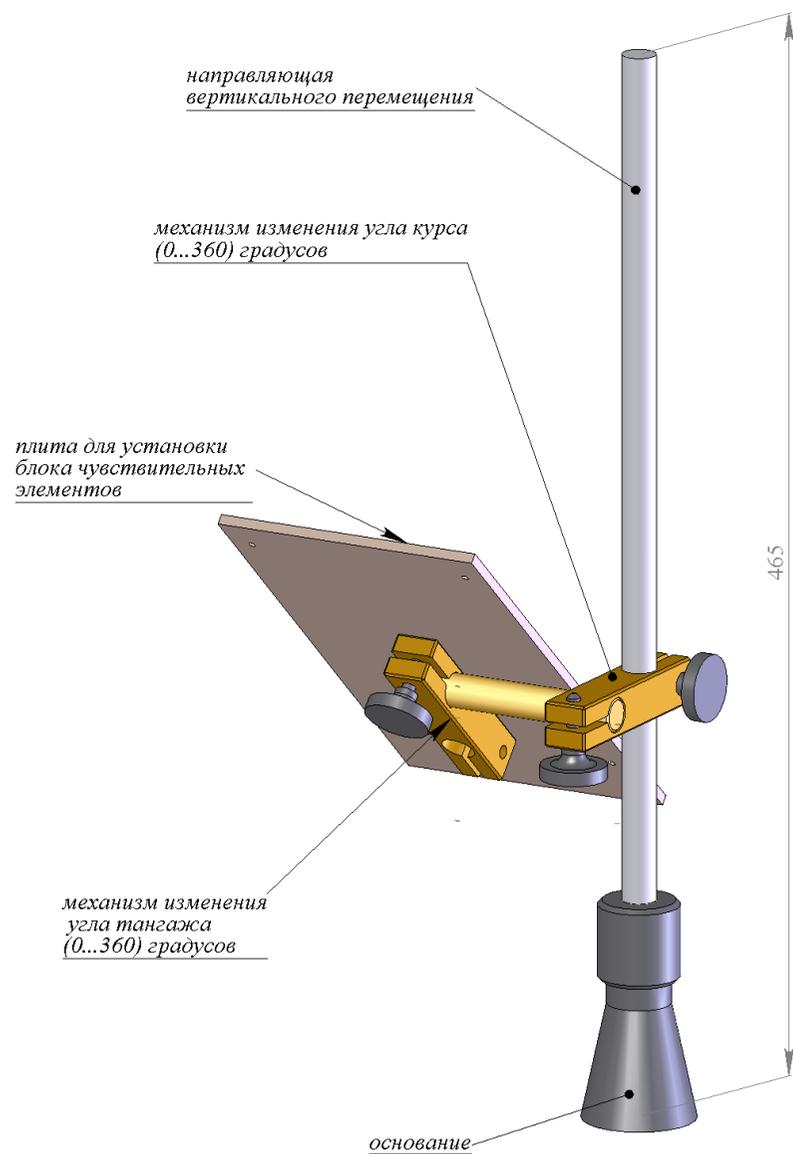


Рис. 6. Схема расположения ВОГ в БИНС, обозначение измерительных осей

Для измерения угловой скорости вращения Земли используется ВОГ с осью чувствительности  $OY$ . Для организации измерений используется установочное приспособление и виброизолирующая тумба, показанные на рис. 7. Установочное приспособление располагается на виброизолирующей тумбе (для организации виброизоляции ВОГ). С помощью установочного приспособления изменяется положение измерительной оси  $OY$  так, чтобы направить угловую скорость вращения Земли сначала вдоль, а затем против оси. Углы отклонения БИНС относительно плоскости горизонта измеряются с помощью механического квадранта, а относительно плоскости меридиана – жидкостного компаса.



- Примечания:
1. Испытываемая аппаратура устанавливается на алюминиевую пластину.
  2. Регулирующие винты позволяют изменять угол наклона алюминиевой пластины в плоскости горизонта.
  3. Стальная плита лежит на песке, не касаясь стен короба.
  4. Масса наполнителя, примерно, 220кг.
  5. Тумба должна устанавливаться на ровный бетонный пол.

Рис. 7. Установочное приспособление и виброизолирующая тумба

При обработке сигналов необходимо учесть, что сигнала ВОГа с осью чувствительности  $OY$  подключен к каналу №2 АЦП (всего 8 каналов, нумерация с №0 по №7).

Вычисление угловой скорости в размерности градус/ч по сигналу ВОГ производится по формуле:

$$\Omega_{\text{ВОГ}} = (N - \text{Null}) \cdot K, \quad (7)$$

где  $N$  – показания ВОГ в машинных кодах (результат оцифровки сигнала ВОГ с помощью АЦП);  $\text{Null}$  – нулевой сигнал гироскопа в размерности машинных кодов;  $K$  – коэффициент передачи ВОГ.

Для данного ВОГ и АЦП:

$$\text{Null} = 80; K = \frac{3600 \cdot 10000}{2^{23} \cdot 32,508125}.$$

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1) Установить блок инерциальных чувствительных элементов на установочное приспособление на виброизолирующей тумбе.

2) С использованием приспособления и механического квадранта выставить блок так, что бы оси  $OX$  и  $OZ$  лежали в плоскости горизонта. С использованием жидкостного компаса и приспособления установить ось  $OX$  блока на Север. С использованием приспособления и механического квадранта повернуть блок вокруг оси  $OZ$  (опустить ось  $OX$  относительно плоскости горизонта) на угол  $-(90 - \phi)$ .

В результате: оси  $OX$  и  $OY$  лежат в плоскости меридиана, ось  $OZ$  направлена на восток, ось  $OY$  направлена в сторону Севера и поднята над плоскостью горизонта на угол  $\phi$ . При такой установке блока угловая скорость вращения Земли  $\Omega$  направлена по оси  $OY$ .

3) Выполнить конечную стабилизацию АЦП в следующей последовательности:

- убедиться в отсутствии расположенных рядом нагревательных приборов, охлаждающих потоков воздуха и прямых солнечных лучей, падающих на системный блок негабаритного макетного образца;

- включить электропитание компьютера (загрузить операционную систему);

- для прогрева системного блока выждать не менее 1 часа;

- запустить программу Saver2.exe, обеспечивающую функционирование

АЦП; с использованием программы задать следующий режим работы АЦП: количество опрашиваемых каналов 8 (с нулевого по седьмой), частота дискретизации 102,4кГц, время сбора данных 40 минут;

- запустить преобразование входных аналоговых сигналов; после окончания работы АЦП выйти из программы Saver2.exe;

- не позднее чем через 20 секунд после окончания работы АЦП из среды BorlandDelphi 7 запустить программу BINS\_COUNTER.dpr и с её помощью провести два цикла работы АЦП продолжительностью 150 секунд каждый; промежутки времени между циклами также не более 20 секунд.

Результат конечной стабилизации контролировать по виду графиков изменения преобразованных аналоговых сигналов (получаемых на дисплее при выполнении программы BINS\_COUNTER.dpr). Если максимальный дрейф сигналов за 150 секунд менее 100мкВ, считать конечную стабилизацию выполненной. В противном случае повторить два цикла работы АЦП продолжительностью 150 секунд каждый.

4) Включить электропитание блока чувствительных элементов.

5) Примерно через 10-20 секунд после включения электропитания с использованием программы BINS\_COUNTER.dpr начать запись выходных сигналов блока чувствительных элементов. Для этого в программе BINS\_COUNTER.dpr установит следующие параметры:

поток приема – АЦП;

поток обработки – 1;

имя файла для сохранения фильтрованных данных – «1+.rbit»;

время записи – 150 секунд.

В течение записи сигналов необходимо, чтобы вибрации и удары, действующие со стороны фундамента на блок, были минимальны.

6) С использованием программы data\_to\_xls.exe преобразовать файл «1+.rbit» в файл «1+\_0.txt», имеющий удобную для дальнейшей обработки данных кодировку.

7) С использованием программы MicrosoftExcel открыть файл с данными. С использованием стандартных функций найти среднее значение сигнала ВОГ, ось чувствительности которого направлена по оси  $OY$ .

8) Рассчитать измеренное значение угловой скорости вращения Земли по формуле 7. При этом в формулу следует подставить среднее значение сигнала ВОГ.

## **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Результаты выполнения лабораторной работы: график сигнала ВОГ, среднее значение сигнала ВОГ и измеренная величина угловой скорости вращения Земли.
4. Выводы по проделанной работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Поясните эффект Саньяка (вывод уравнения для фазы Саньяка).
2. Приведите и разьясните состав и принцип функционирования ВОГа.
3. Поясните метод измерения угловой скорости вращения Земли.
4. Приведите порядок действий при измерении угловой скорости вращения Земли с помощью ВОГ.
5. Объясните причины разницы измеренной величины угловой скорости вращения Земли и действительной.

## **Библиографический список**

1. Шереметьев А.Г. Волоконно-оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152.
2. <http://fizoptika.com>.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

### Изучение принципа функционирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа функционирования и основных характеристик бесплатформенной инерциальной навигационной системы.

#### Краткие теоретические сведения

Бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) предназначена для определения положения подвижного объекта относительно Земли (системой отсчета, относительно которой определяется положение, задаются исходя из условий конкретной задачи). В состав БИНС, как правило, входит два блока: блок инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ) и блок вычислителя (Цифровое вычислительное устройство, предназначенное для реализации алгоритмов решения навигационной задачи).

Типовая схема БИНС приведена на рис. 1:

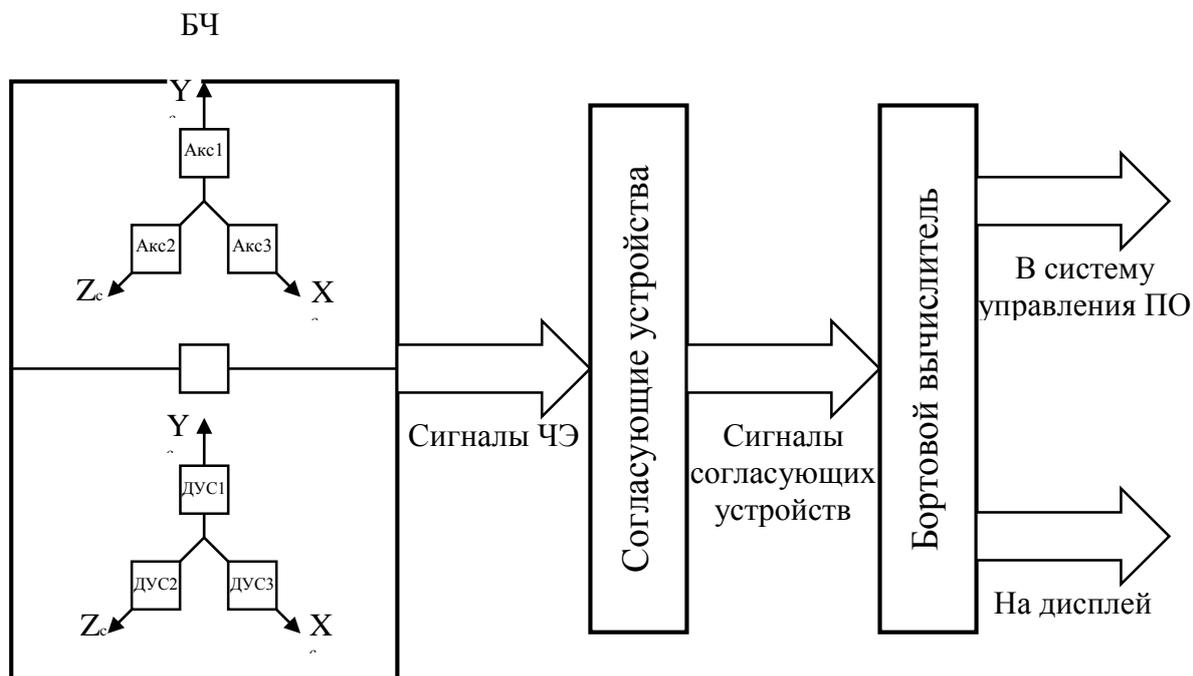


Рис. 1. Схема функционирования БИНС:

Акс – акселерометр; ДУС – датчик угловой скорости; ЧЭ – чувствительные элементы;  
OX<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub> – система координат жестко связанная с объектом

Блок чувствительных элементов предназначен для измерения параметров движения объекта, т.е. трех проекций угловой скорости вращения объекта на

оси связанной с ним системы координат и трех проекций линейного ускорения на те же оси, а также для измерения температуры в месте расположения инерциальных чувствительных элементов.

Согласующие устройства предназначены для преобразования сигналов поступающих от инерциальных чувствительных элементов, их фильтрации и т.п.

Бортовой вычислитель предназначен для обработки сигналов поступающих от согласующих устройств и реализации алгоритмов решения навигационной задачи.

На рис. 2 приведены примеры БИНС, выпускаемых в РФ и зарубежных странах.



БИНС КомпаНав 2 (РФ)



Блок чувствительных элементов Crista для малогабаритной БИНС (США)

Рис. 2. Примеры БИНС и их элементов

В бортовом вычислите с использованием специализированных алгоритмов происходит вычисление угловой ориентации объекта относительно базовой системы координат (например, углы курса, тангажа и крена) и определение координат в любой системе координат (например, широты, долготы и высоты).

Вычисление производится на основе сигналов гироскопических датчиков угловой скорости и акселерометров. По сигналам первых (путем интегрирования значений угловых скоростей) вычисляется ориентация объекта. С учетом полученных параметров ориентации производится пересчет сигналов акселерометров, в базовую систему координат. Далее сигналы акселерометров

дважды интегрируются, в результате переделывается перемещение объекта в этой базовой системе координат.

### Описание лабораторной установки

В качестве лабораторной установки используется БИНС, созданная на кафедре «Приборы и биотехнические системы» научным коллективом под руководством В.В. Савельева. Данная система разработана на основе волоконно-оптических гироскопов ВГ-949П и компенсационных акселерометров ДА-11.

На рис. 3 и 4 приведен внешний вид блока чувствительных элементов системы без кожуха и с одетым кожухом.

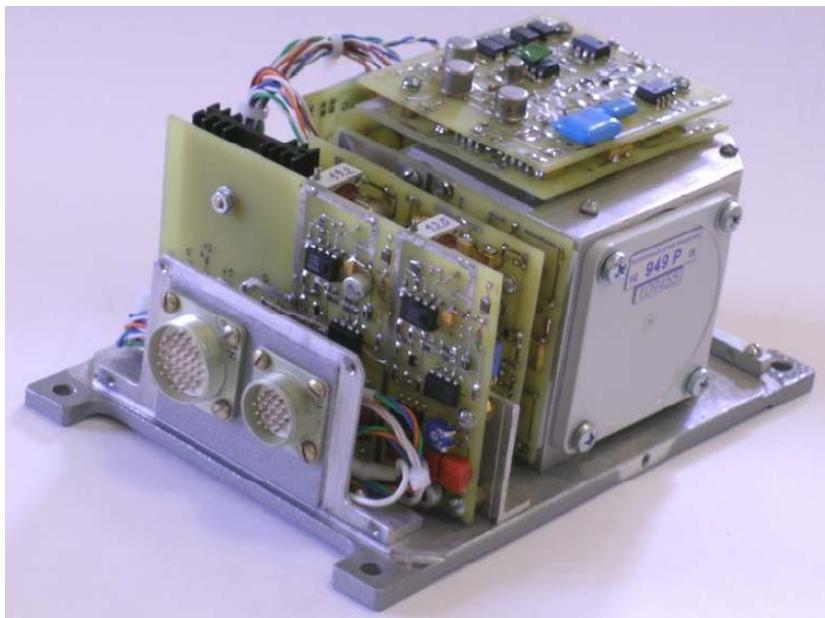


Рис. 3. Блок чувствительных элементов без кожуха



Рис. 4. Блок чувствительных элементов с надетым кожухом

Помимо блока чувствительных элементов в состав БИНС входит блок питания и вычислитель со встроенной в него платой АЦП и программным обеспечением. Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 5.

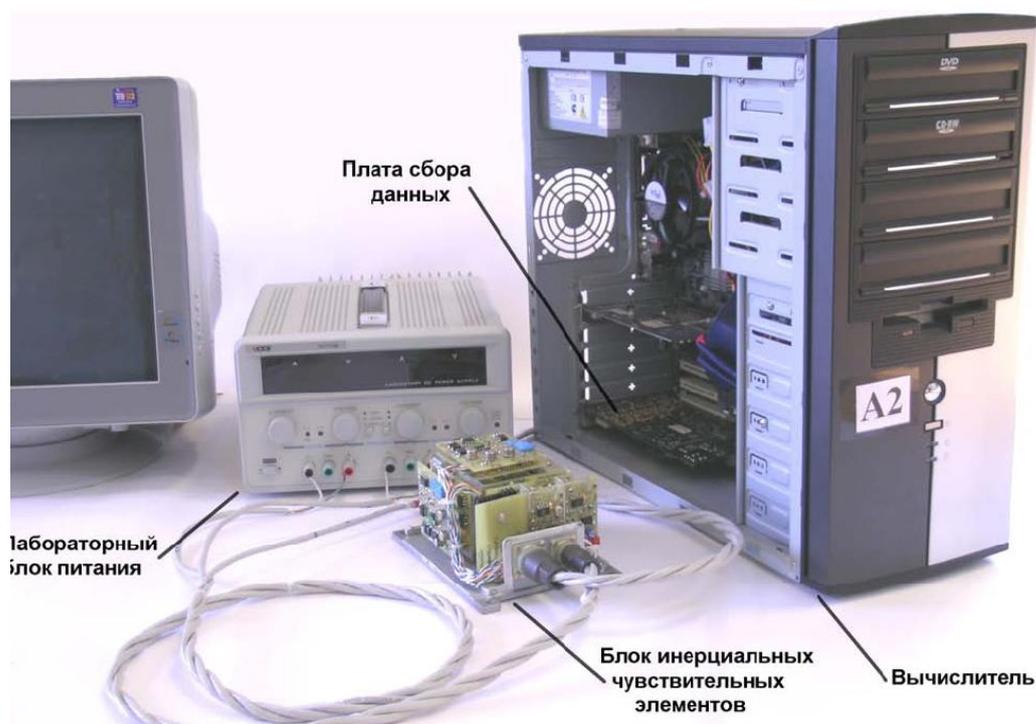


Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки

Программное обеспечение реализовано в системе программирования Delphi и представлено в виде программного продукта «Bins\_counter».

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Собрать лабораторную установку.
2. Произвести конечную стабилизацию параметров системы. Для этого:
  - убедиться в отсутствии расположенных рядом нагревательных приборов, охлаждающих потоков воздуха и прямых солнечных лучей, падающих на системный блок негабаритного макетного образца;
  - включить электропитание компьютера (загрузить операционную систему);
  - для прогрева системного блока выждать не менее 1 часа;
  - запустить программу Saver2.exe, обеспечивающую функционирование АЦП; с использованием программы задать следующий режим работы АЦП: количество опрашиваемых каналов 8 (с нулевого по седьмой), частота дискретизации 102,4кГц, время сбора данных 40 минут;

- запустить преобразование входных аналоговых сигналов; после окончания работы АЦП выйти из программы Saver2.exe;

- не позднее чем через 20 секунд после окончания работы АЦП из среды BorlandDelphi 7 запустить программу BINS\_COUNTER.dpr и с её помощью провести два цикла работы АЦП продолжительностью 150 секунд каждый; промежуток времени между циклами также не более 20 секунд.

Результат конечной стабилизации контролировать по виду графиков изменения преобразованных аналоговых сигналов (получаемых на дисплее при выполнении программы BINS\_COUNTER.dpr). Если максимальный дрейф сигналов за 150 секунд менее 100мкВ, считать конечную стабилизацию выполненной. В противном случае повторить два цикла работы АЦП продолжительностью 150 секунд каждый.

3. Установить блок чувствительных элементов на неподвижное основание.

4. С использованием программы «BINS\_COUNTER.dpr» произвести решение навигационной задачи, при этом блок чувствительных элементов должен быть неподвижным.

5. С использованием встроенных функций программы оценить и внести в отчет графики погрешностей системы в определении: угловых скоростей, линейных ускорений в связанной системе координат, линейных ускорений и скоростей в базовой системе координат, угловой ориентации и линейных координат.

6. Не менее чем через 2 часа, после отключения питания блока чувствительных элементов повторить пункт 2.

7. Установить блок чувствительных элементов на трехкомпонентный динамический стенд.

8. С использованием программы «BINS\_COUNTER.dpr» произвести решение навигационной задачи, при этом блок чувствительных элементов должен качаться на трехкомпонентном динамическом стенде.

9. С использованием встроенных функций программы оценить и внести в отчет графики погрешностей системы в определении: угловых скоростей, линейных ускорений в связанной системе координат, линейных ускорений и скоростей в базовой системе координат, угловой ориентации и линейных координат.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Сведения о лабораторной установке.
4. Результаты выполнения лабораторной работы: измеренные и вычисленные параметры бесплатформенной инерциальной навигационной системы.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните область применения, достоинства и недостатки бесплатформенных инерциальных навигационных систем.
2. Поясните структуру бесплатформенной инерциальной навигационной системы.
3. Поясните принцип действия бесплатформенной инерциальной навигационной системы.
4. Поясните вид графиков погрешностей в определении угловой ориентации.
5. Поясните вид графиков погрешностей в определении координат.

### **Библиографический список**

1. Анучин О. Н. Интегрированные системы для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцеv; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. - 2-е изд. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 392 с.
2. Захарин М. И. Кинематика инерциальных систем навигации/ М. И. Захарин, Ф. Ш. Захарин. – М.: Машиностроение, 1968.– 236 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

### Изучение физических основ спутниковой радионавигационной системы

*Цель лабораторной работы* – изучение принципа действия спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС и/или GPS.

#### Краткие теоретические сведения

*История создания спутниковых радионавигационных систем.*

В настоящее время, как правило, говорится и пишется о двух системах: американской GPS (Global Positioning System, известной также под названием NAVSTAR) и российской ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система). Иногда упоминаются разрабатываемые европейцами «Galileo» и Китаем «Бэйдоу». **Однако данные системы – это уже второе поколение спутниковых радионавигационных систем (СРНС).**

В начале было научно обоснованное предложение применения радиоастрономических методов для самолетовождения, выдвинутое коллективом под руководством проф. В.С. Шебшаевича (из Ленинградской военно-воздушной инженерной академии им. А.Ф. Можайского) еще в 1957-м году. Дальнейшее развитие этих работ с привлечением специалистов многих научных институтов и предприятий всего Советского Союза позволило в 1963-м году перейти уже к опытно-конструкторским работам по созданию первой отечественной СРНС, получившей в дальнейшем наименование «Цикада».

Несмотря на огромный объем требуемых исследований и работ первый навигационный спутник был успешно выведен в космос уже в конце 1967-го года. Однако до сдачи в эксплуатацию уже готовой системы первого поколения прошло еще 12 лет: в 1979-м году сдана в эксплуатацию СРНС первого поколения «Цикада». Космический сегмент этой системы состоял всего из 4-навигационных спутников, вращающихся вокруг Земли по круговым орбитам на высотах порядка 1000 км. В настоящее время по имеющимся данным система «Цикада» после ряда модернизаций и доработок функционирует в составе единой службы поиска и спасения терпящих бедствие «Коспас» объединенной с американо-франко-канадской системой «Сорсат».

Как это часто бывает, еще не завершились работы по созданию системы первого поколения, а уже началась разработка системы второго поколения, получившей в последствии наименование ГЛОНАСС. В 1982-м году запущен

первый навигационный спутник новой системы. В 1995-м году завершено развертывание новой системы до её штатного состава, т.е. на круговую орбиту вокруг Земли высотой порядка 20000 км выведены 24 спутника. Одной из проблем эксплуатации подобных систем является необходимость поддержания на орбите требуемого количества спутников, которые имеют ресурс 3...5 лет. В период финансовых проблем Россия сократила объем необходимых работ, и группировка сократилась к концу 1998-го года до 16 спутников (пять из которых имели сроки службы порядка 4 лет). Информацию о текущем положении дел в системе ГЛОНАСС можно найти на официальном портале Информационно-аналитического центра Федерального космического агентства <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>.

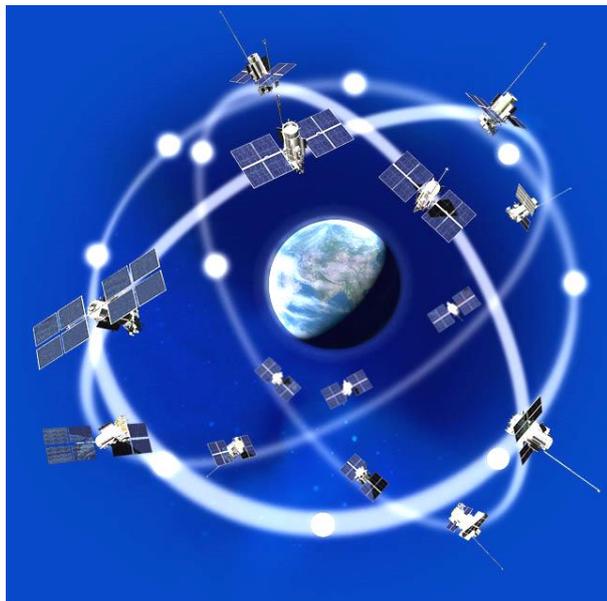
Американские СРНС также имеют весьма внушительную историю. Система первого поколения, под наименованием «Transit», введена в эксплуатацию в 1964-м году, т.е. на 15 (!) лет раньше системы «Цикада» и это несмотря на то, что теоретические работы начаты практически одновременно с нами в 1957-м году. В то время, после запуска первого искусственного спутника Земли, перед Лабораторией прикладной физики университета Дж. Гопкинса была поставлена задача слежения за советским спутником. «Отцом» системы «Transit» считается директор Лаборатории проф. Р. Кершнер. Система второго поколения GPS введена в строй в 1993-м году (тут наше отставание по времени не столь глобально). Информацию о текущем положении дел в GPS также можно найти на указанном выше портале Информационно-аналитического центра.

#### *Состав спутниковых радионавигационных систем.*

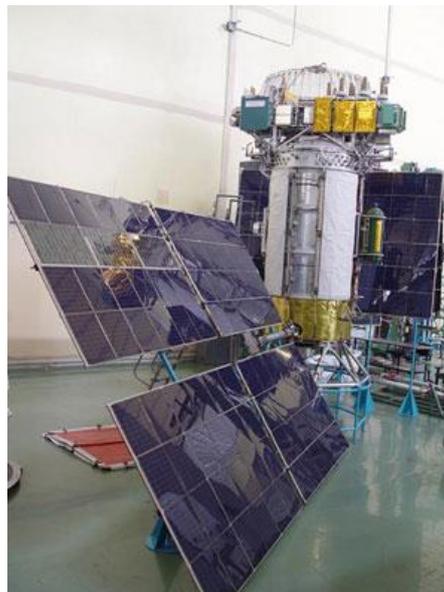
В состав СРНС (как ГЛОНАСС, так и GPS) входит три подсистемы:

1. *Подсистема космических аппаратов* – состоит из определенного числа навигационных спутников, расположенных на круговых орбитах вокруг Земли. Штатное число спутников равно 24, хотя для гарантированной видимости потребителем не менее 4-х спутников достаточно иметь на орбите 18 спутников. Высота орбит 20000 км, ГЛОНАСС чуть «пониже», GPS – «повыше». Такая высота считается оптимальной для перекрытия сигналом одного спутника как можно большей поверхности Земли (примерно половина Земного шара). В системе ГЛОНАСС спутники располагаются в трех орбитальных плоскостях по восемь аппаратов в каждой (рис. 1, а). Число

орбитальных плоскостей у системы GPS – шесть по четыре спутников в каждой. Внешний вид навигационного спутника нового поколения ГЛОНАСС-М (срок службы порядка 5 лет) показан на рис. 1, б.



а)\*



б)\*\*

Рис. 1. К пояснению подсистемы космических аппаратов СРНС ГЛОНАСС:

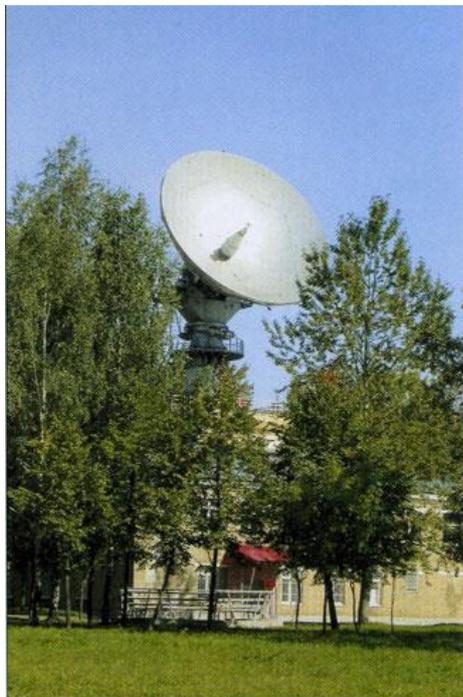
\* – источник рисунка: <http://glonass.npopm.ru/>

\*\* – источник рисунка: <http://www.vnske.ru/news/>

Навигационные спутники можно назвать базой СРНС, именно они излучают радиосигналы, по которым приемная аппаратура определяет местоположение потребителя, недаром в общепринятой аббревиатуре СРНС на первом месте стоит слово «спутниковая».

2. *Наземный командно-измерительный комплекс* – подсистема контроля и управления, предназначена для контроля правильности функционирования, управления и информационного обеспечения СРНС. В состав данной подсистемы входят расположенные на территории Европы и Азии (а для системы GPS по всему миру) различные станции и пункты слежения и управления. Это мозг и сердце СРНС. Достаточно сказать, что без контроля спутниковой группировки с Земли СРНС останется работоспособной только в течение нескольких дней (в перспективе до 6 месяцев). Для примера ниже показана контрольно-измерительная станция (рис. 2, а) системы ГЛОНАСС, одна из задач, решаемых такими станциями – «закладка» в бортовые ЭВМ спутников массивов служебной информации и команд управления бортовыми

системами. Для обеспечения высокоточного определения параметров движения навигационных спутников применяют лазерные дальномеры (рис. 2, б), устанавливаемые на кванто-оптических станциях.



а) \*



б) \*\*

Рис. 2. К пояснению подсистемы наземных командно-измерительных комплексов СРНС ГЛОНАСС:

\* – источник рисунка: <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/vehi/04.html>

\*\* – источник рисунка: <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/nk/1999/2/1999-2b.html>

3. *Приемная аппаратура потребителей* – огромное разнообразие самых различных приборов, предназначенных для приема, обработки и отображения информации СРНС. Очевиден прогресс в данном сегменте, для сравнения ниже показана приемная аппаратура СРНС первого поколения «Цикада» (1976-й год) (рис. 3, а) и аппаратура системы второго поколения GPS (2008-й год) (рис. 3, б и в).



Рис. 3. Примеры приемной аппаратуры:

\* – источник рисунка: <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/vehi/04.html>

\*\* – источник рисунка: <http://youarehere.ru/etries/category/receivers>

### Принцип функционирования.

В настоящее время разработано множество методов, с помощью которых можно определять координаты и скорость движения по сигналам навигационных спутников. В доступной литературе, как правило, описывается не менее восьми методов (рис. 4).

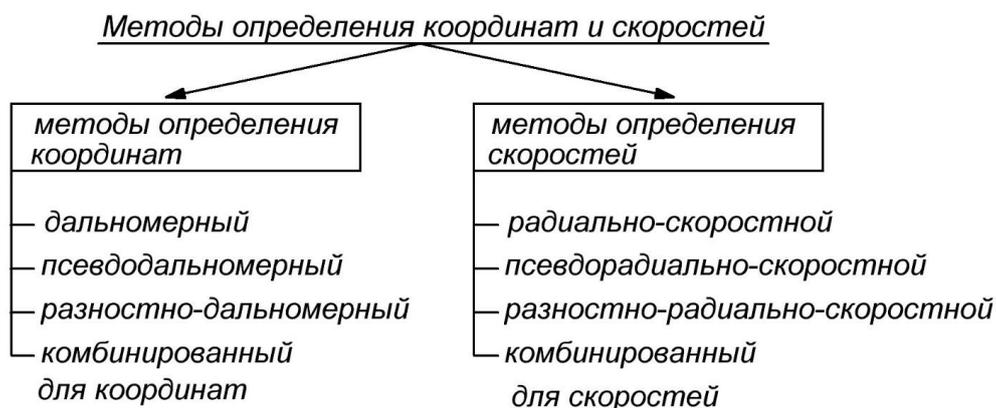


Рис. 4. Методы определения координат и скоростей

Для получения общего представления о принципах работы СРНС достаточно рассмотреть простейшие методы, т.е. дальномерный (для координат) и радиально-скоростной (для скоростей).

Прежде чем пояснять суть методов необходимо определиться с системой координат, относительно которой определяется местоположение потребителя. В качестве базовой в приемной аппаратуре СРНС используется геоцентрическая подвижная система координат OXYZ : ПЗ-90 (Планета Земля) в ГЛОНАСС и WGS-84 (WorldGeodeticSystem) в GPS. Обе системы координат (рис. 5) имеют начало (точка O), расположенное в центре Земли, одна ось (OZ)

направлена вдоль оси суточного вращения Земли, вторая (OX) – по линии пересечения плоскости экватора и Гринвичского меридиана, третья (OY) дополняет систему координат до правой.

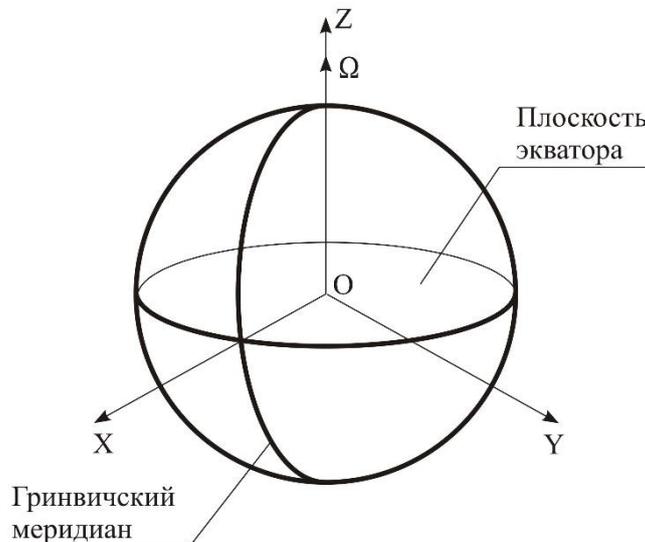


Рис. 5. К пояснению геоцентрических подвижных систем координат ПЗ-90 и WGS-84 ( $\Omega$  – вектор скорости суточного вращения Земли)

---

*Справочно: в современной приемной аппаратуре имеется возможность выбора необходимой потребителю системы координат.*

---

#### Дальномерный метод определения координат

Дальномерный метод (как, в общем-то, и другие) основан на измерении дальности  $D_i$  между  $i$ -м навигационным спутником и потребителем. Дальность  $D_i$  можно определить, зная время прохождения радиосигнала от спутника до потребителя:

$$D_i = c \cdot \tau_i, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения радиосигнала (скорость света),  $\tau_i$  – время прохождения радиосигнала от спутника до потребителя.

Для измерения  $\tau_i$  необходимо знать момент времени, в который произошло излучение радиосигнала спутником и момент времени приема сигнала потребителем. Информация о первом моменте времени содержится в радиосигнале, излучаемом спутником. Для этого на навигационном спутнике установлен высокостабильный бортовой стандарт частоты и времени. Момент времени приема определяется самой приемной аппаратурой потребителя.

Разница этих моментов времени и равна  $\tau_i$ .

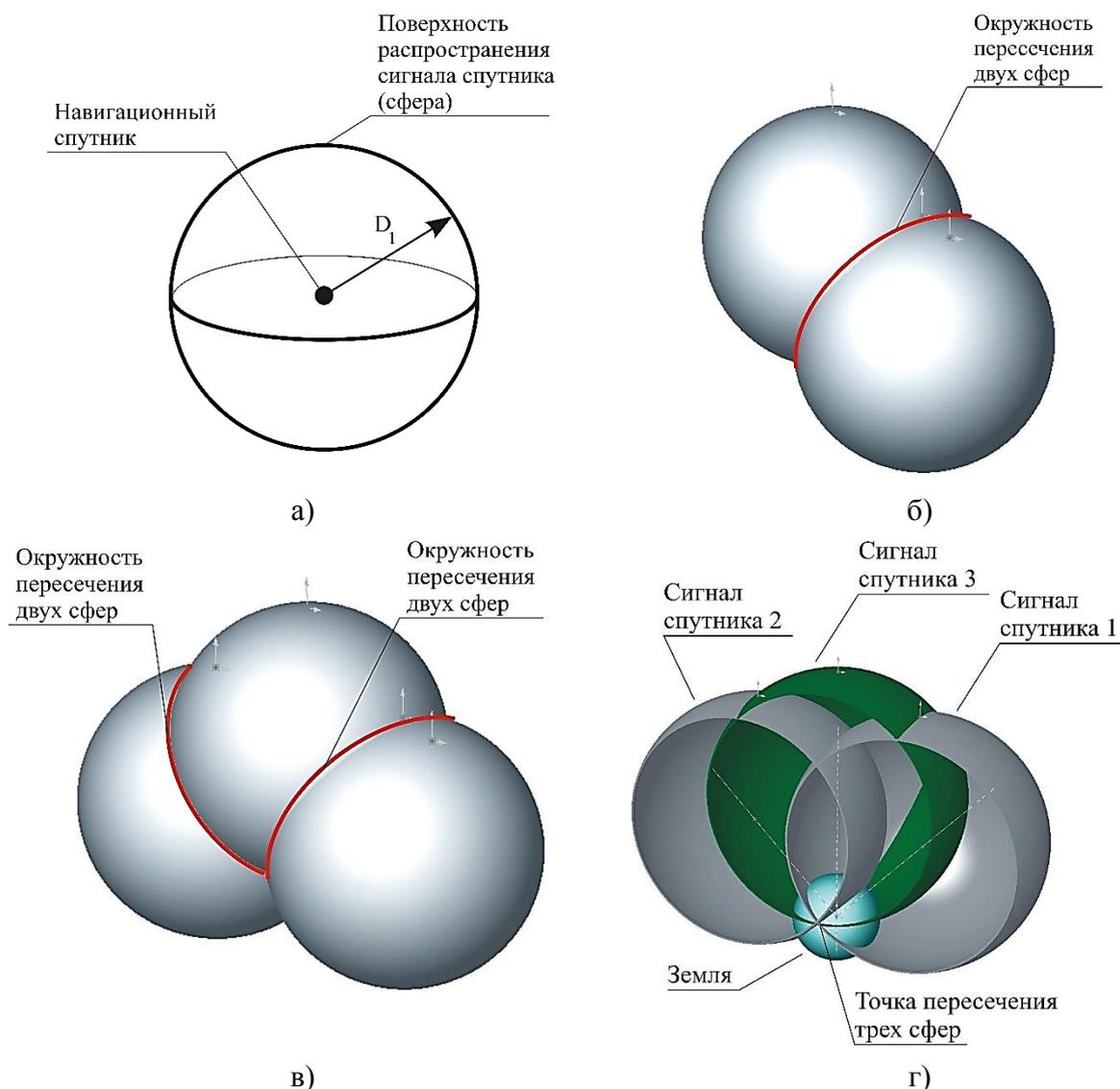


Рис. 6. К пояснению дальномерного метода определения координат

Суть дальномерного метода сначала поясняется с использованием элементарной геометрии (рис. 6). Информация о дальности  $D_1$  позволяет определить местоположение потребителя, как его нахождение в любой точке на поверхности сферы с радиусом  $D_1$  (рис. 6, а). Если имеются радиосигналы от двух навигационных спутников, т.е. информация о дальностях  $D_1$  и  $D_2$ , то координаты потребителя соответствуют его положению на линии пересечения двух сфер, т.е. в любой точке на окружности (рис. 6, б). При наличии еще и информации от третьего спутника, т.е. при наличии  $D_3$ , координаты потребителя соответствуют одной из двух точек, образованных в результате

пересечения двух окружностей (трех сфер) (рис. 6, в и г). Для однозначного определения координат потребителя необходима дополнительная информация, например, знание, что приемная аппаратура не может находиться глубоко под земной поверхностью или высоко в атмосфере (аппаратура для автомобилей, персональные навигаторы и т.п.).

Дальномерный метод определения координат можно пояснить не только геометрически, но и при помощи несложных математических выражений.

Дальность до  $i$ -го спутника соответствует радиусу сферы, уравнение которой можно записать в виде:

$$D_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad (2)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты потребителя в геоцентрической подвижной системе координат,  $X_i, Y_i, Z_i$  – координат  $i$ -го навигационного спутника в той же системе координат.

Координаты спутника  $X_i, Y_i, Z_i$  определяются станциями наземного командно-измерительного комплекса, периодически передаются с Земли на борт каждого спутника и далее транслируются им в составе своего радиосигнала всем потребителям.

В уравнении (2) имеется три неизвестных величины – координаты потребителя. Поэтому для их определение необходимо составить три подобных уравнения, т.е. необходимо знать дальности до трех навигационных спутников и координаты этих спутников. А дальше необходимо решить систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} D_1 = \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2} \\ D_2 = \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2} \\ D_3 = \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2} \end{cases} \quad (3)$$

Ввиду нелинейности уравнений (наличие квадратов разниц координат), по каждой координате  $X, Y, Z$  имеется два решения, т.е. имеется два набора координат, соответствующие двум возможным точкам местоположения потребителя. Для нахождения однозначных координат потребителя, как и было показано выше, необходима дополнительная информация. Например, для объектов перемещающихся по поверхности Земли (автомобили, пешеходы, железнодорожный и морской транспорт и т.п.) четвертым уравнением может служить равенство:

$$R_{\text{Земли}}^2 = X^2 + Y^2 + Z^2, \quad (4)$$

где  $R_{\text{Земли}}$  – радиус Земли.

Существенным недостатком дальномерного метода является зависимость погрешностей определения координат, от ошибок в измерении времени прохождения радиосигнала от спутника до потребителя ( $\tau_i$ ), которые обусловлены несинхронностью высокоточных спутниковых часов и относительно грубых часов приемной аппаратуры. Например, ошибка в измерении  $\tau_i$  на уровне  $10^{-8}$  секунды приводит к погрешности определения местоположения потребителя на (10...15) метров. Для уменьшения погрешностей для определения координат применяются методы, позволяющие оценить несинхронность часов и учесть её при определении координат (смотри рис. 4), но при этом необходима информация от четвертого спутника.

---

*Справочно: проблема взаимной синхронизации часов всех навигационных спутников, входящих в состав орбитальной группировки, а также синхронизации часов спутников и часов приёмной аппаратуры потребителей является одной из ключевых в вопросе создания точных СРНС.*

---

*Радиально-скоростной метод определения скорости.*

Для пояснения сути данного метода продифференцируем выражение (1) по времени, в итоге получим:

$$\dot{D}_i = \frac{(X_i - X) \cdot (\dot{X}_i - \dot{X}) + (Y_i - Y) \cdot (\dot{Y}_i - \dot{Y}) + (Z_i - Z) \cdot (\dot{Z}_i - \dot{Z})}{D_i}, \quad (5)$$

где  $\dot{D}_i$  – скорость изменения дальности до  $i$ -го спутника,  $\dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i$  – скорость  $i$ -го спутника в геоцентрической подвижной системе координат,  $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$  – искомые проекции вектора скорости потребителя на оси геоцентрической подвижной системы координат.

Из выражения (5) видно, что для определения скорости потребителя, т.е. проекций вектора скорости  $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ , необходимо знать:

- координаты потребителя  $X, Y, Z$  (могут быть определены, например, рассмотренным выше дальномерным методом);
- параметры движения, как минимум, трех навигационных спутников (

$i = 1, 2, 3$ ): координаты  $X_i, Y_i, Z_i$ , скорости  $\dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i$  и дальность до потребителя  $D_i$  (передаются каждым спутником в составе своего радиосигнала);

- скорость изменения дальности, как минимум, до трех навигационных спутников ( $i = 1, 2, 3$ ), т.е.  $\dot{D}_i$ .

Скорость изменения дальности определяется с использованием метода Доплера, заключающимся в изменении (повышении или уменьшении) частоты радиоволн, регистрируемой приемной аппаратурой, в зависимости от направления и значения скорости относительного движения потребителя и навигационного спутника.

---

*Справочно: подробно о методе Доплера можно узнать, например, из курса лекций О.Е. Акимова: <http://sceptic-ratio.narod.ru/fi/Doppler.htm>*

---

В соответствии с методом Доплера скорость изменения дальности до  $i$ -го навигационного спутника равна:

$$\dot{D}_i = \frac{(f_{i\text{пр}} - f_i)}{f_i} \cdot c, \quad (6)$$

где  $f_i$  – частота в Герцах радиосигнала  $i$ -го навигационного спутника,  $f_{i\text{пр}}$  – частота того же сигнала, но измеренная приемной аппаратурой потребителя.

Таким образом, измерив частоты радиосигналов, принятых от трех спутников, по выражению (6) можно определить скорости изменения дальности до них. Далее для определения всех трех проекций скорости потребителя необходимо решить систему из трех уравнений вида (5).

Существенным недостатком радиально-скоростного метода является зависимость погрешностей определения скорости от ошибок определения координат, от погрешностей измерения приемной аппаратурой частоты и от нестабильности частоты радиосигнала спутников.

### **Описание лабораторной установки**

В состав лабораторной установки входит приемная аппаратура GPS-12. Данный приемник, являясь туристическим вариантом приемной аппаратуры, способен автономно работать от батареек или аккумулятора. Антенна приемника является встроенной. Приемник имеет жидкокристаллический

экран, на котором отображается информация: о количестве спутников, сигналы которых удалось получить приемнику, о координатах объекта, о скорости передвижения объекта и ряд другой информации, носящей вспомогательный характер (используемая система координат, направление движения и т.п.).

Приемник может сохранять информацию о перемещении объекта в памяти. В дальнейшем данную информацию можно перенести в память ПЭВМ.

Лабораторная работа проводится вне помещения, на улице, т.к. устойчивый прием сигнала спутников внутри лаборатории не возможен.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Находясь на улице, включить приемную аппаратуру GPS-12.
2. По служебной информации, отображаемой на экране, следить за функционированием приемника по определению видимых спутников, сигналы которых доступны.
3. Измерить время выхода приемника на штатный режим работы.
4. После выхода приемника на штатный режим работы, находясь неподвижно с использованием встроенных функций приемника определить погрешности и скорость. Записать данные в течение 5 минут.
5. Так как при опыте скорость нулевая, то отличие показаний скорости от нулевого значения являются погрешностями приемника. Записать эти погрешности. Разброс координат от среднего за 5 минут значения так же является погрешностью приемника.
6. Повторить пункты 4 и 5 двигаясь примерно с постоянной скоростью.
7. Следить за показаниями приемника не только по координатам и скорости, но и по углу курса движения.
8. Определить временную задержку отображения информации о движении от реального времени.

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Основные сведения из теоретической части в том количестве, что необходимы для защиты лабораторной работы.
3. Результаты выполнения лабораторной работы: измеренные и вычисленные параметры приемной аппаратуры GPS-12.
4. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните структуру и состав СРНС.
2. Охарактеризуйте область применения, достоинства и недостатки СРНС.
3. Поясните дальномерный метод определения координат.
4. Поясните радиально-скоростной метод определения скорости.

### **Библиографический список**

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р. В. Бакитько [и др.]; под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. –3-е изд., перераб. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 268 с.

*Учебное издание*

АНТОНЕНКО Светлана Валентиновна  
БОГДАНОВ Максим Борисович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

**Учебно-методическое пособие  
Часть 2  
Элементы навигационных систем**