

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

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра проектирования информационно-компьютерных систем

**ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях

Часть 1

В. Ю. Серенков, А. О. Рак, В. В. Баранов

**Физические принципы преобразования неэлектрических
величин в электрические сигналы**

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве пособия для специальности
1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»*

Минск БГУИР 2015

УДК [621.317.39.084.2+004.056](076.5)

ББК 32.96-04я73+32.973.26-018.2я73

Д20

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра автоматизированных систем
управления производством учреждения образования
«Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол №8 от 07.03.2014 г.);

профессор кафедры радиоэлектроники
учреждения образования
«Минский государственный высший
радиотехнический колледж»,
доктор технических наук, профессор Ф. Д. Троян

Датчики электронных систем безопасности. Лабораторный практикум.
Д20 В 2 ч. Ч. 1: Физические принципы преобразования неэлектрических
величин в электрические сигналы : пособие / В. Ю. Серенков, А. О. Рак,
В. В. Баранов. – Минск : БГУИР, 2015. – 60 с. : ил.
ISBN 978-985-543-102-3 (ч. 1).

Содержит описание, методику, порядок выполнения и оформления пяти лабора-
торных работ.

Предназначено для студентов всех форм обучения.

УДК [621.317.39.084.2+004.056](076.5)
ББК 32.96-04я73+32.973.26-018.2я73

ISBN 978-985-543-102-3 (ч. 1)
ISBN 978-985-543-101-6

© Серенков В. Ю., Рак А. О.,
Баранов В. В., 2015
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Реостатные датчики.....	4
Лабораторная работа №2. Тензорезистивные датчики.....	11
Лабораторная работа №3. Терморезистивные датчики.....	22
Лабораторная работа №4. Емкостные датчики.	33
Лабораторная работа №5. Фотодатчики.	46

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №1

Реостатные датчики

Цель работы: изучение реостатных преобразователей, схем включения реостатного датчика, исследование влияния нагрузки на характеристики датчика.

1.1. Краткие теоретические сведения

Реостатными называются датчики, выполненные в виде реостата, движок которого перемещается под действием входной преобразуемой величины. Выходной величиной является электрическое сопротивление, функционально связанное с положением движка. Следует отметить, что реостатные датчики применяются не только для преобразований перемещений. Так как в перемещения могут быть преобразованы с помощью механических упругих элементов многие неэлектрические величины, то реостатные преобразователи используются в датчиках давления, силы, расхода, уровня и т. п. [1].

В зависимости от материала чувствительного элемента реостатные преобразователи делятся на проволочные, непроволочные, фотоэлектрические, жидкостные и из проводящей керамики.

Проволочные реостатные датчики отличаются наивысшей точностью и стабильностью функции преобразования, имеют малое переходное сопротивление, низкий уровень шумов, малый ТКС. Их недостатком является низкая разрешающая способность, сравнительно невысокое сопротивление (до десятков килоом), ограниченная возможность применения на переменном токе, обусловленная остаточными индуктивностью и емкостью обмотки. Указанные недостатки отсутствуют в непроволочных датчиках, однако они значительно уступают проволочным по точности.

Наиболее распространенными являются проволочные реостатные преобразователи, которые в зависимости от конструктивного исполнения делятся на преобразователи с поступательным и вращательным перемещением подвижного элемента. Первые (рис. 1.1) изготавливаются обычно на стержневых, трубчатых или пластинчатых каркасах 1, на которые намотана с заданным шагом или виток к витку изолированная резистивная проволока, образующая чувствительный элемент 2. Подвижным элементом является контактная щетка, состоящая из контакта 3 и контактодержателя 4.

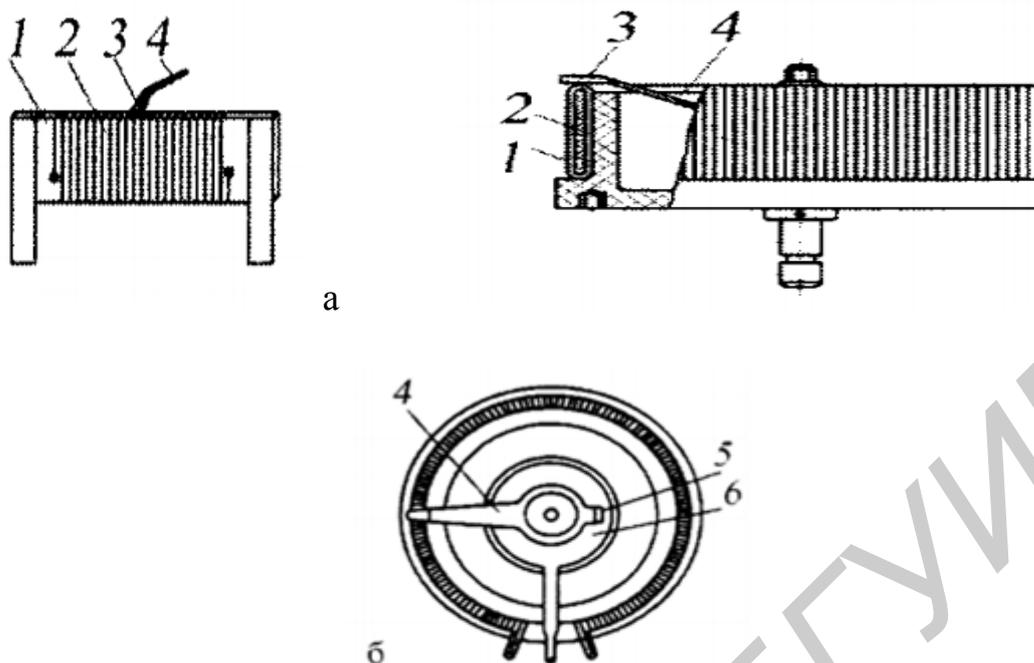


Рис. 1.1. Реостатные преобразователи

Преобразователи с вращательным перемещением подвижной части могут быть однооборотными или многооборотными. Однооборотные (рис. 1.1, б) имеют чувствительный элемент в виде обмотки 1, нанесенной на кольцевой каркас 2. Подвижный элемент такого преобразователя состоит из контактной токосъемочной щетки 3, укрепленной на щеткодержателе 4. Токосъем осуществляется при помощи контактной пружины 5, скользящей по неподвижному токосъемочному кольцу 6.

К материалу проволоки реостатных преобразователей предъявляется ряд требований, в частности, он должен обладать высоким удельным электрическим сопротивлением, малым ТКС, стабильностью характеристик во времени, высокой коррозионной стойкостью, большой прочностью на разрыв. В реостатных преобразователях широко используют обмотки из манганина, константана, а в случаях, когда преобразователь должен работать в условиях повышенных температур, обмотки изготавливают из железо-хромовых или никелево-хромовых сплавов.

В особо ответственных случаях и при специфических условиях работы применяют сплавы на базе благородных металлов. Так, в случае, когда к реостатному преобразователю предъявляются требования высокой износостойкости, применяется, в частности, платино-иридиевый сплав (90 % платины и 10 % иридия). Добавка иридия к платине увеличивает ее твердость, износостойкость, химическую стойкость. Удельное сопротивление этого сплава $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а диаметр провода может быть достаточно малым (от 0,01 мм), что позволяет изготавливать высокоомные преобразователи весьма малых габаритов.

Для обеспечения высокой стабильности характеристик реостатных преобразователей предъявляются определенные требования и к каркасам. Они должны сохранять свои размеры в широком температурном диапазоне, в условиях повышенной влажности. Кроме того, каркасы должны обладать высокой теплопроводностью, что позволит увеличить удельную рассеиваемую в преобразователе мощность. Поэтому каркасы прецизионных реостатных преобразователей изготавливают из алюминиевых сплавов АМг, Д1, Д16. В преобразователях, допускающих погрешность преобразования 1 % и более, они могут изготавливаться из изоляционных материалов, например гетинакса, текстолита, стеклопластика и др.

Конструкция контактных щеток в значительной степени определяет качество преобразователя и в первую очередь уровень так называемого контактного шума, генерируемого щеткой при ее движении по дорожке преобразователя. Контактный шум, возникающий в области контакта, вызывается вариациями контактного сопротивления, которые, в свою очередь, связаны с вариациями контактной площади и контактного давления, особенно при наличии на дорожке посторонних частиц. Контактный шум имеет тенденцию к росту во времени вследствие износа, загрязнения и окисления дорожки и щетки.

Контактные щетки прецизионных реостатных преобразователей выполняются в виде двух-трех проволочек диаметром 0,1...0,2 мм (несколько отличающихся одна от другой по длине), которые закреплены на щеткодержателе. Разная длина контактных проволочек обеспечивает их разные собственные частоты механических колебаний, что способствует устойчивой работе преобразователя в условиях вибраций. У менее точных преобразователей щетки делаются пластинчатыми, состоящими из одной профилированной пластины с одним или двумя надрезами, обеспечивающими различные собственные частоты вибраций отдельных ее выступов. Проволочные щетки рассчитаны на контактные усилия 0,003...0,005 Н, пластинчатые – 0,05...0,1 Н. Ширина контактной поверхности щетки должна быть равной двум-трем диаметрам проволоки чувствительного элемента.

Изготавливают щетки либо из чистых металлов (платины, серебра), либо из сплавов (платины с иридием или бериллием, фосфористой бронзы, медно-серебряных сплавов и т. п.). При выборе материала щеток не следует забывать и о термоэлектрическом эффекте, особенно для преобразователей, предназначенных для работы на постоянном токе.

Вид функции преобразования $R = f(x)$ реостатного преобразователя определяется характером изменения шага намотки по длине каркаса или профилем каркаса при равномерном шаге намотки (для упрощения конструкции прибегают обычно к ступенчатой форме каркаса) или шунтированием участков обмотки соответствующими сопротивлениями. Последний так называемый способ электрического профилирования благодаря ряду преимуществ (возможность получения различных функций преобразования на базе наиболее простого и технологичного линейного реостата, возможность коррекции погрешностей ис-

ходного линейного преобразователя и т. п.) получил наибольшее распространение [1].

Определив по графику отношения m_i эквивалентных сопротивлений в узлах аппроксимации к соответствующим значениям сопротивлений линейного преобразователя, находят сами значения эквивалентных сопротивлений.

Конструктивный расчет реостатного преобразователя сводится обычно к определению диаметра и длины намоточного провода, а также геометрических размеров каркаса. Исходными данными, как правило, являются полное сопротивление R_{Π} , длина намотки l , материал намоточного провода и его удельное электрическое сопротивление ρ , максимальная мощность, измерительный ток, допустимое значение погрешности.

Методику расчета реостатных преобразователей можно найти, например в [2].

Источниками погрешностей реостатных преобразователей являются дискретность выходного сопротивления, отклонение функции преобразования от расчетной, вызванное непостоянством диаметра намоточного провода и его удельного электрического сопротивления, изменение температуры преобразователя, термодинамические и токовые шумы, влияние сопротивления нагрузки [3].

Погрешность дискретности для преобразователей с равномерной намоткой (линейных преобразователей)

$$\delta_{\text{д}} = \frac{\Delta R_{\text{min}}}{2R_{\Pi}} = \frac{1}{2\omega}, \quad (1.1)$$

где ΔR_{min} – сопротивление одного витка преобразователя; R_{Π} , ω – полное сопротивление и число витков обмотки преобразователя.

Для реальных конструкций линейных реостатных преобразователей число витков составляет около 2000, а погрешность дискретности соответственно равна 0,02...0,03 %. Суммарная погрешность, вызванная непостоянством электрических параметров преобразователя, достигает 0,03...0,1 %. Температурная погрешность, определяемая прежде всего температурным коэффициентом сопротивления намоточного провода, не превышает обычно 0,1 % на 10 °С.

Методическая погрешность, вызванная влиянием сопротивления нагрузки, в общем случае определяется соотношением сопротивлений преобразователя и нагрузки и в различных измерительных цепях проявляется по-разному. Если, например, линейный реостатный преобразователь включен в цепь как делитель напряжения (рис. 1.2, а), то

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_x/R_{\Pi}}{1+R_x/R_x(1-R_x/R_{\Pi})}. \quad (1.2)$$

Так как для ненагруженного преобразователя ($R_{\text{н}} = \infty$)

$$\frac{U'_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_x}{R_{\Pi}}, \quad (1.3)$$

то методическая погрешность отношения $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$

$$\delta_U = \frac{U'_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{R_{\Pi}}{R_H} \left(\frac{R_x}{R_{\Pi}} - 1 \right) \frac{R_x}{R_{\Pi}}. \quad (1.4)$$

Из этого выражения видно, что методическая погрешность реостатного преобразователя будет незначительной лишь в случае, когда сопротивление нагрузки в десятки раз превышает полное сопротивление преобразователя.

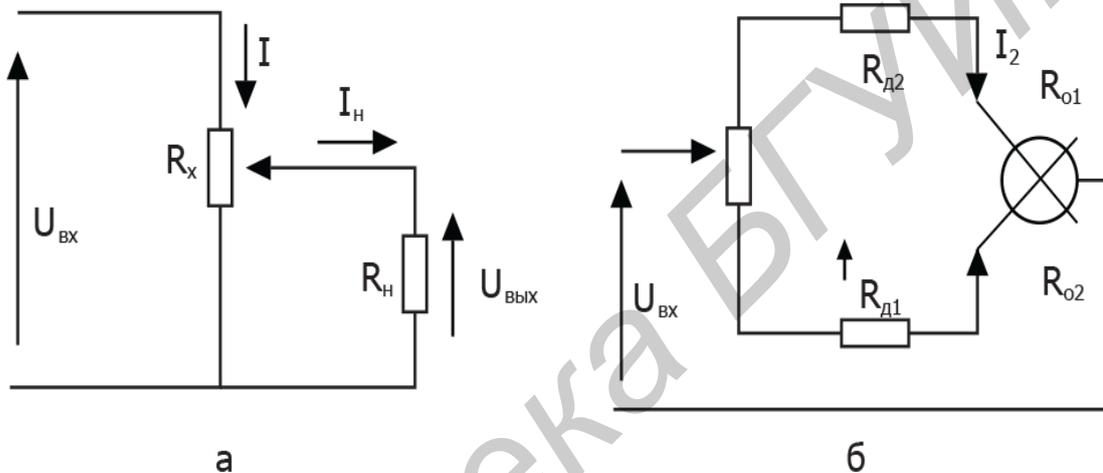


Рис. 1.2. Измерительные цепи реостатных преобразователей

Наиболее распространенной измерительной цепью реостатного преобразователя является цепь с логометром (рис. 1.2, б). Согласующие сопротивления R_{D1} и R_{D2} определяются параметрами преобразователя и логометра. Зная диапазон отношений токов логометра $\left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\min} \dots \left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\max}$, сопротивления R_{01} и R_{02} его обмоток, а также минимальные значения токов $I_{1\min}$ и $I_{2\min}$, необходимые для устойчивой работы логометра, можно определить R_{D1} и R_{D2} исходя из следующих равенств:

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\min} = \frac{R_{D2} + R_{02}}{R_{\Pi} + R_{D1} + R_{01}}, \quad (1.5)$$

$$\left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\max} = \frac{R_{\Pi} + R_{D2} + R_{02}}{R_{D1} + R_{01}}. \quad (1.6)$$

Напряжение питания должно быть

$$U > I_{1\min}(R_{01} + R_{D1} + R_{\Pi}) \text{ и } U > I_{2\min}(R_{02} + R_{D2} + R_{\Pi}). \quad (1.7)$$

Реостатные преобразователи применяют в датчиках линейных и угловых перемещений и ускорений, а также статических давлений. Некоторые конструкции таких устройств приведены в [1].

1.2. Практическая часть

Работа выполняется на персональном компьютере. Программное обеспечение – пакет моделирования электронных схем Multisim.

1.2.1. Для исследования реостатных датчиков с помощью программы Multisim соберите электрическую схему, приведенную на рис. 1.3. Значения элементов задайте в соответствии со значениями, указанными на схеме.

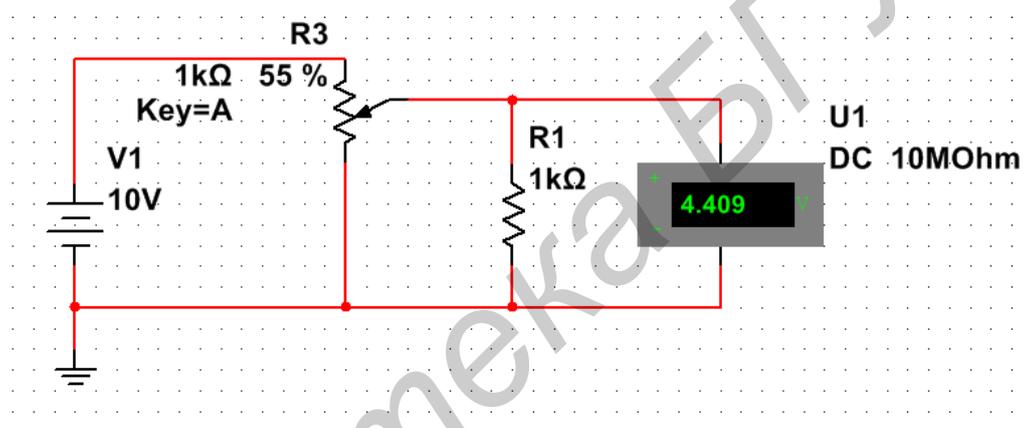


Рис. 1.3. Схема включения реостатного датчика

1.2.2. Изменяя значения реостата с шагом 5 % от 0 до 100 %, определите зависимость напряжения на нагрузке от сопротивления датчика. Измерения необходимо выполнить для следующих значений R_H : 1, 10 кОм, ∞ . Результаты измерений оформите в виде таблицы.

1.2.3. По результатам выполнения п. 1.2.2 постройте графики зависимости напряжения на нагрузке от положения датчика.

1.2.4. Используя полученные в п. 1.2.2 данные, рассчитайте погрешность дискретизации и методическую погрешность.

1.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Электрические схемы.
4. Результаты лабораторной работы, измеренные параметры (графики, таблицы, значения измеренных параметров, теоретические расчеты).
5. Выводы.

1.4. Контрольные вопросы

1. Конструкция потенциометрических датчиков.
2. Достоинства и недостатки потенциометрических датчиков.
3. Закон изменения сопротивления потенциометрических датчиков.
4. Примеры потенциометрических датчиков.
5. Схема включения потенциометрических датчиков.

Литература

1. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий [и др.]. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
2. Средства и методы измерений неэлектрических величин / Е. С. Полищук [и др.]. – Львов : Бескид Бит, 2008. – 618 с.
3. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.

Лабораторная работа №2

Тензорезистивные датчики

Цель работы: изучение основ теории тензорезистивных преобразователей, принципа действия, разновидностей тензодатчиков, материалов, схем включения и способов применения.

2.1. Краткие теоретические сведения

В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации. Основной характеристикой чувствительности материала к механической деформации является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}. \quad (2.1)$$

Так как сопротивление проводника связано с удельным электрическим сопротивлением ρ материала, длиной l и площадью поперечного сечения S_q этого проводника зависимостью

$$R = \rho \frac{l}{S_q}, \quad (2.2)$$

то относительное изменение сопротивления, вызванное деформацией проводника под действием равномерного механического напряжения, равно

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{S_q} \frac{dS_q}{d\sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma}. \quad (2.3)$$

Из последнего выражения следует, что при конечном изменении напряжения σ относительное изменение сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (2.4)$$

При деформации твердых тел изменение их длины связано с изменением объема. При этом изменение объема в зоне упругих деформаций для каждого

материала является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом Пуассона $\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}$, где $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$ (здесь d – диаметр проводника круглого сечения или поперечный размер проводника квадратного сечения).

Учитывая, что $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S_q}{S_q} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$, получим выражение для коэффициен-

та относительной тензочувствительности:

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}. \quad (2.5)$$

Для некоторых металлов удельное электрическое сопротивление практически не меняется под действием механических деформаций, а коэффициент k может быть для них принят равным $k = 1 + 2\mu$. Так как коэффициент Пуассона для металлов имеет значение 0,24...0,4, то значение коэффициента тензочувствительности часто считают примерно равным 1,48...1,8. В общем же случае коэффициент тензочувствительности проводника содержит составляющую, которая определяется изменением его удельного электрического сопротивления и может быть как положительной, так и отрицательной. Для металлов коэффициент тензочувствительности составляет 0,5...4.

Механическое напряжение σ в исследуемой детали связано с модулем упругости E материала этой детали соотношением

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}. \quad (2.6)$$

Следовательно, уравнение преобразования тензорезистора можно представить в виде

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k\sigma}{E}. \quad (2.7)$$

Как материал исследуемой детали, так и материал проволоки тензорезистора должны подвергаться механическим напряжениям, не превышающим предела упругих деформаций, в противном случае в материале произойдут необратимые деформации. Поэтому допустимое значение напряжений не превышает 20...30 % предела упругости.

Так как значение относительной деформации $\Delta l/l$ в пределах упругих свойств материала не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$, то при $k = 0,5...4$ относительное изменение сопротивления $\frac{\Delta R}{R} = (1,25...10) \cdot 10^{-3}$, т. е. не превышает 1 %. В связи с

этим сопротивление тензорезистора должно обладать высокой временной стабильностью, иметь незначительный ТКС.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалам тензорезисторов, являются также возможно большее значение коэффициента тензочувствительности, высокое удельное электрическое сопротивление. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения чувствительного элемента преобразователя должен быть по возможности равным температурному коэффициенту линейного расширения материала исследуемого объекта.

Коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов определяется в основном изменением удельного электрического сопротивления

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \approx m = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}. \quad (2.8)$$

Значения k полупроводниковых тензорезисторов в отличие от проводниковых в значительной мере зависят от степени деформации, температуры, удельного электрического сопротивления, типа проводимости и достигают 150...200. При этом в полупроводниках n -типа коэффициент тензочувствительности отрицательный, а в полупроводниках p -типа – положительный (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Основные характеристики тензочувствительных материалов

Материал	Коэффициент тензочувствительности k	Модуль упругости E , ГПа	ТКС, 10^{-6} 1/К	ТК линейного расширения, 10^{-6} 1/К	Удельное сопротивление, мкОм·м	Термо-ЭДС с медью, мкВ/К	ТК тензочувствительности, 10^{-6} 1/К
Константан	1,9...2,1	±150	±50	14...15	0,46...0,50	-40	
Нихром	2,1...2,3	180	22	14	0,9...1,7	+22	
Платинородий	5,1...5,5	–	1700	–	0,2	–	
Элинвар	0,7...3,8	176	300	0,9	0,84	0,3	
Германий (дендрит):							
n -типа [111]	-150	155	1500	0,1...6	$0,25 \cdot 10^4$	–	3000
p -типа [111]	+100	155	3000...8000	0,1...6	$1,1 \cdot 10^4$	–	400...5000
Кремний:							
n -типа [100]	-130	130	6000	0...4	$0,35 \cdot 10^4$	–	3000
p -типа [111]	+175	190	1300	0...4	$7,8 \cdot 10^4$	–	2000

Для жидких тензорезистивных материалов (ртути, электролитов), практически не меняющих своего объема в процессе деформации, коэффициент тензочувствительности $k = 2$. Действительно, при постоянном объеме V сопротивление R проводника с постоянным поперечным сечением вдоль всей длины пропорционально квадрату длины:

$$R = \rho \frac{l}{S_q} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (2.9)$$

а изменение сопротивления при $V = \text{const}$ и $\rho = \text{const}$:

$$\Delta R = \frac{\rho}{V} 2l \Delta l. \quad (2.10)$$

В практике измерительных преобразований тензоэффект используется в двух направлениях. Это, во-первых, изменение сопротивления проводника или полупроводника в результате объемного сжатия. Входной величиной такого преобразователя является давление окружающего его газа или жидкости. На этом принципе строятся датчики высоких и сверхвысоких давлений, которые изготавливаются в виде бескаркасной обмотки, намотанной обычно из манганиновой проволоки, а преобразователями низких давлений является германиевый или кремниевый тензорезистор.

Сущность второго направления заключается в использовании тензоэффекта растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала. Преобразователи этой группы могут быть выполнены в виде наклеиваемых проволочных, фольговых, или пленочных, либо так называемых свободных (навесных) тензопреобразователей.

В качестве материалов проволочных тензорезисторов используют чаще всего константан, нихром, элинвар, платинородий (табл. 2.1). Однако наибольшее распространение в отечественной тензометрии получили тензорезисторы из специальной константановой микропроволоки диаметром 0,025...0,035 мм.

Наиболее распространенные конструкции наклеиваемых тензодатчиков приведены на рис. 2.1, а характеристики некоторых типов тензорезисторов – в табл. 2.2.

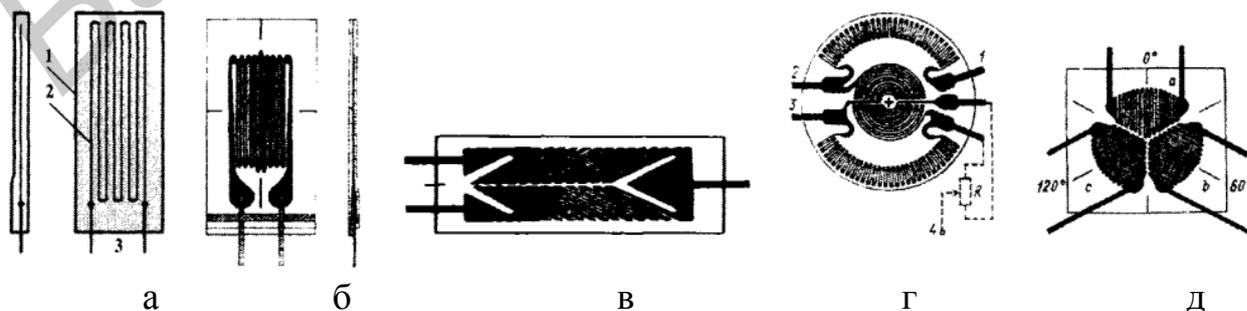


Рис. 2.1. Некоторые разновидности тензодатчиков

Датчик с плоской формой решетки (рис. 2.1, а) имеет подложку 1 из тонкой бумаги или лаковой пленки, на которую наклеена плоская решетка 2 из тензочувствительной проволоки. К концам проволоки присоединены пайкой или сваркой выводы 3 из медного провода. Сверху датчик покрыт слоем лака. Такие датчики имеют измерительную базу (длину занимаемую проволокой) обычно 3...20 мм, а их сопротивление равно 20...500 Ом.

Таблица 2.2

Основные характеристики некоторых типов тензорезисторов

Наименование тензорезисторов	Маркировка	База l , мм	Коэффициент тензочувствительности	Номинальное сопротивление R , Ом	Предельная деформация ϵ_{\max} , %	Ползучесть, %
Проволочные одноэлементные петлевые на бумажной основе	ПКБ – 3 – 50 ПКБ – 30 – 400	3...30	1,9...2,2	50...400	$\pm 0,3$	0,5...2,5
	2ПКБ – 5–502 ПКБ – 30–400	5...30	1,9...2,2	50...400	$\pm 0,3$	0,5...2,5
	К – 2–20... К – 30–200	2...0	1,9...2,2	20...200	$\pm 0,5$	2,0
	E428 – 005 E428 – 012 E428 – 025	3 6 10	1,9...2,2	65 100 200	$\pm 0,5$	2,0
Одноэлементные петлевые на пленочной основе	ПКП5 – 100 ПКП – 20 400	5...20	1,9...2,2	100...400	$\pm 0,3$	0,1...0,5
Многоэлементные петлевые на бумажной основе	2ППКБК – 10–150 2ППКБК – 100–300	10...100	1,9...2,2	150...300	$\pm 1,0$	до 0,5
Многоэлементные петлевые на пленочной основе	2ППКП – 10–150 2ППКП – 20–150 3ППКП – 10–150 3ППКП – 20–150	10 20 10 10	1,9...2,2	150	$\pm 1,0$	до 0,5
Фольговые одноэлементные с прямоугольной решеткой	2ФКПА	1...20	2,0...2,2	50...200		0,5
	1ФКТК	5...15	2,0...2,2	100...400		0,5
	2ФКПД	5	2,0...2,2	50...200		0,5
Полупроводниковые кремниевые без основы	Ю – 8А	1,4	+100	110; 162; 220	0,1	3...5
	Ю – 8Б	1,4	-100	90; 138; 180	0,1	3...5
	Ю – 12А	2,4; 6,4; 12,4	+ 100	110...750	0,1	3...5
	Ю – 12Б	2,4; 4,4; 6,4	-100	90...610	0,1	3...5

Для получения тензодатчиков с малой базой (1...3 мм) их делают двухслойными и изготавливают путем намотки тензочувствительной проволоки на трубчатый бумажный каркас, который после проклеивания расплющивается и наклеивается на подложку.

Погрешность проволочных резисторов может быть сведена до 0,1...0,2 %.

Фольговые тензопреобразователи (рис. 2.1, б) представляют собой наклеенную на подложку тензочувствительную решетку, вытравленную из фольги толщиной 0,01...0,02 мм. Они имеют определенные преимущества перед проволочными. Поскольку отношение поверхности тензочувствительной дорожки к ее поперечному сечению велико, то улучшается теплоотдача, что позволяет значительно увеличить плотность тока, если только деталь, к которой приклеивается тензопреобразователь, не обладает очень малой теплоемкостью. Недостатком обычных фольговых преобразователей является сравнительно низкое сопротивление, не превышающее обычно 50 Ом.

В последнее время широкое распространение получили пленочные тензорезисторы. Процесс их изготовления заключается в вакуумной возгонке тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на подложку. Для изготовления пленочных тензорезисторов применяются как металлические (например титаноалюминиевый сплав), так и полупроводниковые (германий, кремний) материалы. При изготовлении как фольговых, так и пленочных тензопреобразователей можно предусмотреть любой рисунок их решетки, что является существенным их достоинством, благодаря этому они находят применение в исследованиях механических напряжений деталей самой разнообразной конфигурации.

Например, тензопреобразователь на рис. 2.1, в, состоящий из двух тензочувствительных элементов, оси чувствительности которых размещены под углом 90°, используют при измерениях деформаций валов, вызванных крутящими моментами.

На рис. 2.1, г подана мостовая структура тензорезистивных преобразователей, состоящая из четырех тензорезисторов, которые образуют четыре плеча измерительного моста. Тензомост наклеивается на жесткую мембрану. В результате действия на мембрану измеряемого давления тензорезисторы, размещенные в центре, воспринимают деформацию расширения, а периферийные – деформацию сжатия. Выводы 1 и 3 предназначены для подключения напряжения питания моста, 2 и 4 – выводы измерительной диагностики. Подгоночный резистор R используется для предварительного уравнивания моста при отсутствии измеряемого давления.

Розетка из трех тензорезисторов (рис. 2.1, д) используется при измерениях механических напряжений в деталях, находящихся в плосконапряженном состоянии, в случае, когда направление действия напряжений и их значения определяют по изменению сопротивлений данных трех тензорезисторов.

Повышенные требования современной науки и техники, а именно необходимость сравнительно высоких значений сопротивления тензорезисторов (> 6 кОм) для возможности его сопряжения с преобразователями с унифициро-

ванным выходным сигналом 4...20 мА, необходимость миниатюризации преобразователей достигаются благодаря новым успехам техники литографии.

Появились тонкопленочные тензорезистивные преобразователи, которые методом фотолитографии наносятся на предварительно изолированную поверхность механического упругого элемента (мембраны). Тонкопленочные тензорезисторы имеют по сравнению с фольговыми большие преимущества – они намного меньше изменяют свойства мембраны, на которую наклеиваются, а следовательно, появляется возможность использовать очень тонкие мембраны и создавать преобразователи низких давлений (менее 5 бар).

В качестве материалов тонкопленочных тензорезисторных преобразователей используют металлы (хром-кремний, хром-никель, платина-иридий), а в качестве изоляционных материалов – двуокись кремния или двуокись алюминия.

Основным недостатком тонкопленочных тензорезистивных преобразователей является сравнительно высокая стоимость их изготовления.

Полупроводниковые монокристаллические тензорезисторы изготавливают в основном из германия и кремния, имеющих кубическую кристаллическую решетку. В такой решетке принято различать три кристаллографических направления, которые обозначаются индексами Миллера. Направление, обозначенное индексом [111], совпадает с диагональю куба, [110] – с диагональю грани, [100] – с ребром куба. Тензочувствительность полупроводникового тензорезистора зависит от ориентации его чувствительного элемента относительно кристаллографических направлений.

Для серийных полупроводниковых тензорезисторов используют преимущественно кремний *p*-типа [111] с удельным электрическим сопротивлением $\rho_0 = 0,02 \dots 0,04$ Ом·см и кремний *n*-типа [100] с удельным сопротивлением $\rho_0 = 0,02 \dots 0,03$ Ом·см. Усредненная функция преобразования (зависимость относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ от относительной деформации ε) таких тензорезисторов имеет вид

$$\frac{\Delta R}{R} = 120\varepsilon + 4000\varepsilon^2. \quad (2.11)$$

Для тензорезисторов *p*-типа [111], $\rho_0 = 0,02$ Ом·см и

$$\frac{\Delta R}{R} = 1,1 \cdot 10^2 \varepsilon + 1 \cdot 10^4 \varepsilon^2. \quad (2.12)$$

Для тензорезисторов *n*-типа [100], $\rho_0 = 0,03$ Ом·см.

Современная полупроводниковая тензометрия имеет несколько направлений. Одно из них связано с развитием единичных наклеиваемых тензорезисторов, являющихся функциональным аналогом проволочных тензорезисторов. Это, в частности, тензорезисторы Ю-8 и Ю-12. Конструктивно они оформлены

в виде гантелеобразной пластины кремния кристаллографического направления максимального тензоэффекта. Коэффициент тензочувствительности таких элементов при температуре $25 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной деформации до 0,1 % находится в пределах 90...130, базовая длина равна 5...7 мм, номинальное электрическое сопротивление составляет 100...200 Ом.

К преимуществам таких тензопреобразователей относится высокая чувствительность, миниатюрность, низкая стоимость (при серийном производстве), возможность интеграции в тензорезистивные структуры. Однако им свойственны недостатки: сложность монтажа, относительно низкая рентабельность при изготовлении малых партий, значительная зависимость коэффициента относительной тензочувствительности от температуры, чувствительность к вибрациям и скачкообразному изменению давления – «удару давлением», нелинейность функции преобразования, значительный разброс характеристик. Погрешность единичных полупроводниковых тензорезисторов составляет 0,5... 1,0 %.

Второе направление, основанное на достижениях физики твердого тела и полупроводниковой технологии [4], предусматривает создание интегральных тензомодулей [1–3]. У такого рода тензопреобразователей (рис. 2.2) упругий элемент (мембрана) изготавливается из кристаллического полупроводника (обычно кремния), на котором методом диффузии формируют мостовую интегральную тензочувствительную схему.

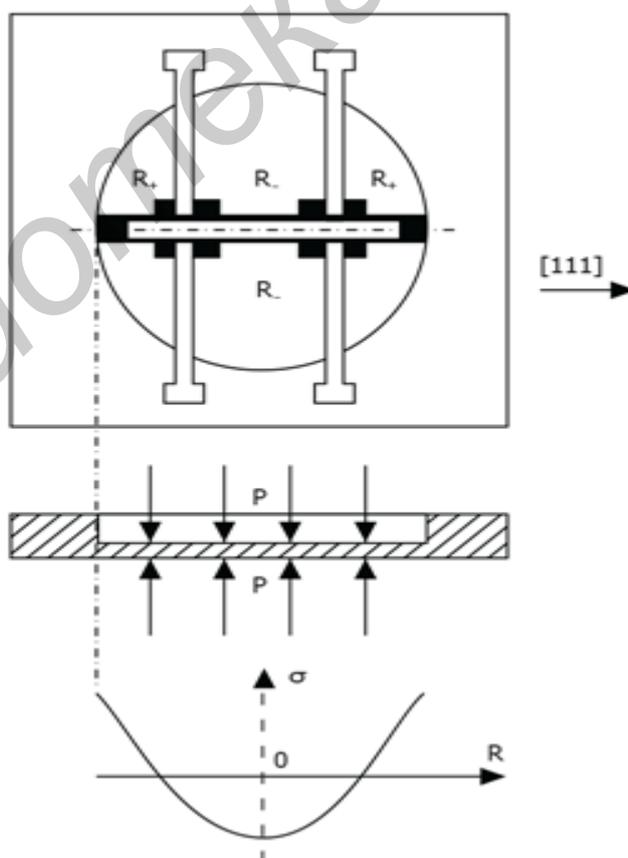


Рис. 2.2. Интегральный тензомодуль мембранного типа

На рис. 2.2 тензорезистор и упругий элемент представляют единое целое. Следовательно, в отличие от наклеиваемых проволочных тензорезисторов здесь отсутствует промежуточное вещество между упругим элементом и тензорезистором – клей, который является причиной дополнительных погрешностей у наклеиваемых тензорезисторов. Изоляция чувствительного элемента от тела упругого элемента осуществляется за счет *p-n*-перехода.

Габаритные размеры таких преобразователей составляют 2...6 мм при толщине самого тензорезистора 20...25 мкм. Датчики на основе мостовых тензоструктур имеют сравнительно высокую точность. Их погрешность может быть сведена до 0,1...0,2 %.

Схемы подключения. В тензометрической технике используют две основные схемы включения датчиков [5]: потенциметрическую (рис. 2.3, а) и мостовую (рис. 2.3, б).

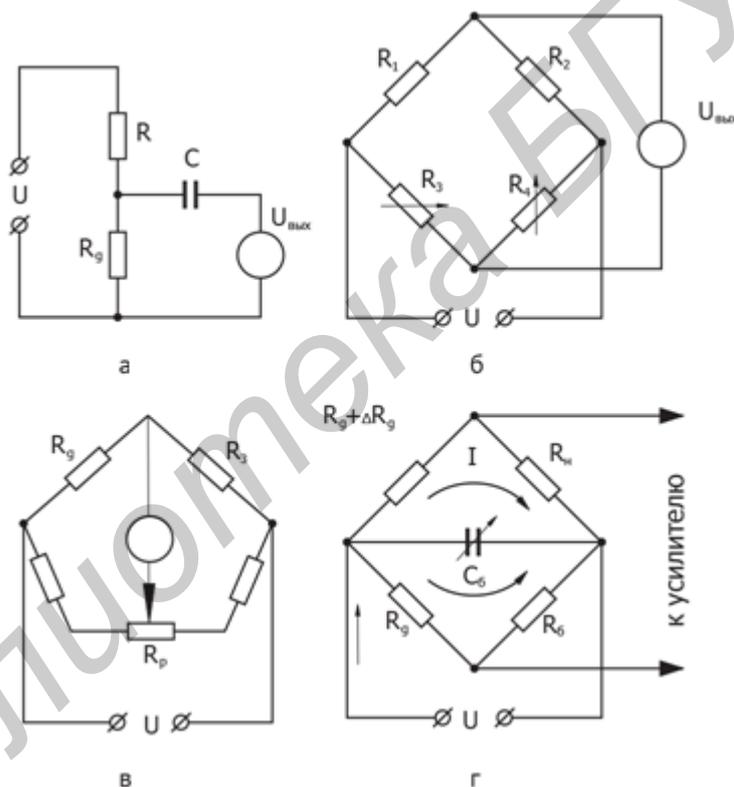


Рис. 2.3. Схемы включения тензодатчиков:

а – потенциметрическая; б – мостовая; в – балансного моста;
г – небалансного моста

При использовании потенциметрической схемы регистрируется лишь переменная составляющая измеряемой деформации. Для этого в схеме установлен разделительный конденсатор *C*.

Наиболее распространенной схемой включения тензодатчиков является мостовая схема, причем в зависимости от назначения аппаратуры используют схемы балансного моста (рис. 2.3, в) и небалансного моста (рис. 2.3, г).

Потенциометрическая схема получает питание от источника постоянного тока, мостовые схемы работают как на постоянном, так и на переменном токе.

При использовании мостов (как балансных, так и небалансных) необходимо осуществлять их балансировку. Мосты постоянного тока балансируют по активному сопротивлению, например, путем перемещения подвижного контакта реохорда R_p (см. рис. 2.3, в) или с помощью балансировочных сопротивлений R_6 (см. рис. 2.3, г). Мосты переменного тока балансируют по реактивной составляющей, для этого в диагональ питания подключают балансировочный конденсатор C_6 .

2.2. Практическая часть

Работа выполняется на персональном компьютере. Программное обеспечение – пакет моделирования электронных схем Multisim.

2.2.1. Для исследования тензорезистивных датчиков с помощью программы Multisim соберите электрическую схему, приведенную на рис. 2.4. Значения элементов задайте в соответствии со значениями, указанными на схеме.

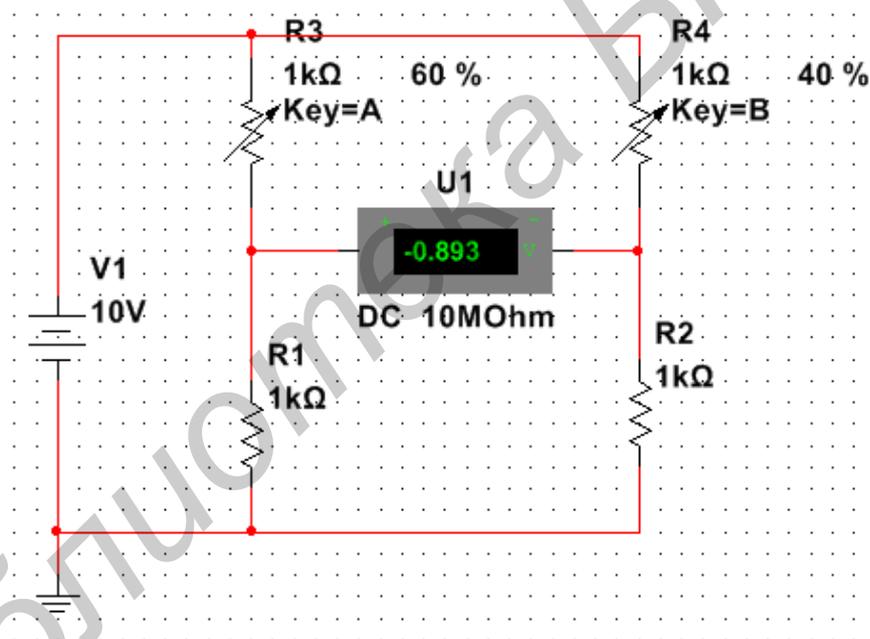


Рис. 2.4. Мостовая схема включения тензорезистивного датчика

2.2.2. Снимите зависимость напряжения на выходе схемы от сопротивления датчика: одновременно менять R_3 , R_4 с шагом 5 % от 0 до 100 и от 100 до 0 соответственно.

2.2.3. Повторите п. 2.2.2 для следующих значений сопротивлений: 800, 400, 200 Ом. Повторите для напряжения 3 В.

2.2.4. Постройте график.

2.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Электрические схемы.
4. Результаты лабораторной работы, измеренные параметры (графики, таблицы, значения измеренных параметров, теоретические расчеты).
5. В выводах укажите, как влияет значение $R1 + R2$ на выходную частоту устройства и его чувствительность к изменению емкости датчика.

2.4. Контрольные вопросы

1. Принцип работы тензорезисторов.
2. Конструкция тензодатчиков.
3. Использование тензоэффекта в датчиках.
4. Полупроводниковые тензопреобразователи.
5. Схема включения тензодатчиков.

Литература

1. Бойцар, Р.И. Полупроводниковые микросенсоры / Р. И. Байцар, С. С. Варшава. – Львов : Вид. ЛьЦНТЕИ. – 2001. – 288 с.
2. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
3. Курмашев, Ш. Д. Датчики давления на основе поверхностно-барьерных структур / Ш. Д. Курмашев, Р. Т. Сидореи, А. А. Щенкевич // Тезисы докладов Украинской научн. конф. по физике полупроводников, Одесса. – 2002. – Т. 1. – 122 с.
4. Технологии приборостроения / В. М. Шарапов [и др.]. – Черкассы : Брама. – 2009. – 320 с.
5. Каплер, А. А. Монтаж, наладка и эксплуатация автоматических устройств / А. А. Каплер. – М. : Машиностроение, 1969. – 312 с.

Лабораторная работа №3

Терморезистивные датчики

Цель работы: изучение принципов действия, характеристик, конструкций, материалов терморезистивных датчиков.

3.1. Краткие теоретические сведения

Терморезисторы – это резистивные элементы, изготовленные из проводникового или полупроводникового материала с положительным или отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Принцип действия терморезисторов основывается на зависимости их сопротивления от температуры.

Терморезисторы на основе металлов. Для создания терморезисторов используют материалы, которые имеют стабильный ТКС, воспроизводимость электрического сопротивления при данной температуре, большое удельное сопротивление, стабильные химические и физические свойства при нагревании, инертные к влиянию исследуемой среды.

Из проводниковых материалов широко применяется платина, медь, никель. Среди них выделяется платина. Этот благородный металл даже при высоких температурах в окислительной среде не изменяет своих физических и химических свойств. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне $0...100\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет значение приблизительно $1/273\text{ K}^{-1}$, удельное сопротивление при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равняется $0,105\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, интервал температур достигает $-260...+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температурная зависимость сопротивления платины в диапазоне $0...650\text{ }^{\circ}\text{C}$ описывается уравнением

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (3.1)$$

где R_T , R_0 – сопротивления преобразователя при температуре $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; A и B – постоянные коэффициенты (для платинового провода, который применяется в промышленных термопреобразователях температуры):

$$A = 3,9702 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}, \quad B = -5,8893 \cdot 10^{-7} 1/\text{K}.$$

В интервале температур $-250...0\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид

$$R_T = R_0 \left[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3 \right], \quad (3.2)$$

где $C = -4,356 \cdot 10^{-12} \text{ 1/K}$ – постоянный коэффициент.

В интервале температур от -200 до $+650 \text{ }^\circ\text{C}$ приведенные зависимости являются точной аппроксимацией функции преобразования платиновых преобразователей температуры, в результате чего их используют в качестве эталонных для воссоздания Международной температурной шкалы. К недостаткам платиновых преобразователей температуры принадлежат достаточно высокая загрязняемость платины при высоких температурах парами металлов (особенно кремния и железа), сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, в результате чего она становится хрупкой, теряет стабильность характеристик, $\alpha_T = 1/234,7 \text{ K}^{-1}$.

Медь широко применяется в преобразователях температуры в интервале $-40 \dots +180 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha_T = 1/234,7 \text{ K}^{-1}$, зависимость электрического сопротивления от температуры – линейная:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T). \quad (3.3)$$

К недостаткам медных преобразователей температуры принадлежит высокая окисляемость меди при нагревании, поэтому терморезисторы из меди применяются в указанном сравнительно узком диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов. Кроме платины и меди для чувствительных элементов термопреобразователей температуры применяют никель, вольфрам и другие чистые металлы (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Некоторые физические свойства материалов терморезистивных преобразователей (при $20 \text{ }^\circ\text{C}$)

Материал	ТКС $\cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$	Удельное сопротивление, Ом $\cdot \text{мм}^2 / \text{м}$	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	ТермоЭДС в паре с медью, мкВ/ $^\circ\text{C}$
Платина	3,91	0,105	1773	7,5
Медь	4,28	0,017	1083	0
Никель	6,3-6,6	0,068	1455	22,5
Вольфрам	4,82	0,055	3410	0,5
Молибден	4,57	0,052	2630	–
Рений	3,11	0,211	3170	–
Родий	4,57	0,047	1960	–
Графит	0,02	46,0	3870	–
Платинородий	1,21	0,160	1900	–

Никель – химически стойкий материал даже при высоких температурах, но имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее

воспроизводимость. В интервале температур $-50...+180$ °С температурная зависимость сопротивления имеет вид

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3), \quad (3.4)$$

где $A = 0,00547$ 1/К; $B = 0,639 \cdot 10^{-5}$ 1/К; $C = 0,69 \cdot 10^{-8}$ 1/К – постоянные коэффициенты.

Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал и ниобий – имеют ограниченное применение. Влияние рекристаллизации и роста зерен в результате действия температуры делает чувствительный элемент из этих материалов хрупким и потому чувствительным к механическим вибрациям.

Наиболее распространенными являются терморезистивные преобразователи с платиновыми и медными чувствительными элементами. Первые предназначены для преобразования температуры в интервале от -260 до $+1000$ °С, вторые – от -200 до $+200$ °С.

Стандартами на терморезистивные преобразователи нормируются пределы допустимых отклонений номинальных статических характеристик (НСХ), допустимые отклонения сопротивления R_0 при температуре 0 °С в процентах от номинального значения, а также допустимые отклонения отношений W_{100} сопротивления R_{100} при 100 °С к сопротивлению R_0 при 0 °С (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Основные характеристики терморезистивных преобразователей температуры

Тип преобразователя	Диапазон измеряемых температур, °С	Класс допуска	Границы допустимого отклонения НСХ, °С
Платиновый ТСР 1П ($R_0 = 1$ Ом) 10П ($R_0 = 10$ Ом) 50П ($R_0 = 50$ Ом) 100П ($R_0 = 100$ Ом) 500П ($R_0 = 500$ Ом)	$-260...+850$ ($-200...+1100$)	<i>A</i>	$\pm(0,15 + 0,002 t)$ от -200 до 850
		<i>B</i>	$\pm(0,3 + 0,005 t)$ от -200 до 1100
		<i>C</i>	$\pm(0,6 + 0,008 t)$ от -100 до $+300$ от 850 до 1100
Медный ТСМ ЮМ ($R_0 = 10$ Ом) 50М ($R_0 = 50$ Ом) 100М ($R_0 = 100$ Ом)	$-200...+200$	<i>A</i>	$\pm(0,15 + 0,002 t)$ от -50 до $+120$
		<i>B</i>	$\pm(0,25 + 0,0035 t)$ от -200 до $+200$
		<i>C</i>	$\pm(0,5 + 0,0065 t)$ от -200 до $+200$
Никелевый ТСН 100Н ($R_0 = 100$ Ом)	$-60...+180$	<i>C</i>	$\pm(0,3 + 0,0165 t)$ от -60 до 0 $\pm(0,3 + 0,008 t)$ от 0 до 180

Основными источниками погрешностей терморезистивных преобразователей температуры являются неточность подгонки R_0 и отклонение W_{100} от номинального значения, а также нестабильность этих параметров во время экс-

платуации, причем изменения значений R_0 и R_{100} зависят от длительности работы, а также от измеряемой температуры [8, 11].

Нестабильность терморезистивных преобразователей объясняется изменением значений R_0 и W_{100} в результате загрязнения чувствительного элемента конструкционными материалами. Погрешности, которые возникают за счет изменения R_0 и W_{100} , имеют разные знаки, поэтому происходит их частичная компенсация.

Конструкции чувствительных элементов терморезистивных преобразователей температуры очень разнообразны в зависимости от пределов измеряемых температур, условий эксплуатации и т. п.

На рис. 3.1, а показана конструкция платинового терморезистивного преобразователя температуры, которая не имеет специальной защитной арматуры. Чувствительный элемент 1 такого преобразователя выполнен из ленточной платины, навитой на трубчатый изоляционный каркас 2 из специального стекла. Для защиты от механических повреждений чувствительный элемент покрыт внешней изоляцией 3. Преобразователь предназначен для измерений относительно невысоких температур, поскольку при высоких температурах значительно ухудшаются изоляционные свойства стекла, а тепловое расширение стеклоизоляции при ее нагревании приводит к нежелательным механическим напряжениям.

Чувствительный элемент платинового терморезистивного преобразователя температуры (рис. 3.1, б) имеет вид спирали 1, размещенной в канавках двух- или четырехканального керамического каркаса 2, уплотненной порошкообразным окислом алюминия 3. Окисел алюминия является хорошим электрическим изолятором, имеет большую теплостойкость и хорошую теплопроводность, а также ингибиторные свойства. Платиновая спираль к каркасу крепится с помощью глазури на основе окислов алюминия и кремния.

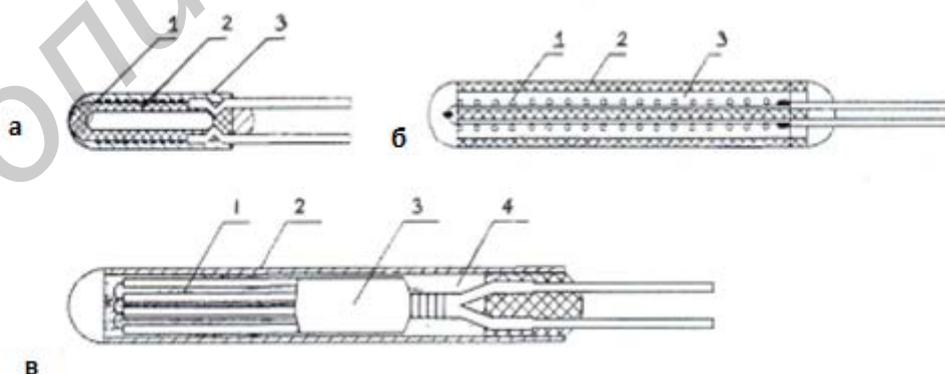


Рис. 3.1. Конструкции чувствительных элементов терморезистивных преобразователей

Чувствительный элемент медного термопреобразователя сопротивления – бескаркасная обмотка 1 из медного изолированного провода (рис. 3.1, в), сверху покрытая фторопластовой пленкой 3. Для обеспечения необходимой механической прочности обмотка помещается в тонкостенную металлическую гильзу 2, засыпается керамическим порошком 4 и герметизируется.

На рис. 3.2 показаны две конструктивные разновидности стержневого погружаемого терморезистивного преобразователя. Для защиты от влияния внешних механических факторов чувствительный элемент 1 помещают в защитную арматуру 2 (обычно из нержавеющей стали). Для крепления преобразователя на объекте измерения предусмотрен подвижный или неподвижный штуцер 3. Выводы чувствительного элемента выносят на клеммную колодку головки преобразователя (рис. 3.2, а), а в преобразователях без головки (рис. 3.2, б) они заканчиваются контактными наконечниками.

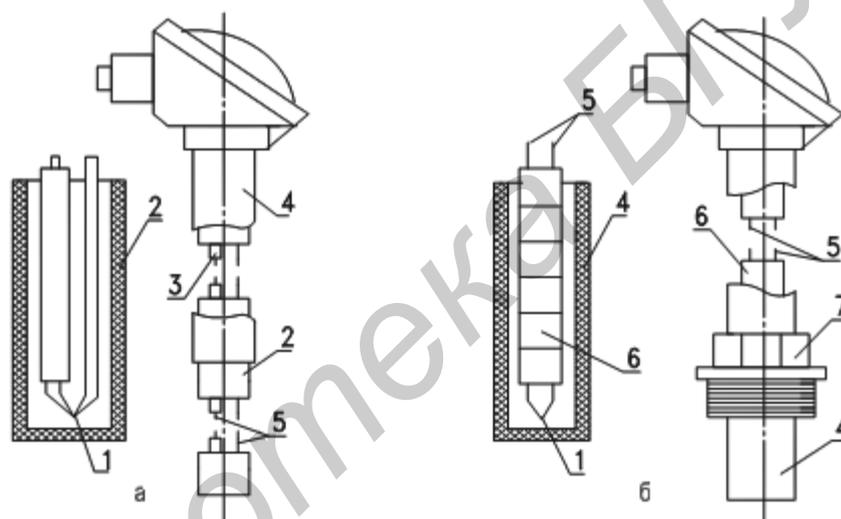


Рис. 3.2. Разновидности промышленных терморезистивных датчиков температуры

Кроме погружаемых выпускаются также терморезистивные преобразователи температуры специального назначения, например для измерения температуры оборотных поверхностей и др. [8].

Металлопленочные терморезисторы. Использование тонкопленочной технологии в производстве терморезисторов открывает новые возможности, позволяет получить разные пленочные материалы с заданными свойствами, упрощает технологию изготовления термопреобразователей на их основе. Напыление в вакууме позволяет получить пленочные структуры металл – диэлектрик – металл непосредственно на измеряемой поверхности, которая уменьшает погрешность измерений из-за несовершенства теплового контакта чувствительного элемента с поверхностью, температуру которой измеряют.

В табл. 3.3 приведены основные характеристики некоторых металлопленочных терморезисторов [11].

Основные характеристики металлопленочных терморезисторов

Материал терморезистора	Удельное сопротивление, Ом·см	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°C	Температурный диапазон, °C	Подкладка
Медь	$1,72 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	- 50...+200	ВСС
Хром	$12,9 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	30...+150	SiO ₂
Молибден	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	- 200...+200	Керамика
Платина	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	- 60...+350	Корунд, стекло, керамика
Никель	$7,24 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	-	Si ₃ N ₄ , SiO ₂
Ni-Fe	$35,0 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	-	SiO ₂
Висмут*	-	$4,7 \cdot 10^{-6}$	0...-100	SiO-Al ₂ O ₃

*На основании пленок висмута созданы металлопленочные терморезисторы с отрицательным значением ТКС = $-(2,8...3,0) \cdot 10^{-6}$ 1/°C в интервале температур 0...100 °C.

ТКС и его стабильность в зависимости от длительности работы определяются преимущественно материалом терморезистора и условиями его осаждения. Для большинства чистых металлов ТКС лежит в пределах $(3...7) \cdot 10^{-6}$ 1/°C. На практике широко используют металлопленочные терморезисторы из платины, меди и никеля. Они имеют наилучшую стабильность, нечувствительны к давлению, влажности, магнитному полю.

Температурный коэффициент сопротивления тонкопленочных терморезисторов меньше, а температурный диапазон уже, чем в соответствующих проволочных. Причиной такого ограничения является разница в значениях температурного коэффициента линейного расширения основы и металлической пленки, которая вызывает пластическую деформацию пленки при достаточно стремительном повышении или снижении температуры.

Во избежание этого нежелательного явления используют многослойные структуры, которые содержат, кроме термочувствительного, еще и ряд промежуточных слоев, которые обеспечивают крепкий механический контакт. Для стабилизации электрофизических свойств пленочных терморезисторов осуществляют термическое старение в вакууме в условиях циклического изменения температуры.

Как материал пленочных терморезисторов часто применяют сплавы Ni-Fe и Ni-Co. Например, пермаллой (Ni 80 % – Fe 20 %) имеет температурный коэффициент сопротивления почти такой же, как у платины, его максимальное значение наблюдается при толщине пленки от 80 до 160 нм, а у платины – при 350 нм. Соответственно, использование пермаллоя вместо платины дает возможность существенно уменьшить площадь терморезистора.

Полупроводниковые терморезистивные преобразователи. В настоящее время широко используются полупроводниковые терморезистивные преобразователи температуры [2, 4–7]. Преимуществами полупроводниковых термопреобразователей являются их малые габариты, незначительная инерционность. Однако они уступают проводниковым в точности. Существуют две группы полупроводниковых терморезисторов: с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (термисторы NTC) и с положительным ТКС (позисторы, PTC). В основном используются терморезисторы с отрицательным ТКС, значение которого может равняться 2...6 % 1/К.

Термисторы. Термисторы изготавливаются из порошков окислов Mn, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn, Co. После тепловой обработки и старения термисторы металлизируются на поверхности, создаются сопротивления, напаиваются металлические выводы, и вся конструкция фиксируется пластмассой или стеклом. При температуре 20 °С сопротивление термисторов составляет от нескольких килом до приблизительно 40 МОм.

Возможность создания терморезисторов очень малых размеров позволяет уменьшить влияние термопреобразователя на температурное поле исследуемого объекта, улучшить динамические характеристики процесса измерения. Границы стабильной работы полупроводниковых термисторов находятся в диапазоне –100...+400 °С, относительная погрешность составляет 0,2...1,0 % от диапазона преобразований.

Кроме малых габаритов полупроводниковые термисторы отличаются от металлических термопреобразователей высокой чувствительностью (высоким ТКС). Однако температурный коэффициент сопротивления термистора не является постоянной величиной, он уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры. Температурная зависимость сопротивления термистора описывается выражением

$$R_T = R_0 e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (3.5)$$

где R_0 – номинальное сопротивление (при температуре T_0); b – постоянный коэффициент, значение которого зависит от свойств материала и измеряется в тех же единицах, что и электрическое сопротивление.

Эту зависимость обычно записывают в виде

$$R_T = K_0 e^{b/T}, \quad (3.6)$$

где $K_0 = R_0 e^{-b/T_0}$ – постоянный коэффициент, измеряемый в тех же единицах, что и электрическое сопротивление.

Конструктивно терморезистивные преобразователи температуры с чувствительными элементами из термисторов могут изготавливаться самой разнообразной формы в зависимости от назначения, места его установки на исследуемом объекте.

На рис. 3.3 показана конструкция термисторных преобразователей температуры: термопреобразователя погружения и поверхностного термопреобразователя. Термисторы 1 расположены в цилиндрических корпусах 3 из коррозионно-стойкой стали с низкой теплопроводностью. Наконечник 2 термопреобразователя (рис. 3.3, а) и контактная поверхность поверхностного термопреобразователя (рис. 3.3, б) изготовлены из материала с высокой теплопроводностью (преимущественно – серебра). Внутренняя полость заполнена порошком оксида кремния, что обеспечивает малую погрешность, которая связана с теплопроводностью.

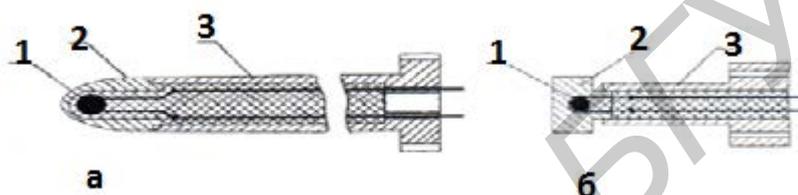


Рис. 3.3. Конструкции термисторных преобразователей температуры

На современном этапе широкое использование получили полупроводниковые терморезисторы на основании нитевидных кристаллов (НК) таких популярных полупроводников, как кремний и германий и их соединений. Они характеризуются температурной чувствительностью, которая не хуже, чем у термисторов, а их положительный ТКС находится в границах 2...5 % 1/К. Вследствие миниатюрных размеров (нитевидные монокристаллические элементы могут изготавливаться диаметром в несколько микрон и даже долей микрона) они практически безынерционны.

На рис. 3.4 показаны две конструкции измерительных преобразователей температуры, у которых чувствительными элементами являются нитевидные кристаллы Si–Ge. Чувствительный элемент измерительного преобразователя температуры поверхности (рис. 3.4, а) расположен у истонченной торцевой части корпуса 1, изготовленной из материала повышенной теплопроводности, и находится с ней в надежном тепловом контакте. Измеряемая температура воспринимается торцевой частью корпуса и через тонкий слой теплопроводной пасты 2 передается терморезистору 3. Такие преобразователи температуры удобны в эксплуатации, легко заменимы и надежны. На рис. 3.4, б приведена конструкция термопреобразователя погружения, чувствительный элемент 1 которого из НК Si–Ge размещен в защитном корпусе 2 и уплотнен теплопроводной пастой 3 (в некоторых конструкциях чувствительный элемент крепится к корпусу стеклянной пайкой).

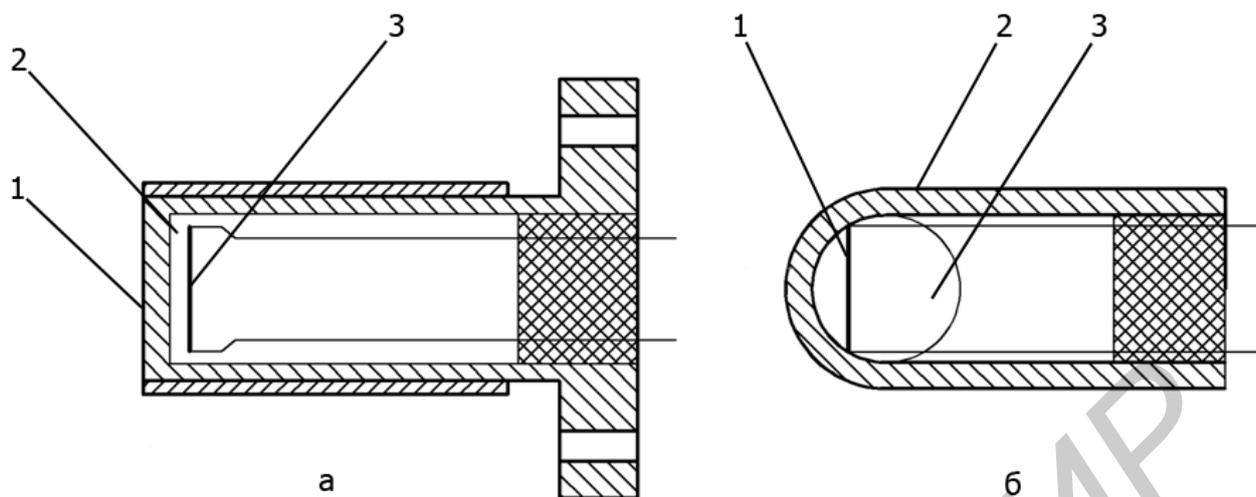


Рис. 3.4. Термопреобразователи с чувствительным элементом на основе НК Si-Ge:

а – термопреобразователь температуры поверхности; б – термопреобразователь погружения

Такие миниатюрные преобразователи температуры массой $\approx 0,5$ г характеризуются диапазоном измеряемых температур $20 \dots 120$ °С, или $-50 \dots +50$ °С, сопротивление при 20 °С от $0,5$ до $1,0$ кОм, погрешность преобразования $0,5$ %, тепловая инерционность $0,1 \dots 0,3$ с.

Позисторы. Позисторы – это терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Обычно позисторы изготавливают на основе керамики из титаната бария. Титанат бария BaTiO_3 – материал с удельным сопротивлением при комнатной температуре $10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·см, что значительно превышает удельное сопротивление полупроводников. Прибавка к составу керамики из титаната бария добавок редкоземельных материалов (лантана, церия и др.) или других элементов (ниобия, тантала, сурьмы, висмута) позволяет уменьшить удельное сопротивление до $10 \dots 100$ Ом·см, что соответствует удельному сопротивлению полупроводниковых материалов.

3.2. Практическая часть

Работа выполняется на персональном компьютере. Программное обеспечение – пакет моделирования электронных схем Multisim.

В работе рассматривается схема с подключением терморезистора в составе делителя напряжения к цифроаналоговому преобразователю, цифровой сигнал с которого поступает на 7-сегментные индикаторы, представляющие относительные значения температуры в шестнадцатеричном виде.

3.2.1. Для исследования терморезистивных датчиков с помощью программы Multisim соберите электрическую схему, приведенную на рис. 3.5. Значения элементов задайте в соответствии со значениями, указанными на схеме.

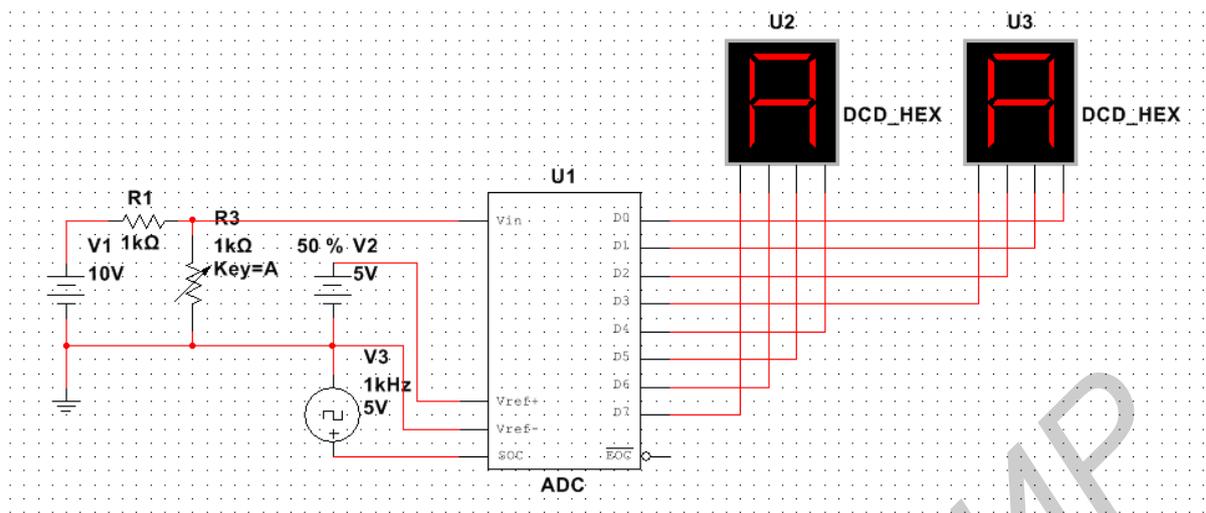


Рис. 3.5. Схема включения терморезистивного датчика

3.2.2. Изменяя значения сопротивления переменного резистора, эмулирующего работу терморезистора, от 0 до 100 % с шагом 5 % (используя клавишу «А» и сочетание клавиш «Shift+А») получите таблицу шестнадцатеричных значений на индикаторе в зависимости от сопротивления терморезистора.

3.2.3. Переведите полученные значения в десятичную форму и постройте график.

3.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Электрические схемы.
4. Результаты лабораторной работы, измеренных параметров (графики, таблицы, значения измеренных параметров, теоретические расчеты).
5. Выводы.

3.4. Контрольные вопросы

1. Классификация датчиков температуры.
2. Конструкция чувствительных элементов терморезистивных преобразователей температуры.
3. Металлопленочные терморезисторы, их достоинства и недостатки.
4. Полупроводниковые датчики температуры.
5. Погрешности терморезистивных преобразователей.

Литература

1. Энциклопедия термометрии / Я. Т. Луцик [и др.]. – Львов : НУ Львовская политехника, 2003. – 428 с.
2. Средства и методы измерений неэлектрической величины : учебник / Е. С. Полишук [и др.]. – Бескид Бит, 2008. – 618 с.
3. Байцар, Р. И. Полупроводниковые микросенсоры / Р. И. Байцар, С. С. Варшава. – Львов : ЛьЦНТЕИ, 2001. – 288 с.
4. Датчики : справочник / З. Ю. Готра [и др.]. – Львов : Каменяр, 1995. – 312 с.
5. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
6. Измерение электрических величин / Н. Н. Евтихеев [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
7. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, И. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
8. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера. 2005. – 592 с.
9. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Мир, 1984. – 912 с.
10. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, А. К. Чиркин. – М. : Высш. шк., 1987. – 479 с.
11. Кривоносов, А. И. Полупроводниковые датчики температуры / А. И. Кривоносов. – М. : Энергия. 1974. – 184 с.

Лабораторная работа №4

Емкостные датчики

Цель работы: изучение принципов действия, характеристик, конструкции, материалов емкостных датчиков.

4.1. Краткие теоретические сведения

Емкость C конденсатора произвольной формы является функцией его конструктивных параметров и свойств среды, заполняющей пространство, охватываемое воздействием его электрического поля.

В частности, для идеализированной модели конденсатора с плоскопараллельными электродами

$$C = \frac{\varepsilon_c S}{\delta} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_c = \varepsilon \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; S – площадь электродов; δ – расстояние между электродами.

Эта функциональная зависимость и положена в основу работы емкостных измерительных преобразователей перемещений, влияющих непосредственно на S или δ , и диэлектрических свойств среды, воздействующих через ε_c .

Применение промежуточных измерительных преобразователей, в частности, механических упругих преобразователей статических сил, давлений, ускорений и т. д. в линейные или угловые перемещения значительно расширяет сферу применения конденсаторных датчиков (динанометры, манометры, виброметры, аксельометры и т. д.).

Воздействие через ε_c используется в уровнемерах, анализаторах состава и, в частности, влажности и в других измерительных преобразователях.

Емкостный измерительный преобразователь может быть представлен всего лишь одним потенциальным электродом. Это предполагает, что другой электрод отнесен в бесконечность. В идеальном случае, если потенциальный электрод представляет собой сферу радиусом r , то емкость конденсатора будет определяться выражением

$$C = 4\pi\varepsilon_c r. \quad (4.2)$$

Несмотря на большое разнообразие конструктивных разновидностей емкостных преобразователей, их можно объединить в три группы: датчики с

плоскими электродами (рис. 4.1); с коаксиальными электродами (рис. 4.2, а, б) и с электродами произвольной формы (рис. 4.2, в).

На рис. 4.1 показан принцип построения емкостных преобразователей с плоскими электродами: а, е – преобразователей с изменяющимся расстоянием между электродами; б, в – преобразователей с изменяющейся площадью перекрытия электродов; г, д – преобразователей с изменяющейся диэлектрической проницаемостью между электродами.

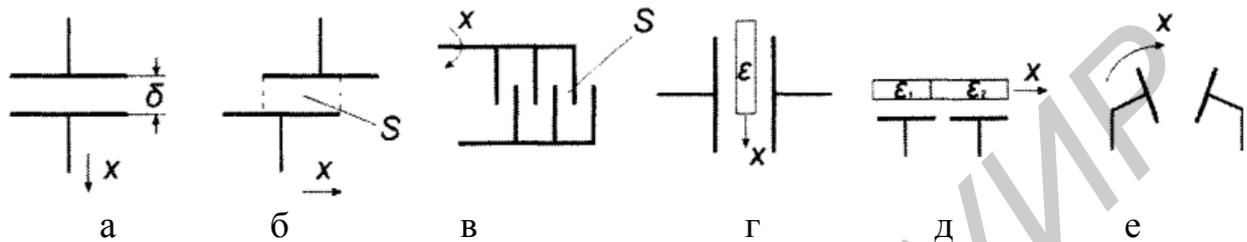


Рис. 4.1. Принцип действия емкостных датчиков с плоскими электродами

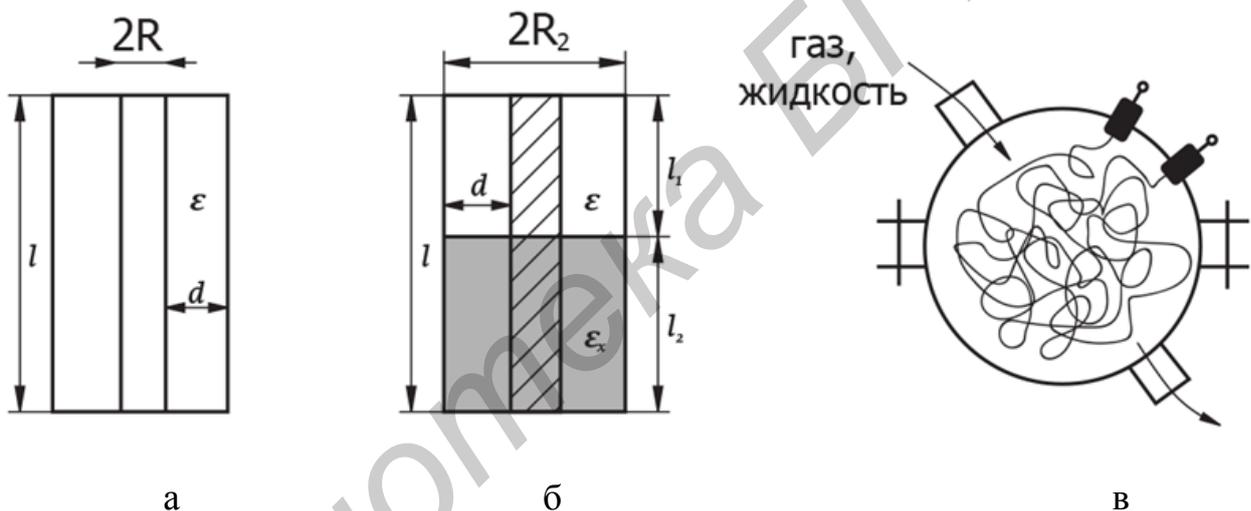


Рис. 4.2. Емкостные преобразователи:
а, б – с коаксиальными электродами;
в – с электродами произвольной формы

Для коаксиального преобразователя (см. рис. 4.2, а, б) соответствующие выражения для емкости будут иметь вид

$$C_a = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(1+d/R_1)}; \quad (4.3)$$

$$C_\delta = \frac{2\pi\epsilon_0 (\epsilon l_1 + \epsilon_x l_2)}{\ln(1+d/R_1)}, \quad (4.4)$$

где l – полная длина электрода; l_1 – длина части электродов, находящихся в воздухе или иной газообразной среде с относительной диэлектрической прони-

емкостью ε ; l_2 – длина части электродов, находящихся в исследуемой среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε_2 ; d – расстояние между электродами; R_1 – радиус внутреннего электрода.

Конструкции емкостных датчиков с электродами произвольной формы могут быть самыми разнообразными: кольцевые, сферические, конические и др. Это разнообразие диктуется спецификой конкретных условий измерений. В частности, на рис. 4.2, в представлен возможный вариант датчика диэлектрических свойств жидкостей или газов [1]. Electroдами такого датчика служат две гибкие проволоки (одножильные или многожильные). Хотя бы одна из них должна быть покрыта изоляцией. Проволоки укладываются в жгут и произвольно сминаются в клубок требуемой формы (сфера, тор, цилиндр и т. д.). Смятие этого клубка, естественно, не должно быть абсолютным, т. е. между проволочными электродами следует оставлять зазоры, хаотично распределенные по их длине и впоследствии заполняемые анализируемой средой. Каждая проволока одним или двумя концами соединена с клеммами датчика, к которым подключается измеритель емкости. Меняя длину проволок и степень их сжатия, можно в широких пределах изменять начальную емкость датчика. В этом случае «паразитная» емкость проводников обращена в полезную, т. е. рабочую емкость датчика с высоким удельным показателем, достигающим 200–300 пФ/см³. Данный датчик может быть использован также в системах дискретного контроля уровня, точнее, границы раздела двух сред: газ – жидкость, жидкость – жидкость.

Определим чувствительность емкостного датчика к той или иной входящей величине. Так как для плоского конденсатора $C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S_{\Pi}}{\delta} = \varepsilon_c \frac{S_{\Pi}}{\delta}$, то

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \varepsilon_c} d\varepsilon_c + \frac{\partial C}{\partial S_{\Pi}} + \frac{\partial C}{\partial \delta} d\delta$$

или, переходя к конечным приращениям, получим

$$\Delta C = \frac{S_0}{\delta_0} \Delta \varepsilon_c + \frac{\varepsilon_{c0}}{\delta_0} \Delta S - \frac{\varepsilon_{c0} S_0}{(\delta_0 + \Delta \delta)^2} \Delta \delta$$

и соответственно относительное изменение емкости

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta \varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} + \frac{\Delta S}{S_0} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2} \frac{\Delta \delta}{\delta_0}, \quad (4.5)$$

где ε_{c0} , S_0 , δ_0 – начальные значения (при отсутствии входного воздействия) диэлектрической проницаемости, активной площади и расстояния между электродами; C_0 – начальная емкость преобразователя.

Относительная чувствительность такого преобразователя, как отношение относительного изменения емкости к относительному изменению зазора при $\varepsilon_c = \text{const}$ и $S_{\Pi} = \text{const}$ имеет вид

$$S_{\delta} = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta \delta/\delta_0} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \delta}{\delta_0}\right)^2}. \quad (4.6)$$

или как относительное изменение емкости к относительному изменению площади ($\varepsilon_c = \text{const}$, $\delta = \text{const}$)

$$S_S = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta S_{\Pi}/S_{\Pi 0}} = 1 \quad (4.7)$$

и как относительное изменение емкости к относительному изменению диэлектрической проницаемости ($S_{\Pi} = \text{const}$, $\delta = \text{const}$)

$$S_{\varepsilon} = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta \varepsilon_c/\varepsilon_{c0}} = 1. \quad (4.8)$$

Так как емкостное сопротивление $X_c = \frac{1}{\omega C}$, то при $\omega = \text{const}$

$$dX_c = \frac{\partial X_c}{\partial \varepsilon_c} d\varepsilon_c + \frac{\partial X_c}{\partial S_{\Pi}} + \frac{\partial X_c}{\partial \delta} d\delta.$$

Отсюда, переходя к конечным приращениям $\Delta \varepsilon_c$, ΔS_{Π} и $\Delta \delta$, получим соответствующие выражения для относительных чувствительностей:

$$S'_{\delta} = \frac{\Delta X_c/X_{c0}}{\Delta \delta/\delta_0} = 1; \quad (4.9)$$

$$S'_{\varepsilon} = \frac{\Delta X_c/X_{c0}}{\Delta \varepsilon_c/\varepsilon_{c0}} = -\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta \varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}}\right)^2}; \quad (4.10)$$

$$S'_s = \frac{\Delta X_c / X_{c0}}{\Delta S / S_0} = - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta S}{S_0}\right)^2}. \quad (4.11)$$

Из приведенных выражений следует, что относительное изменение емкости преобразователя является линейной функцией изменения площади или диэлектрической проницаемости и нелинейной функцией изменения зазора. Относительное изменение реактивного сопротивления пропорционально относительному изменению зазора и является нелинейной функцией относительного изменения площади S и диэлектрической проницаемости ε . Для одинарных датчиков с нелинейной функцией преобразования относительное изменение соответствующего входного параметра при условии, что функцию преобразования можно считать практически линейной, не должно превышать 10–15 %. Для больших относительных изменений входной величины (примерно до 40 %) следует применять дифференциальные датчики.

Емкостные датчики давления. Чувствительными элементами емкостных датчиков давления являются мембраны и диафрагмы, преобразующие измеряемое давление в перемещение. При этом они могут быть одновременно использованы в качестве подвижного электрода емкостного датчика. Соотношение между относительным изменением емкости и измеряемым давлением P емкостного датчика давления с неподвижным плоским электродом 1 и подвижным электродом 2 в виде эластичной мембраны (рис. 4.3, а) можно определить на основании следующих рассуждений.

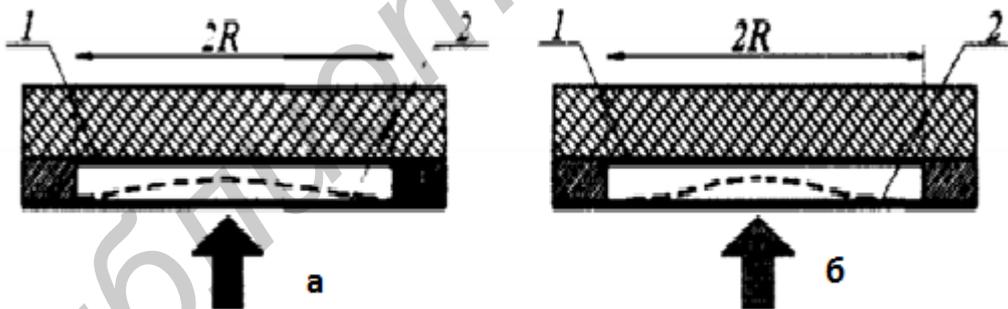


Рис. 4.3. Чувствительные элементы емкостных датчиков давления:
а – подвижный электрод в виде эластичной мембраны;
б – подвижный электрод в виде жесткой мембраны

Начальная емкость (при отсутствии измеряемого давления) такого датчика

$$C_0 = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi R^2}{\delta}. \quad (4.12)$$

Под действием равномерного давления P эластичная мембрана будет приобретать сферическую форму, что приводит к приросту емкости за счет уменьшения расстояния между электродами на величину

$$\Delta C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\pi R^4}{8\delta^2 W} P, \quad (4.13)$$

а относительное изменение емкости

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{R^2}{8\delta W} P, \quad (4.14)$$

где R – радиус мембраны; W – ее жесткость; δ – расстояние между мембраной и неподвижным электродом при отсутствии измеряемого давления.

Таким образом, чувствительность емкостного датчика давления с эластичной мембраной при малых ее прогибах пропорциональна приложенному давлению. Необходимо отметить, что полученный результат применим только для статических отклонений, когда можно пренебречь амортизирующим действием тонкой воздушной прослойки между мембраной и неподвижным электродом. Эта воздушная подушка значительно увеличивает жесткость и снижает чувствительность к динамическим давлениям. Для снижения амортизирующего действия воздушной подушки до пренебрежимо малого значения неподвижный электрод перфорируют [2].

Если в качестве чувствительного элемента емкостного преобразователя давления использовать не эластичную, а жесткую мембрану (рис. 4.3, б), то уравнение преобразования в этом случае будет несколько иным:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{16} \frac{(1-\mu^2)R^4}{E\delta h^3} P, \quad (4.15)$$

где E – модуль упругости материала мембраны; h – ее толщина; μ – коэффициент Пуассона.

Следовательно, чувствительность емкостного датчика давления с жесткой мембраной при малых ее прогибах также пропорциональна давлению и сильно зависит от размеров мембраны (пропорциональна, в частности, четвертой степени радиуса и обратно пропорциональна кубу толщины мембраны).

При конструировании емкостных датчиков особое внимание следует уделять выбору материалов. Для получения минимальной температурной погрешности детали емкостного чувствительного элемента должны быть изготовлены из материалов с незначительными и возможно близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения. Например, для изготовления упругих элементов можно рекомендовать дисперсионно-твердеющий немаг-

нитный сплав 55 БТЮ, отличающийся высокими упругими свойствами, стабильностью температурного коэффициента модуля продольной упругости и коррозионной стойкостью. Материалом изоляционных стоек может быть оптическое стекло марки ЛК6.

Существенным является электростатическое экранирование проводов емкостного датчика. Оно должно быть проведено так, чтобы не оставалось неэкранированных промежутков. По этой причине часть кабеля является обычно как неотъемлемая составляющая датчика.

Емкостные преобразователи обычно имеют верхний предел преобразуемых давлений 200...800 Па при чувствительности 0,5...1,0 пФ/Па и начальной емкости 10...20 пФ. Основная их погрешность составляет 1...2 %.

Современные материалы, в частности металлокерамика, и новые технологии позволяют изготавливать емкостные преобразователи давления высокого класса точности с сочетанием в одном корпусе первичного измерительного преобразователя (чувствительного элемента) и вторичной измерительной схемы.

Датчики уровня. Существует много конструктивных разновидностей емкостных уровнемеров, основные отличия которых определяются степенью электропроводимости исследуемого вещества.

В уровнемерах для электропроводных жидкостей один из электродов покрывают изоляционным материалом, для неэлектропроводных – электроды не изолируются. Напомним, что электропроводными считают жидкости с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^6$ Ом·м и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon < 7$ [2].

В уровнемерах как для электропроводных, так и для неэлектропроводных жидкостей электроды датчиков могут быть выполнены в виде стержней, плоских пластин или цилиндров. Вторым электродом может быть металлическая стенка сосуда с исследуемым веществом.

Одной из самых распространенных является конструкция коаксиального датчика. Его внутренний и внешний цилиндрические электроды находятся в резервуаре с исследуемой жидкостью. Если резервуар жидкостью не заполнен, то емкость между электродами датчика

$$C = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln(1 + d/R_1)}, \quad (4.16)$$

где l – полная длина электродов; R_1 и d – радиус внутреннего электрода и расстояние между электродами; C_0 – емкость, обусловленная проходными изоляторами и соединительными проводами от электродов к вторичной измерительной аппаратуре.

После заполнения резервуара до уровня h емкость изменится до значения

$$C = C_0 + \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(1+d/R_1)} + \frac{2\pi\epsilon_0(\epsilon_X - \epsilon)h}{\ln(1+d/R_1)}. \quad (4.17)$$

Приведенное выражение является упрощенной функцией преобразования емкостного датчика уровня неэлектропроводной жидкости. Эквивалентная емкость такого датчика является суммой трех соединенных параллельно емкостей. Если диэлектрическую проницаемость исследуемой среды можно считать постоянной, информативной является лишь третья составляющая эквивалентной емкости. Поскольку первые две составляющие являются неинформативными, то для увеличения чувствительности емкостного преобразователя должна быть предусмотрена их схемная компенсация.

Измерительные схемы емкостных датчиков. Емкостные датчики обладают сравнительно высокой точностью и довольно низкой стоимостью. Однако разработчики, решившие использовать емкостные датчики в своей конструкции, вынуждены предусмотреть сначала преобразование емкости в напряжение, а затем преобразование этого напряжения в цифровой сигнал с помощью прецизионного АЦП. В итоге система может оказаться более дорогостоящей, менее точной или и то, и другое сразу [3].

Существует несколько типичных методов измерения емкости.

Прямой метод подразумевает заряд конденсатора от источника тока в течение определенного времени и затем измерение напряжения на конденсаторе. Этот метод требует наличия прецизионного источника очень маленького тока и высокоимпедансного входа измерителя напряжения.

Второй метод подразумевает использование измеряемой емкости в качестве времязадающей в RC-генераторе с последующим измерением постоянной времени, частоты или периода. Этот метод прост, но обычно не обеспечивает высокой точности.

Еще один подход заключается в измерении импеданса конденсатора на переменном токе. Источник синусоидального сигнала подключается к конденсатору, и при этом измеряются напряжение и ток через конденсатор. При использовании четырехпроводного логометрического подключения (при котором измеряется соотношение импедансов) и синхронного демодулятора можно получить наиболее точный результат.

Однако такая схема сравнительно сложная и состоит из многих компонентов.

Наиболее распространенный метод измерения емкости прецизионного датчика с малой величиной емкости заключается в применении зарядового усилителя, который преобразует соотношение измеряемой и опорной емкостей в сигнал напряжения. Такая схема поставляется в виде специализированных микросхем и подходит для некоторых систем при больших объемах производства [4].

Во всех описанных методиках емкость сначала преобразуется в напряжение, которое затем преобразуется в цифровой код при помощи прецизионного АЦП.

Представляет интерес использование стандартной микросхемы прецизионного таймера NE555 на биполярных транзисторах либо ее более современный аналог на базе КМОП-технологий таймера ICM7555.

На рис. 4.4, а показана схема подключения датчика C_x к микросхеме NE555.

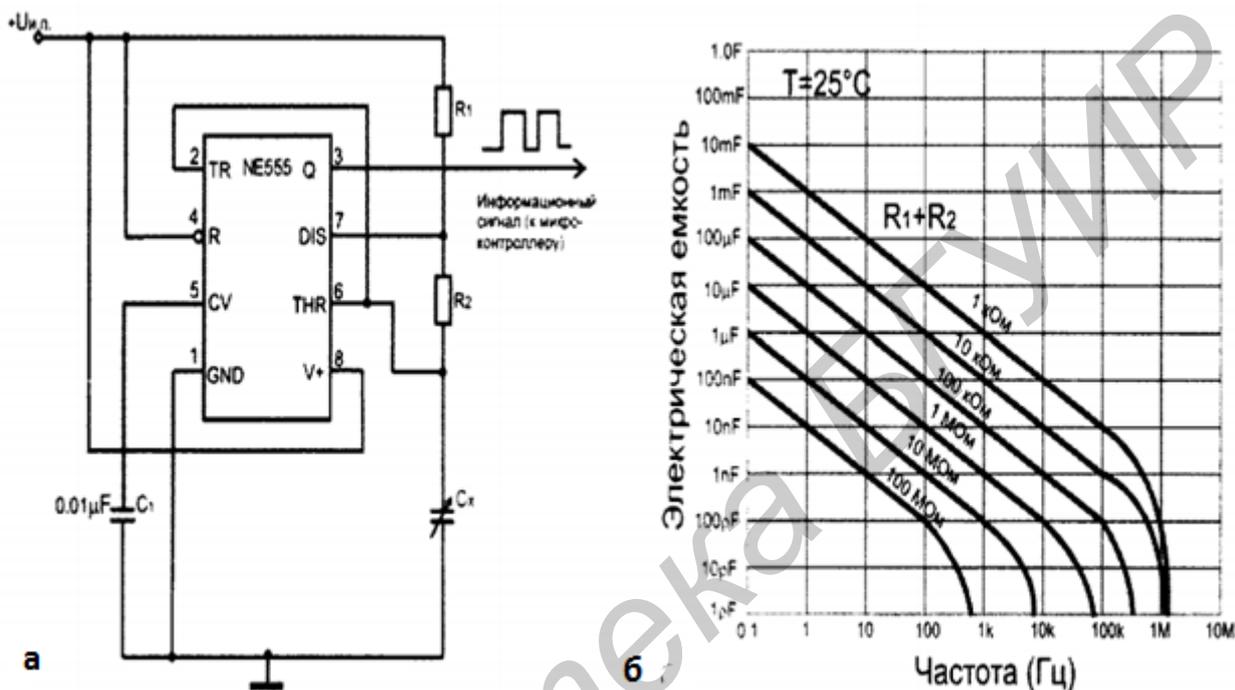


Рис. 4.4. Измерительное устройство на базе таймера:

а – схема измерительного преобразователя емкость – частота; б – график зависимости частоты информационного сигнала от параметров R_1 ; R_2 и C_x

Микросхема включена в режиме мультивибратора. Во время задающую цепь RC-генератора включены времязадающие резисторы R_1 и R_2 с известными значениями сопротивлений. Преобразованный сигнал в виде частоты может подаваться на любое микроконтроллерное устройство для дальнейшей обработки.

Следует отметить, что для достижения необходимой чувствительности и стабильности работы устройства в нужном диапазоне измеряемой емкости требуется подбор параметров времязадающих элементов и R_1 и R_2 (см. рис. 4.4, б).

Устройство обладает чувствительностью 0,01 пФ.

Компанией Galltec+MELA данная схема также с успехом применяется в электронных схемах чувствительных элементов оборудования для измерения влажности.

Применение в качестве таймера микросхемы IСМ7555 позволяет на порядок снизить ток, потребляемый устройством, с 10 мА до 100 мкА, что добавляет неоспоримые преимущества при конструировании устройств с автономным питанием.

Наиболее перспективными являются микроконтроллерные измерительные устройства, позволяющие не только измерять емкость датчика, но и проводить с полученным результатом измерения необходимые расчеты.

4.2. Практическая часть

Работа выполняется на персональном компьютере. Программное обеспечение – пакет моделирования электронных схем Multisim.

4.2.1. Для исследования емкостных датчиков с помощью программы Multisim соберите электрическую схему, приведенную на рис. 4.5. Значения элементов задать в соответствии со значениями, указанными на схеме.

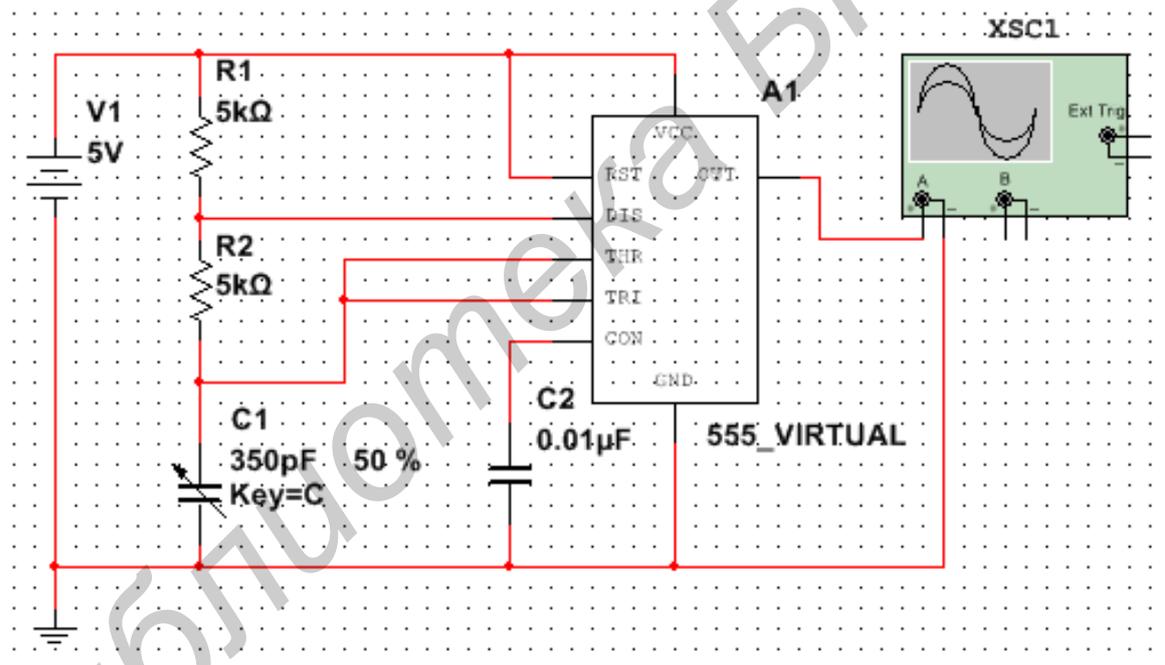


Рис. 4.5. Схема подключения емкостного датчика к микросхеме NE555

В результате моделирования работы устройства сигнал на экране осциллографа должен принять следующий вид, как на рис. 4.6.

4.2.2. Далее следует определить частоту выходного сигнала, установив метки 1, 2 на экране осциллографа на начало фронта соседних импульсов (рис. 4.7).

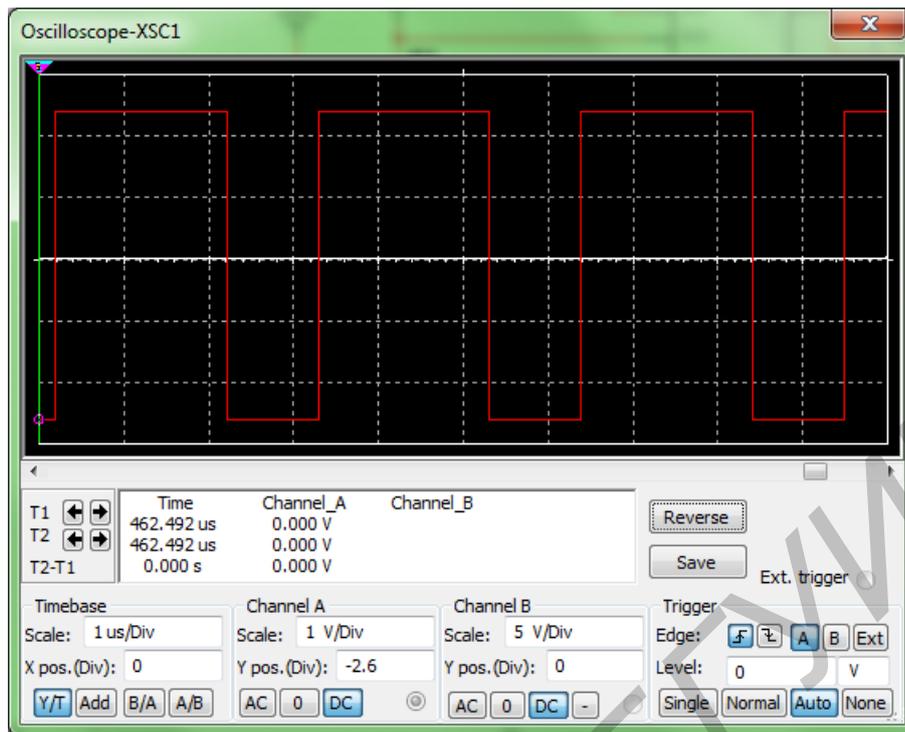


Рис. 4.6. Сигнал на экране осциллографа

Как видно из рис. 4.7, период выходного сигнала равен 3 мс, а частота соответственно – 330 кГц.

4.2.3. Постройте таблицу зависимости частоты выходного сигнала от емкости датчика для трех значений $R1 + R2$: 1, 10, 100 кОм. Емкость датчика (300 пФ) изменять от 5 до 100 % с шагом 5 %. Результаты измерений занесите в таблицу.

4.2.4. По результатам п. 4.2.3 построьте графики зависимости частоты выходного сигнала от емкости датчика при различных значениях $R1 + R2$.

4.2.5. Определите изменение частоты выходного сигнала при изменении емкости датчика на 1 % для следующих значений $R1 + R2$: 100 Ом; 1, 5, 10, 20, 50, 100 кОм. Результаты оформите в виде таблицы.

4.2.6. По результатам п. 4.2.5 постройте график чувствительности схемы при различных значениях $R1 + R2$.

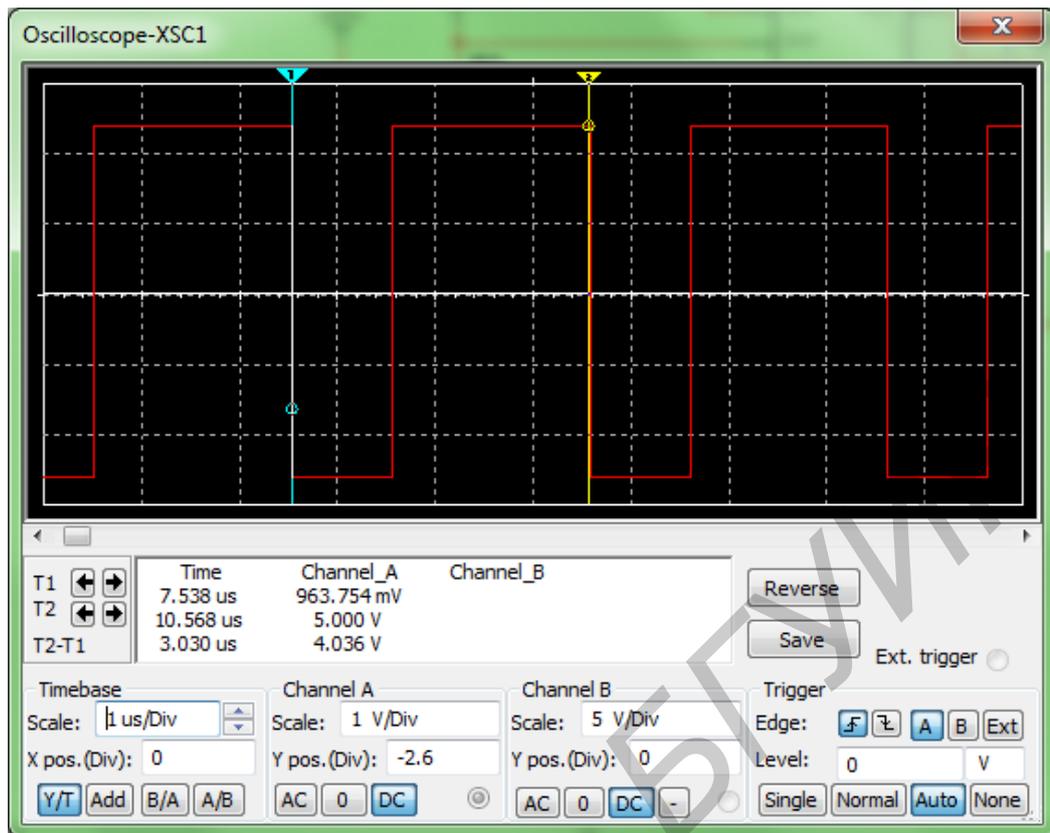


Рис. 4.7. Определение частоты выходного сигнала

4.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Электрические схемы.
4. Результаты лабораторной работы, измеренных параметров (графики, таблицы, значения измеренных параметров, теоретические расчеты).
5. Выводы.

4.4. Контрольные вопросы

1. Конструктивные разновидности емкостных преобразователей.
2. Чувствительность емкостного датчика.
3. Емкостные датчики давления.
4. Датчики уровня.
5. Измерительные схемы емкостных датчиков.

Литература

1. Емкостные датчики / В. М. Шарапов [и др.]; под ред. В. М. Шарапова. – Черкассы : Брама – Украина, 2010. – 184 с.
2. Полищук, Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Полищук. – Киев : Вища школа, 1981. – 296 с.
3. Измерение электрических и неэлектрических величин : учеб. пособие для вузов / Н. Н. Евтихий [и др.] ; под общ. ред. Н. Н. Евтихьева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон ; пер с англ. – М. : Энергия, 1970. – 12 с.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №5

Фотодатчики

Цель работы: изучение основ теории фотодатчиков, принципа действия, разновидностей фотодатчиков, материалов, схем включения и способов применения.

5.1. Краткие теоретические сведения

Фотоэлектрические датчики используются во многих отраслях промышленности для обеспечения точного обнаружения объектов без физического контакта. Существуют следующие типы оптических датчиков:

- датчики на основе прерывания луча (барьерные);
- датчики, отражающие луч от рефлектора (рефлекторные);
- датчики, отражающий луч от объекта (диффузные).

На рис. 5.1. дана блок-схема фотоэлектрического датчика.

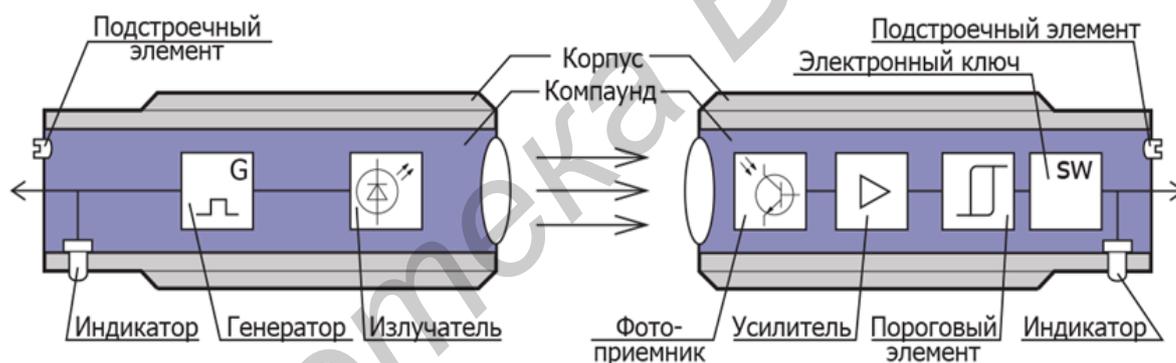


Рис. 5.1. Блок-схема фотоэлектрического датчика

Принцип действия

Источник излучения (излучатель):

1. Генератор вырабатывает последовательность электрических импульсов на излучатель.
2. Излучатель – светодиод, создающий излучение оптического диапазона.
3. Индикатор показывает наличие напряжения питания на излучателе.
4. Оптическая система формирует диаграмму направленности излучения и при необходимости поляризацию излучения.

Приемник излучения:

1. Оптическая система формирует диаграмму направленности приемника и при необходимости производит поляризационную селекцию.
2. Фотоприемник воспринимает излучение и преобразует его в электрический сигнал.
3. Усилитель увеличивает входной сигнал до необходимого значения.

4. Пороговый элемент обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса.

5. Электронный ключ обеспечивает коммутацию выходного тока выключателя, определяет схему подключения нагрузки, имеет защиту от перегрузки и короткого замыкания.

6. Светодиодный цветной индикатор показывает состояние выключателя, позволяет определить функциональный резерв по выбранному объекту, обеспечивает контроль работоспособности, оперативность настройки.

7. Регулятор чувствительности позволяет производить настройку выключателя по фактической контрастности объекта на фоне окружающих предметов.

В качестве простейшего фотодатчика можно использовать фотодиод.

Фотодиод (ФД) представляет собой диод с открытым $p-n$ -переходом. Световой поток, падающий на открытый $p-n$ -переход, приводит к появлению в одной из областей дополнительных неосновных носителей зарядов, в результате чего увеличивается обратный ток. В общем случае ток фотодиода определяется формулой

$$I = I_{\text{диф}} - (I_S + I_\Phi) = I_S \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_\Phi,$$

где I_S – обратный ток диода; φ_T – тепловой потенциал; $I_{\text{диф}}$ – прямой ток диода; I_Φ – фототок.

Вольт-амперные характеристики ФД приведены на рис. 5.2. Здесь Ψ_K контактная разность потенциалов; для германия имеет значение 0,6...0,7 В, а для кремния 0,9...1,2 В.

Без включения нагрузки фотодиод может работать в двух режимах:

- короткого замыкания;
- холостого хода.

Определить напряжение холостого хода $U_{x.x}$ можно при помощи выражения

$$U_{x.x} = \varphi_T \ln \left(\frac{I_\Phi}{I_S} + 1 \right).$$

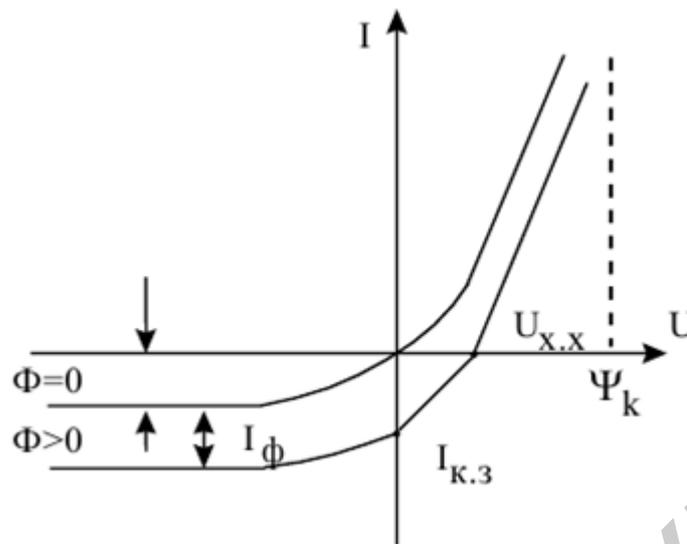


Рис. 5.2. Вольт-амперные характеристики фотодиода

При $I = 0$ область p заряжается положительно, а область n – отрицательно, и между электродами фотодиода при освещении появляется разность потенциалов, называемая фотоЭДС. ФотоЭДС равна напряжению $U_{х.х}$ и не может превышать контактной разности потенциалов. Для режима холостого хода характерна логарифмическая зависимость выходного напряжения от освещенности, причем выходное напряжение не превышает некоторого определенного значения при любой освещенности.

Для схемы на рис. 5.2 можно записать уравнения

$$i_{\text{ВХ}} = -i_{\text{VD}}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{VD}}.$$

Учитывая связь между током и напряжением на диоде

$$i_{\text{VD}} \approx I_s e^{U/\varphi_T}; \quad U_{\text{VD}}/\varphi_T.$$

Реализовать режим короткого замыкания фотодиода можно только с помощью операционного усилителя, например, в схеме логарифматора тока (рис. 5.3). В цепи отрицательной обратной связи включен диод VD.

Для этой схемы можно записать уравнения: учитывая связь между током и напряжением на диоде.

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\varphi_T \ln \frac{i_{\text{ВХ}}}{I_s}$$

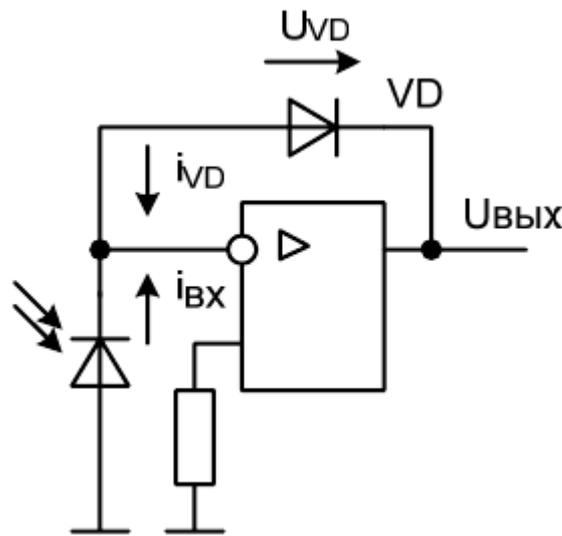


Рис. 5.3. Схема логорифматора тока

На практике используют схему преобразования тока в напряжение. Эта схема, преобразующая малый входной ток в напряжение, находит применение в устройствах гальванической развязки цепей с использованием оптопар. В схеме (рис. 5.4) сопротивление нагрузки для источника тока (фотодиода)

$$R_{oc} = 1 \text{ МОм}, K = 5 \cdot 10^4, R_{вх} = 20 \text{ Ом}.$$

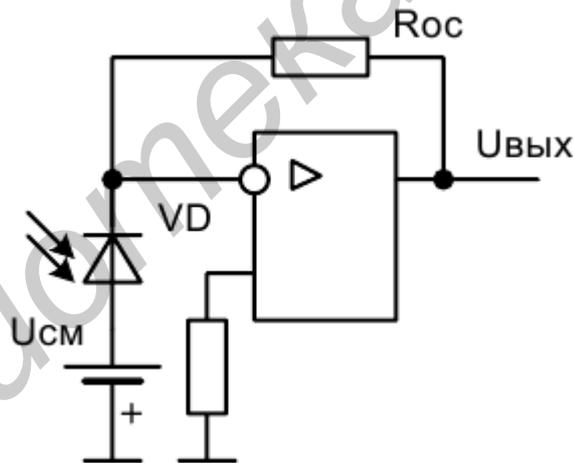


Рис. 5.4. Схема преобразования тока в напряжение

Благодаря этой схеме увеличивается быстродействие фотодиода и повышается линейность световой характеристики. На практике реализовать режим холостого хода затруднительно. В этом случае можно говорить о работе фотодиода на некоторую нагрузку. Схема включения фотодиода на нагрузку приведена на рис. 5.5, а, а нагрузочная характеристика – на рис. 5.5, б. Для построения нагрузочной прямой поступают следующим образом. На горизонтальной оси откладывают напряжение источника E , а на вертикальной оси – ток короткого замыкания.

Прямая, соединяющая эти точки, и является нагрузочной прямой.

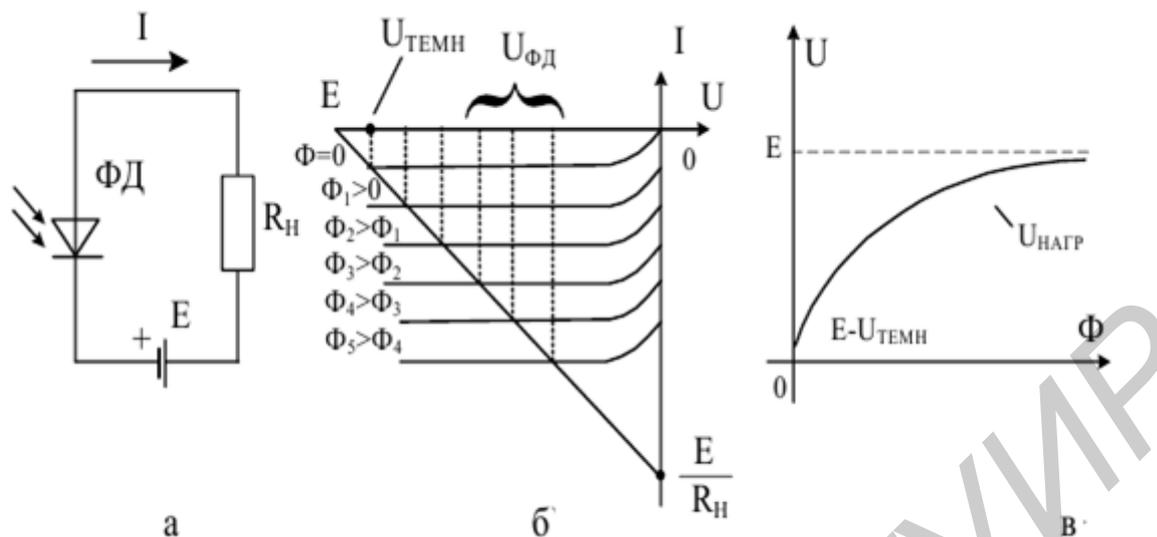


Рис. 5.5. Схема включения фотодиода:

- а – включения фотодиода на нагрузку; б – нагрузочная характеристика;
в – зависимость напряжения на фотодиоде от освещения

Пересечение нагрузочной прямой с вольт-амперными характеристиками фотодиода позволяет определить напряжение на нагрузке. Для этого нужно из точек пересечения провести прямые, перпендикулярные горизонтальной оси до пересечения с ней. Расстояние от координаты E до точки пересечения перпендикуляра с осью и будет значением напряжения на нагрузке:

$$U_{\text{нагр}} = E - U_{\text{ФД}}$$

Из приведенного на рис. 5.5, в построения следует, что при отсутствии освещения напряжение на фотодиоде будет максимальным.

При увеличении освещения ток в фотодиоде возрастает, а напряжение на нем падает. Напряжение на нагрузке определяется как разность напряжения источника питания и напряжения на фотодиоде.

Основным элементом фотодатчиков является фотоприемник. Фотоприемники – полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе фотодетектора.

Основные параметры и характеристики фотоприемников (безотносительно к физической природе и конструкции этих приборов) можно подразделить на несколько групп. К оптическим характеристикам относятся площадь фоточувствительной поверхности, материал, размеры и конфигурация оптического окна; максимальный и минимальный уровни мощности излучения. К электрооптическим – фоточувствительность, степень однородности распределения чувствительности по фотоприемной площадке; спектральная плотность чув-

ствительности (зависимость параметра, характеризующего чувствительность, от длины волны); собственные шумы фотоприемника и их зависимость от уровня засветки и диапазона рабочих частот; разрешающее время (быстродействие); коэффициент качества (комбинированный показатель, позволяющий сопоставлять различные фотоприемники друг с другом); показатель линейности; динамический диапазон. Как элемент электрической цепи фотоприемник характеризуется прежде всего параметрами его эквивалентной схемы, требованиями к рабочим режимам, наличием (или отсутствием) встроенного механизма усиления, видом и формой выходного сигнала. Прочие характеристики: эксплуатационные, надежность, габаритные, технологические – ничего специфически «фотоприемного» не содержат.

В зависимости от характера выходного сигнала (напряжение, ток) говорят о вольтовой или токовой фоточувствительности приемника S , измеряемой соответственно в В/Вт или А/Вт. Линейность (или нелинейность) фотоприемника определяется значением показателя степени n в уравнении, связывающем выходной сигнал с входным: $U_{\text{вых}}$ (или $I_{\text{вых}}$) $\sim P_{\text{ф}}$. При $n \approx 1$ фотоприемник линеен; область значений $P_{\text{ф}}$ (от $P_{\text{ф max}}$ до $P_{\text{ф min}}$), в которой это выполняется, определяет динамический диапазон линейности фотоприемника Δ , выражаемый обычно в децибелах: $\Delta = 10 \lg(P_{\text{ф max}}/P_{\text{ф min}})$.

Важнейшим параметром фотоприемника, определяющим порог его чувствительности, является удельная обнаружительная способность D , измеряемая в Вт \cdot л \cdot м \cdot Гц $^{1/2}$. При известном значении D порог чувствительности (минимальная фиксируемая мощность излучения) определяется как

$$P_{\text{ф min}} = \sqrt{A \Delta f} / D,$$

где A – площадь фоточувствительной площадки; Δf – диапазон рабочих частот усилителя фотосигналов. Иными словами, параметр D играет роль коэффициента качества фотоприемника.

В применении к оптронам не все перечисленные характеристики оказываются одинаково важными. Как правило, фотоприемники в оптронах работают при облученностях, очень далеких от пороговых, поэтому использование параметров $P_{\text{ф min}}$ и D оказывается практически бесполезным. Конструктивно фотоприемник в оптроне обычно «утоплен» в иммерсионную среду, соединяющую его с излучателем, поэтому знание оптических характеристик входного окна теряет смысл (как правило, специально такого окна нет). Не очень важно знать и распределение чувствительности по фоточувствительной площадке, так как интерес представляют интегральные эффекты.

На рис. 5.6 даны схемы измерения и семейства вольт-амперных характеристик фотодиодов.

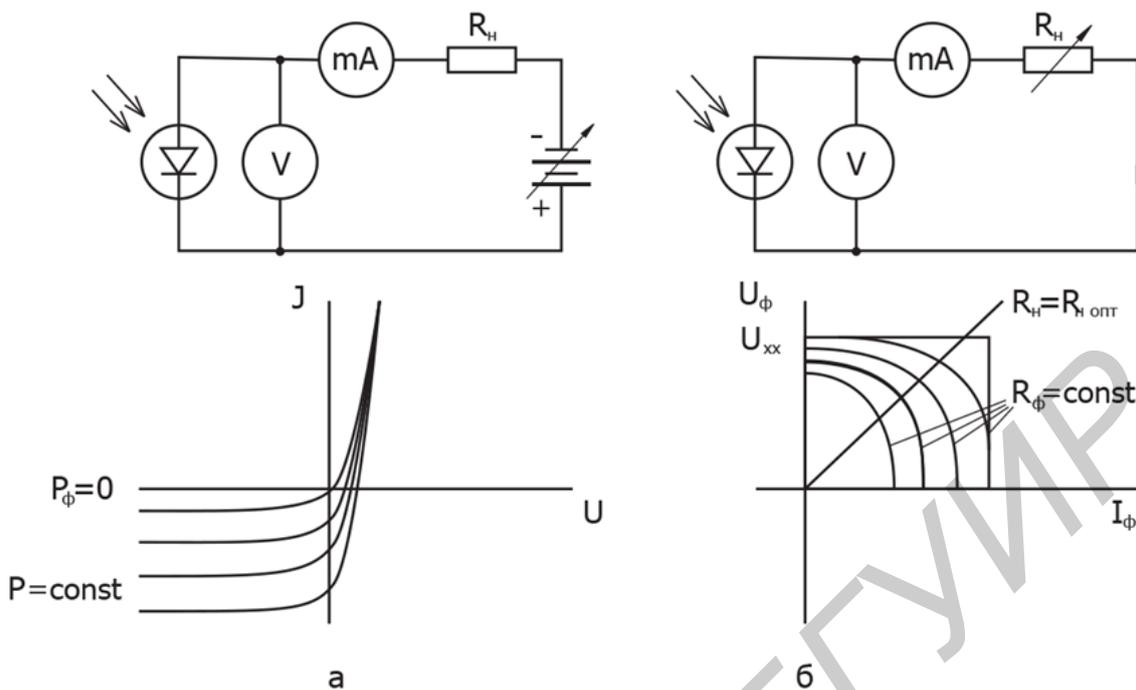


Рис. 5.6. Схемы измерения и семейства вольт-амперных характеристик в фотодиодном режиме (а), фотопроводном режиме (б)

Механизм работы фотоприемников, базирующихся на фотовольтаическом эффекте, рассмотрим на примере планарно-эпитаксиальных фотодиодов с $p-n$ -переходом и с $p-i-n$ -структурой, в которых можно выделить n^+ -подложку, базу n - или i -типа (слабая проводимость n -типа) и тонкий p^+ -слой. При работе в фотодиодном режиме (рис. 5.6, а) приложенное извне напряжение заставляет подвижные дырки и электроны уходить от $p-n(-i)$ -перехода; при этом картина распределения поля в кристалле оказывается резко различной для двух рассматриваемых структур.

Световое излучение, поглощаясь в базовой области диода, генерирует электронно-дырочные пары, которые диффундируют к $p-n$ -переходу, разделяются им и вызывают появление дополнительного тока во внешней цепи. В $p-i-n$ -диодах это разделение происходит в поле i -области и вместо процесса диффузии имеет место дрейф носителей заряда под влиянием электрического поля. Каждая генерированная электронно-дырочная пара, прошедшая через $p-n$ -переход, вызывает прохождение во внешней цепи заряда, равного заряду электрона. Чем больше облученность диода, тем больше фототок. Фототок протекает при смещении диода в прямом направлении (рис. 5.6, б), при небольших напряжениях оказывается намного меньше прямого тока, поэтому его выделение оказывается затруднительным.

Статистические параметры фотоприемников. Если на выходе фотоприемника изменяется ток, то фотоприемник характеризуется токовой чувствительностью S_i . Токовая чувствительность – величина, характеризующая изме-

нение тока, снимаемого с фотоприемника при единичном изменении мощности падающего оптического излучения:

$$S_i = \frac{\Delta I}{\Delta P} B / B_t. \quad (5.1)$$

Если регистрируемый сигнал на выходе фотоприемника – напряжение, то вводят понятие «вольтовая чувствительность» – как величину, показывающую, на сколько изменится напряжение на выходе фотоприемника при единичном изменении мощности падающего лучистого потока:

$$S_v = \frac{\Delta U}{\Delta P} B / B_t.$$

К фотоприемникам относятся:

- фотодиоды;
- фоторезисторы;
- *p-i-n*-фотодиоды;
- фототранзисторы.

Под действием оптического излучения образуется электронно-дырочная пара и в области пространственного заряда *p-n*-перехода резко возрастает обратный ток фотодиода (рис. 5.7).

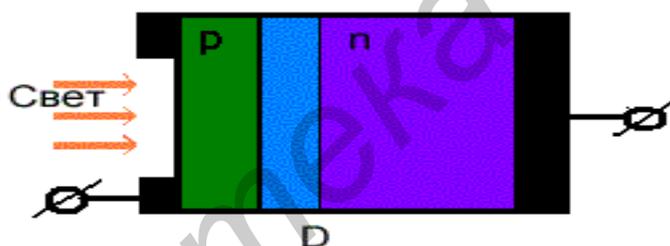


Рис. 5.7. Схема фотодиода

Рассмотрим фотодиод на основе *p-n*-перехода (рис. 5.8).

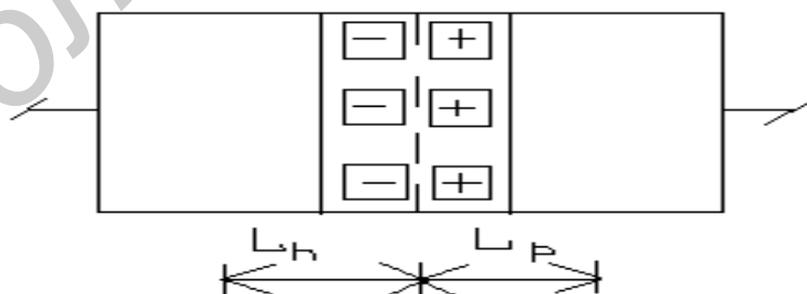


Рис. 5.8. Фотодиод на основе *p-n*-перехода

На рис. 5.9 дана ВАХ фотодиода.

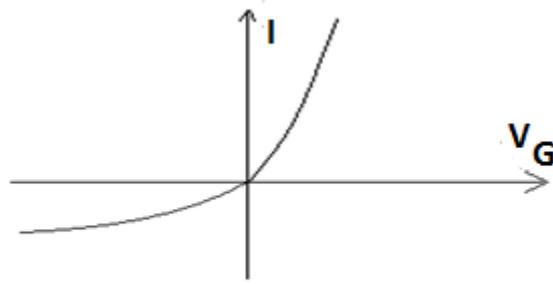


Рис. 5.9. ВАХ фотодиода

При освещении фотодиода происходит генерация электронно-дырочных пар. Во всем проводнике изменяется концентрация неосновных носителей, следовательно, возрастает дрейфовая компонента тока, а диффузионная не меняется:

$$\Delta N, \Delta P \gg Pn_0, Np_0.$$

Полный ток в фотодиоде:

- $I = I_{\Phi} + I_{\text{темн}}$;
- фототок от напряжения не зависит;
- область поглощения светового потока должна принадлежать промежутку $(-L_{p,n}; L_{p,n})$;
- ВАХ сдвигаются эквидистантно (рис. 5.10).

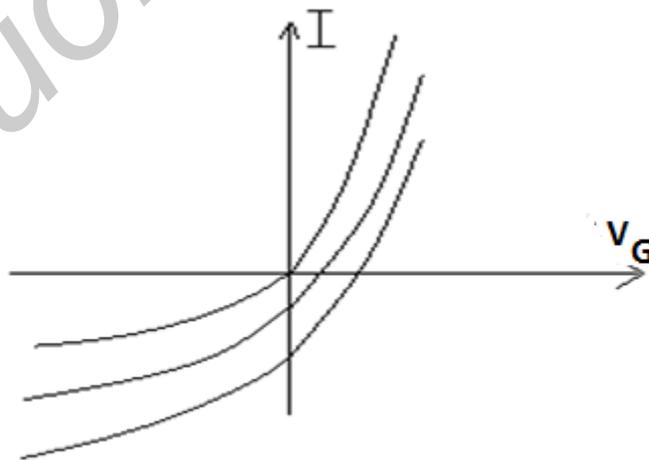


Рис. 5.10. Эквидистанциальный сдвиг ВАХ

Расчет полного тока производится следующим образом:

$$I = I_{\Gamma} + I_n + I_p = I_m + I_{\Phi},$$

где I_n – обусловлена равновесными и избыточными электронами в p -области; I_{Γ} – обусловлена термо- и фотогенерацией электронно-дырочных пар в области пространственного заряда p - n -перехода; I_p – обусловлена дырками в n -области; I_m – плотность темнового тока; I_{Φ} – добавка за счет действия оптического излучения.

Вклад в I_n и I_p вносят те носители, которые не рекомбинируют с основными носителями и достигают за счет диффузии p - n -перехода.

Фоторезистор – это пластина полупроводника, на противоположных концах которого расположены омические контакты (рис. 5.11).



Рис. 5.11. Схема фоторезистора

Поток внутри полупроводника имеет вид

$$\Phi(x) = \Phi_0(1-R)\exp(-\alpha x),$$

где Φ_0 – падающий поток; R – коэффициент отражения; α – коэффициент поглощения.

$$n_{\Phi n} = \frac{\alpha \cdot \Phi_0 \cdot (1-R) e^{-\alpha x}}{S \Phi \cdot h\nu},$$

где S_{Φ} – площадь.

Работа фоторезистора характеризуется следующими показателями.

1. Квантовая эффективность (усиление).

Поскольку концентрация изменяется по закону

$$N = N_0 \cdot \exp(-t/T),$$

где T – время релаксации, то коэффициент усиления по току выражается как

$$I_p/I_{ph} = M_n \cdot T \cdot E/L = T/t_p;$$

$$t_p = L/V_{др} - \text{время полета.}$$

2. Время фотоответа. Зависит от времени пролета. Обычно у фоторезистора время ответа больше, чем у фотодиода, поскольку между контактами большое расстояние и слабое электрическое поле.

3. Обнаружительная способность. *P-i-n*-фотодиод построен на обычном *p-i-n*-диоде. Эти приборы являются наиболее распространенными, так как толщину обедненной области можно сделать такой, что обеспечивается оптимальная квантовая эффективность и быстродействие (рис. 5.12).

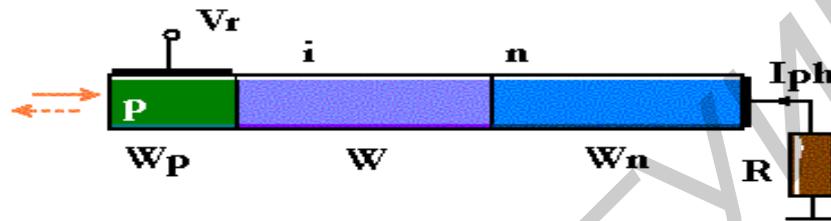


Рис. 5.12. *P-i-n*-фотодиод

Устройство и эквивалентная схема. Фототранзистор действует так же, как и остальные фотодетекторы, однако транзисторный эффект обеспечивает усиление фототока. По сравнению с фотодиодом фототранзистор более сложен в изготовлении и уступает ему в быстродействии из-за большей площади (рис. 5.13, 5.14).

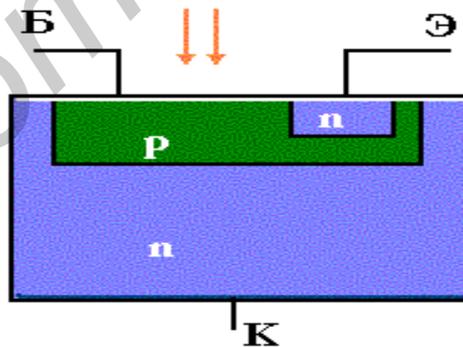


Рис. 5.13. Устройство фототранзистора

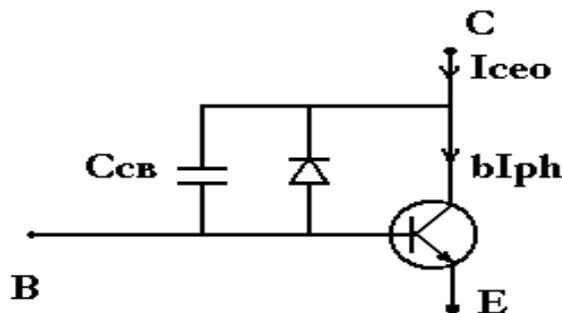


Рис. 5.14. Эквивалентная схема фототранзистора

Переход база – коллектор играет роль чувствительного элемента. На рис. 5.14 он показан в виде диода с параллельно включенной емкостью, имеет большую площадь.

5.2. Практическая часть

5.2.1. Вызовите программу Multisim.

5.2.2. Откройте файл «ЛАБ5», на экране появится схема включения фотодиода (рис. 5.15), где $V1$ – источник питания; $V2$ – источник света, напряжение, на котором симулируют световой поток, VD – полупроводниковый фотодиод BPV10NF, соответствующий зарубежной маркировке; $R1$ – сопротивление нагрузки. Постройте схему.

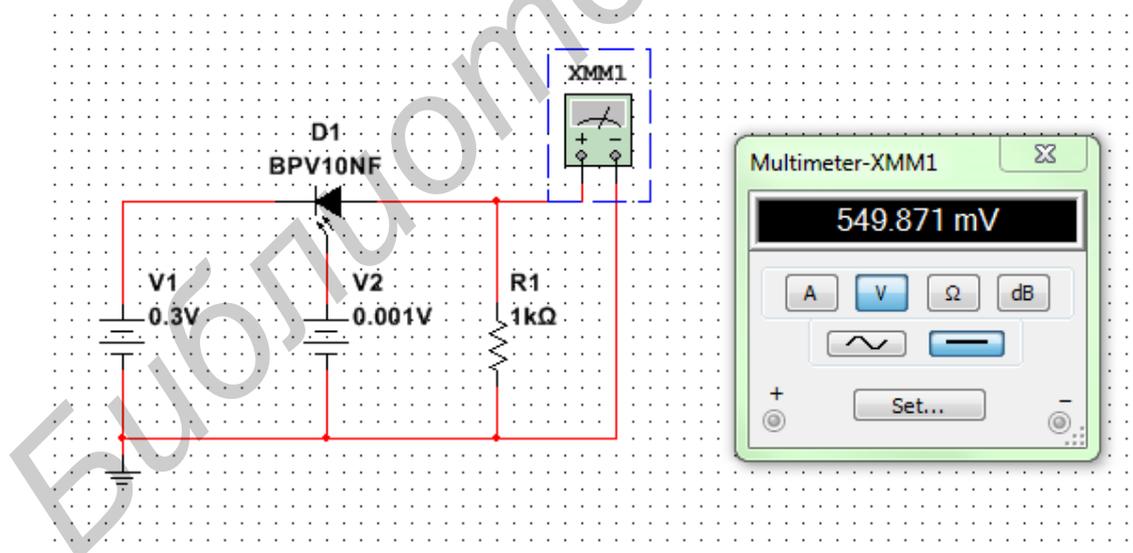


Рис. 5.15. Схема включения фотодиода

5.2.3. Снимите нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора (равном 0) для двух значений светового потока (при $V2 = 0,5$ мВ и при $V2 = 1$ мВ): установите напряжение на $V1 = 0$ (двойной щелчок по эле-

менту); установите величину светового потока, соответствующего напряжению на $V2 = 0,5$ мВ; измените сопротивление нагрузки R в соответствии со значениями, приведенными в табл. 5.1; измерьте значения тока нагрузки и фотонапряжения U , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить), где ток I_n показан зеленым цветом, напряжение U – синим цветом, напряжение источника $V2$ – красным цветом. Результаты занесите в табл. 5.1; повторите измерения для напряжения $V2 = 1$ мВ в соответствии с табл. 5.1.

Таблица 5.1

Нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора

$V1 = 0,5$ мВ			$V2 = 1$ мВ		
R , кОм	I_n , мкА	U_ϕ , мВ	R , кОм	I_n , мкА	U_ϕ , мВ
0,1			0,1		
1			1		
2			2		
5			5		
10			10		
100			100		

5.2.4. Снять статические вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя (при $R = 100$ Ом) для двух значений светового потока (при $V2 = 10$ мВ и при $V2 = 20$ мВ): установить величину светового потока, соответствующего напряжению на $V2 = 10$ мВ; установить значение $R = 100$ Ом; изменять значения напряжения U_a источника $V1$ в соответствии со значениями, приведенными в табл. 4.9; измерить значения фототока I_ϕ , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить), где фототок I показан зеленым цветом, напряжение U – синим цветом, напряжение источника $V2$ – красным цветом.

Результаты занесите в табл. 5.2; повторите измерения для напряжения $V2 = 20$ мВ в соответствии с табл. 5.1; результаты занесите в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Статические вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

$V1 = 10 \text{ мВ}$		$V2 = 20 \text{ мВ}$	
$U_a, \text{ В}$	$I_\phi, \text{ мА}$	$U_a, \text{ В}$	$I_\phi, \text{ мА}$
0,01		0,01	
0,05		0,05	
0,1		0,1	
0,2		0,2	
0,3		0,3	
0,5		0,5	
1		1	

5.2.5. Снимите нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя (при $V1 = 3 \text{ В}$) для двух значений светового потока (при $V2 = 10 \text{ мВ}$ и при $V2 = 20 \text{ мВ}$).

5.2.6. Установите напряжение на $V1 = 3 \text{ В}$ (двойной щелчок по элементу); установите величину светового потока, соответствующего напряжению на $V2 = 10 \text{ мВ}$; измените сопротивление нагрузки R в соответствии со значениями, приведенными в табл. 5.3; измерьте значения тока нагрузки I_H и фотонапряжения U , воспользовавшись кнопками меню «Analysis» (Анализ), «Transient Analysis» (Анализ переходных процессов), «Run» (Запустить), где ток I показан зеленым цветом, напряжение U – синим цветом, напряжение источника $V2$ – красным цветом. Результаты занесите в табл. 5.3; повторите измерения для напряжения $V2 = 20 \text{ мВ}$ в соответствии с табл. 5.3; результаты занесите в табл. 5.3.

Нагрузочные характеристики фотодиода в режиме
фотопреобразователя

$V_1 = 10 \text{ мВ}$		$V_2 = 20 \text{ мВ}$	
$R, \text{ кОм}$	$I_{\text{н}}, \text{ мА}$	$R, \text{ кОм}$	$I_{\text{н}}, \text{ мА}$
0.1		0.1	
1		1	
2		2	
5		5	
10		10	
100		100	

5.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Электрические схемы.
4. Результаты лабораторной работы, измеренных параметров (графики, таблицы, значения измеренных параметров, теоретические расчеты).
5. Выводы.

5.4. Контрольные вопросы

1. Принцип работы фотодатчиков.
2. Классические фотоприемники.
3. Статические параметры фотоприемников.
4. Схема подключения и режимы работы фотодатчиков.
5. Характеристики фотодатчиков.

Литература

1. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон ; пер. с англ. ; под ред. В. В. Лучинина. – М. : Техносфера, 2007. – 380 с.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2006. – 592 с.

Учебное издание

**ДАТЧИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях

Часть 1

**Серенков Валентин Юрьевич
Рак Алексей Олегович
Баранов Валентин Владимирович**

**Физические принципы преобразования неэлектрических
величин в электрические сигналы**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. И. Герман*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 100 экз. Заказ 203.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6