

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию

Томский политехнический университет

---

УТВЕРЖДАЮ: Декан ЭФФ

\_\_\_\_\_ Евтушенко Г.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Методические указания по подготовке и  
выполнению лабораторной работы № 428 по  
курсу "Методы и средства измерений" для  
студентов специальности 190900–  
Информационно-измерительная техника и  
технологии

Томск 2005г.

УДК 621.317.39 (075.8)

Исследование фотоэлектрических преобразователей. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 428 для студентов специальности 190900 – Информационно-измерительная техника и технологии. – Томск: Изд. ТПУ. 2005 .– 15с.

Составители: Б.Б.Винокуров

Рецензент: В.Ф.Вотьяков

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры информационно-измерительной техники 26.01.2005г.

Зав. кафедрой ИИТ \_\_\_\_\_ В.К.Жуков

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 428

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ

- $I_{\Phi}$  - фототок измерительного преобразователя, мкА;  
 $E$  - освещенность, лк (люкс);  
 $U$  - электрическое напряжение, В;  
 $\lambda$  - длина волны оптического излучения, мкм;  
 $\lambda_0$  - длина волны видимого света - (0,4÷0,76) мкм;  
 $\omega$  - частота оптического излучения,  $\omega = 2\pi\nu$ ;  
 $\nu_0$  - частота видимых световых волн (0,39÷0,75)  $10^{15}$  Гц;  
 $S_{\lambda}$  - спектральная чувствительность, мкА/Вт;  
 $S_{\Phi}$  - интегральная чувствительность, мкА/лм;  
 $\Phi$  - световой поток, лм (люмен);  
 $R_{\Phi}$  - сопротивление фотоэлектрического преобразователя, Ом;  
 $\pm R_{\Phi}$  - изменение сопротивления фотоэлектрического преобразователя при изменении его освещенности, Ом;  
 $\tau$  - постоянная времени фотоэлектрического преобразователя, с.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические измерения неэлектрических величин. Под ред. П.В.Новицкого. - 5-е изд. - Л.: Энергия, 1975. - 576 с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 296с.

#### ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить основные световые величины и характеристики;
2. Ознакомиться с основными видами фотоэлектрических преобразователей;
3. Ознакомиться с целью и программой работы;
4. Подготовить устные ответы на поставленные контрольные вопросы.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Ознакомиться с принципом действия и разновидностями оптических фотоэлектрических преобразователей.

1.2. Получить практические навыки определения основных параметров и характеристик фотоэлектрических преобразователей.

1.3. Изучить и проанализировать их основные свойства.

## 2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.1. Изучить основные свойства и характеристики фотоэлементов, фоторезисторов, фотодиодов.

2.2. Исследование свойств фоторезистора СФ2-5:

2.2.1. Определение световых характеристик  $I_{\phi} = f(E)$ ;

2.2.2. Определение спектральных характеристик  $I_{\phi} = f(\lambda)$ ;

2.2.3. Определение вольт-амперных характеристик  $I_{\phi} = f(U)$ ;

2.2.4. Исследование дифференциального фоторезистора.

2.3. Исследование свойств фотодиода ФД-9К:

2.3.1. Определение свойств и характеристик фотодиода ФД-К) в вентильном режиме;

2.3.2. Определение свойств и характеристик фотодиода ФД-9К в диодном режиме.

2.4. Исследование свойств вакуумного фотоэлемента Ф1:

2.4.1. Определение световых его характеристик  $I_{\phi} = f(E)$ ;

2.4.2. Определение вольт-амперных его характеристик  $I_{\phi} = f(U)$ .

2.5. Обработка экспериментальных данных и построение характеристик исследуемых фотоэлектрических преобразователей, формулировка выводов и представление полученных результатов в письменном отчете.

## 3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Фотоэлектрические преобразователи преобразуют оптическое излучение в электрические сигналы, их принцип действия основан на фотоэлектрическом эффекте.

Фотоэффект в различных преобразователях может проявляться по-разному. В зависимости от этого различают: фотоэлектрические преобразователи с внешним фотоэффектом, с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы) фотодиоды, фототранзисторы и т.д.

Фотопреобразователи принято оценивать следующими техническими характеристиками:

- световой характеристикой  $I_{\phi} = f(E);$
- вольт-амперной характеристикой  $I_{\phi} = f(U);$
- частотной характеристикой  $I_{\phi} = f(\omega);$
- спектральной характеристикой  $I_{\phi} = f(\lambda);$
- чувствительностью.

Различают *спектральную чувствительность* и *интегральную чувствительность*. Спектральная чувствительность – это реакция фотопреобразователя на определенную длину волны оптического излучения и выражается как  $S_{\lambda} = \frac{\Delta I}{\Delta P_{\lambda}}$  [

мкА/Вт] – отношение приращения фототока к изменению плотности монохроматического потока с длиной волны  $\lambda$ . *Интегральная чувствительность* – это реакция фотопреобразователя на суммарный поток оптического

излучения и записывается как  $S_{\phi} = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi}$  [мкА/лм] – отношение приращения фототока к изменению потока оптического излучения.

#### *Фотопреобразователи с внешним фотоэффектом.*

Они представляют собой вакуумную газонаполненную лампу с двумя электродами – анодом и катодом. Под действием оптического излучения фотокатод излучает электроны и, если к электродам приложено напряжение, то электроны устремляются к аноду. Возникающий фототок будет пропорционален интенсивности излучения. Чувствительность вакуумных фотоэлементов 20÷100 мкА/лм. Чувствительность газонаполненных фотоэлементов выше и лежит в пределах 100 ÷1000 мкА/лм, так как вследствие ионизации газа ток увеличивается, но при этом нарушается линейность световых характеристик. Схема включения фотоэлемента приведена на рис 1.

Вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента имеют явно выраженные участки насыщения [2], которые наступают уже при напряжениях 50–100 В и в дальнейшем увеличение уровня напряжения на значение фототока не влияет. В газовых фотоэлементах вольт-амперная характеристика не имеет участков насыщения, так как в них возникает саморазряд при определенных значениях

напряжения и фотозаэлемент становится нечувствительным к изменению светового потока.

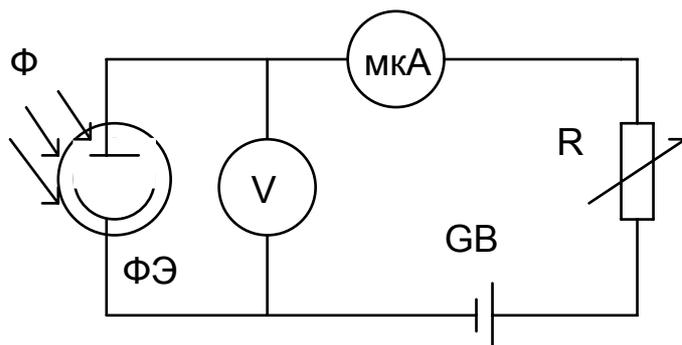


Рис. 1

Спектральные характеристики имеют явно выраженный максимум. Так, например, вакуумные фотозаэлементы имеют наибольшую чувствительность к ультрафиолетовому излучению, а газонаполненные - к инфракрасному. Следует напомнить, что длина волны видимой части спектра излучения лежит в пределах от 0.4 мкм до 0.76 мкм. Ниже 0.4 мкм - область ультрафиолетового излучения, выше 0.76 мкм - область инфракрасного излучения.

#### Фоторезисторы

Фоторезисторы конструктивно представляют собой нанесенный на диэлектрическое основание тонкий слой полупроводникового материала (сернистые и селенистые соединения кадмия, свинца, висмута, таллия, а также некоторые соединения теллура). Свойство фоторезисторов, их чувствительность, частотные характеристики и другие параметры определяются материалом примененного полупроводника.

В отличие от фотопреобразователей с внешним фотоэффектом, где электроны под действием оптического излучения покидают поверхностный слой, в фоторезисторах под действием излучения изменяется подвижность электронов в поверхностном слое. В результате чего изменяется его внутреннее сопротивление  $R_{\phi}$ . Схема включения фоторезистора приведена на рис.2.

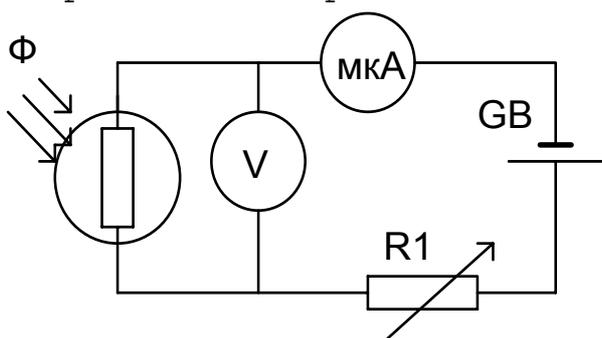


Рис. 2

Часто для измерения некоторых физических величин (перемещения, размеров и др.) используют дифференциальные фоторезисторы, как правило включаемые в мостовые измерительные схемы (рис.3)

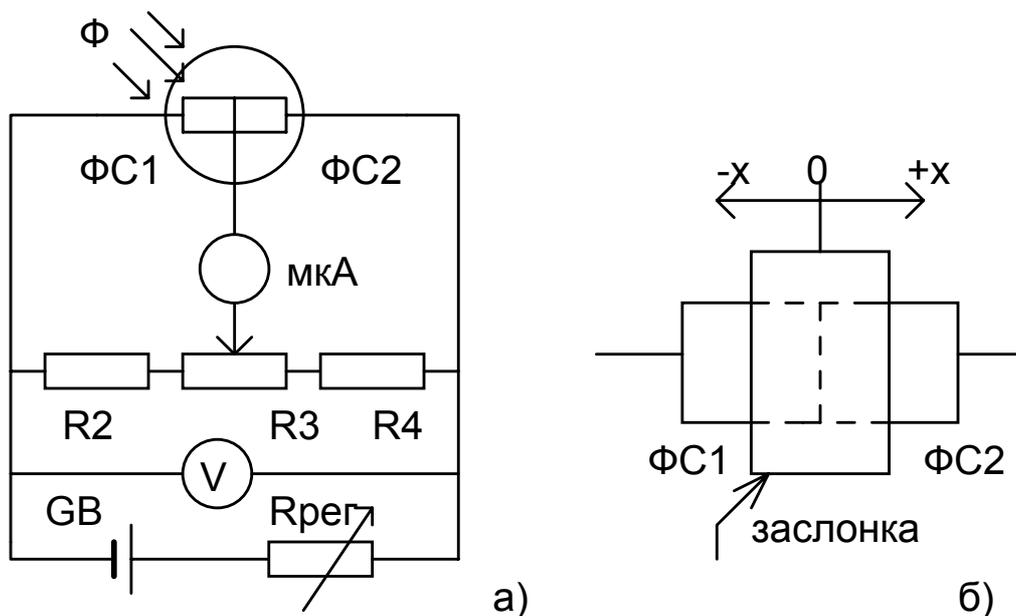


Рис. 3

Перемещение регулировочной заслонки (рис. 3б) изменяет степень перекрытия фоторезисторов, что при неизменной освещенности приводит к изменению световых потоков, падающих на фоторезисторы, на одну и ту же величину, но с разными знаками ( $\pm \Delta \Phi$ ). Это, в свою очередь, вызывает изменение сопротивлений дифференциального фоторезистора соответственно на  $\pm \Delta R_{\phi}$ . Дифференциальные фоторезисторы, включенные в схему измерительного моста, обладают большей чувствительностью, чем обычные фоторезисторы, имеют более линейную световую характеристику и меньшую погрешность от влияния большинства внешних факторов.

Чувствительность фоторезисторов зависит от частоты оптического излучения. Инерционность фоторезисторов характеризуется значением *постоянной времени*  $\tau$ . Например, у фоторезисторов типа ФСА  $\tau = 4 \times 10^{-5}$  с.

#### ФОТОДИОДЫ

Фотодиоды так же относятся к преобразователям с внутренним фотоэффектом. Их действие основано на наличии в структуре р-п переходов.

Когда фотодиод не освещен, а на р-п переход подано обратное напряжение, то через него будет протекать небольшой обратный ток, обусловленный неосновными носителями-электронами р-области и дырками п-области полупроводника. При освещении фотодиода на границе п-области возникают пары электрон-дырка. Дырки, являясь

неосновными носителями в этой области, диффундируют внутрь и, подойдя к р-п переходу, увлекаются в р-область. При этом необходимо, чтобы толщина п-области была меньше диффузионной длины и обеспечивалось попадание в р-область.

Фотодиоды могут работать в двух режимах - диодном (рис.4а) - с приложением внешнего обратного напряжения и вентильном (рис.4б) - без использования внешнего источника питания.

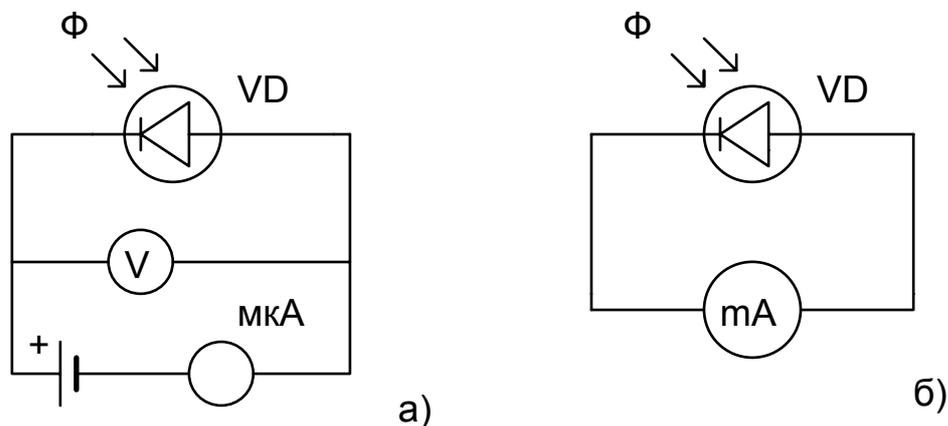


Рис.4

Световые характеристики фотодиодов определяются режимом работы (включения), напряжением внешнего источника питания для диодного включения, подключенной нагрузкой. При отсутствии оптического излучения ( $E=0$ ) на выходе фотодиода обычно имеется темновой ток.

Фотодиоды, являясь малоинерционными преобразователями, их постоянная времени  $\tau=10^{-5}$ с., а для отдельных преобразователей она составляет  $10^{-7}$ с. и менее.

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1.Что такое фотоэлектрический эффект и каковы его проявления?

4.2.Какие характеристики определяют свойства фотопреобразователя?

4.3.Что называется чувствительностью фотопреобразователя?

4.4.Что представляют собой фотоэлементы, фоторезисторы и фотодиоды?

4.5.В каких режимах может работать фотодиод, пояснить на схемах рис.4, а и 4, б?

4.6.Что представляет собой дифференциальный фоторезистор?

4.7.Какие источники излучения применяются в данной лабораторной работе?

4.8. От чего зависит интегральная чувствительность фоторезисторов?

## 5. ОБЪЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Лабораторный макет предназначен для исследования следующих типов фотоэлектрических преобразователей: вакуумного фотоэлемента типа Ф-1; фоторезистора СФ2-5; фотодиода ФД-9К. Перечисленные фотопреобразователи размещены в ячейках на лицевой панели лабораторного макета.

Включение макета в сеть производится тумблером S1, расположенным в нижнем левом углу макета. Слева на лицевой панели расположены аналоговые показывающие приборы, применяемые в схемах исследования фотопреобразователей. Микроамперметр типа М2027 имеет три предела измерения по току—50, 500, 1000 мкА, которые задаются переключателем пределов S2. Вольтметр имеет два предела измерения—10 и 100В с соответствующими индикаторными лампами Н1 и Н2.

В зависимости от типа исследуемого фотопреобразователя переключатель рода работ S4 устанавливается в определенное положение.

Для включения источников излучения (ламп накаливания), расположенных внутри макета, предназначен тумблер S6. Освещенность источников излучения изменяется с помощью переключателя S3 дискретно в пределах от 20 до 220 люкс.

Для изменения напряжения питания схем служат: переключатель S5 в схеме с вакуумным фотоэлементом; регулировочный резистор R1— в схеме с фоторезистором; регулировочный резистор R2— в схеме с фотодиодом.

Переключатель S7 обеспечивает переключение в схеме с фоторезистором различных источников излучения (светодиодов), задающих определенный спектр излучения с заданной длиной волны  $\lambda$ .

Регулировочная заслонка, как это показано на рис. 3б, служит для перекрытия окон дифференциального фоторезистора. Положение заслонки фиксируется по шкале линейки, отградуированной в мм. Дифференциальный фоторезистор включается в мостовую измерительную схему (рис. 3а), положение равновесия которой достигается симметричным перекрытием окон дифференциального фоторезистора и изменением сопротивления регулировочного резистора R3.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОГРАММЫ РАБОТЫ

Ознакомиться со свойствами и характеристиками фото-преобразователей и с расположением элементов на лицевой панели макета, только после этого приступать к выполнению программы работы.

Перед началом выполнения каждого пункта программы убедиться, что переключатели S4, S5, S6 и S7 выключены, а переключатель S2 установлен на пределе "1000 мкА".

### 6.1. Исследование свойств фоторезистора СФ2-5

Переключатели рода работ S4 и S8 установить в положение "СФ2-5" Исследование свойств фоторезистора производится по схеме, изображенной на рис.2.

6.1.1. Определение световых характеристик  $I_{\phi} = f(E)$  при  $U = \text{const}$ .

С помощью резистора R1 по вольтметру установить напряжение  $U_1 = 1\text{В}$  и, изменяя освещенность  $E$  переключателем S3 (при включенном тумблере S6), снять световую характеристику.

Аналогичную зависимость получить для напряжения  $U_2 = 2\text{В}$ .

Данные эксперимента заносятся в табл.1.

Таблица 1

U1, В	E, лк			...			
	I, мкА			...			
U2, В	E, лк			...			
	I, мкА			...			

Определить чувствительность фоторезистора из выражения

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} = \frac{\Delta I}{\Delta E \times S}, [\text{мкА/лм}]$$

где  $\Delta I$  - разность токов при работе фоторезистора в темновом режиме ( $I_T = 1.3 \text{ мкА}$ ) и режиме освещенности,

$\Delta E$  - изменение освещенности, лк,

$S$  - площадь светочувствительного слоя фоторезистора,  $\text{см}^2$ .

Для фоторезистора СФ2-5 значение  $S = 0.6 \text{ см}^2$ .

### 6.1.2.Определение спектральной характеристики

$$I_{\Phi} = f(\lambda) \text{ при } U = \text{const.}$$

Тумблером S6 отключить лампу накаливания и включить в качестве источников оптического излучения с различными длинами волн светоизлучающие диоды. Переключение светодиодов производится переключателем S7. Напряжение питания установить равным 2В. Данные экспериментов занести в табл.2.

Таблица 2

$\lambda$ , мкм			...			
$I$ , мкА			...			

### 6.1.3.Определение вольт-амперных характеристик фоторезистора $I_{\Phi} = f(U)$ при $E = \text{const.}$

Тумблером S6 включить в качестве источника оптического излучения лампу накаливания. Характеристики определять при трех значениях освещенности  $E$  ( $E_1=20$  лк,  $E_2=100$  лк,  $E_3=180$  лк). Задавая резистором  $R_1$  различные значения напряжений, снять зависимость  $I_{\Phi} = f(U)$ . Данные экспериментов занести в табл.3.

Таблица 3

$E_1$ , лк	$U$ , В		...			
	$I$ , мкА		...			
$E_2$ , лк	$U$ , В		...			
	$I$ , мкА		...			
$E_3$ , лк	$U$ , В		...			
	$I$ , мкА		...			

### 6.1.4.Исследование дифференциального фоторезистора, схема включения которого показана на рис.3.

Перед началом исследования переключатель рода работ S4 установить в положение "СФ2-5-дифф". Задать напряжение питания мостовой измерительной схемы, равным 2В. Установить регулировочную заслонку так, чтобы она перекрывала в одинаковой степени оба окна дифференциального фоторезистора (по минимальному показанию выходного прибора). Добиться полного равновесия мостовой схемы (нулевое показание выходного прибора) - с помощью регулировочного резистора R3.

$$\text{Определить выходную зависимость } I = f(x),$$

где  $I$  -ток на выходе мостовой схемы -показание выходного прибора, мкА и  $x$  -перемещение заслонки, мм.

Данные экспериментов занести в табл. 4.

## 6.2. Исследование свойств фотодиода ФД-9К в диодном режиме

Переключатель рода работ S4 установить в положение "ФД-9К-диод", S8-в положение "ФД-9К", включив тем самым фотодтод в схему рис.4.

Таблица 4

X, мм						
I, мкА						

### 6.2.1. Определение световых характеристик

Тумблером S6 включить источник оптического излучения. Регулирующим резистором R2 установить напряжение, приложенное к диоду в обратной полярности, равным 2В.

Изменяя освещенность, используя для этой цели переключатель S3, снять зависимость  $I_{\Phi} = f(E)$ . Данные экспериментов занести в табл.5 (по аналогии с табл.1). По приведенным выше формулам определить чувствительность фотодиода.

6.2.2. Определение вольт-амперной характеристики фотодиода  $I_{\Phi} = f(U)$  при  $E = \text{const}$ . проводится аналогично п.6.1.3. Данные эксперимента занести в табл.6 (по аналогии с табл.3).

### 6.3. Исследование фотодиода ФД-9К в вентильном режиме

Переключатель рода работ S4 установить в положение "ФД-9К", тем самым включив фотодиод в схему, изображенную на рис.5.

Определить световую характеристику, для чего включить тумблер S6 и переключателем S3 задавать значения освещенности от источника оптического излучения в пределах от 20 до 200 люкс.

Данные экспериментов занести в табл.7 (по аналогии с табл.1).

### 6.4. Исследование вакуумного фотоэлемента Ф-1

Переключатель рода работ установить в положение "Ф-эл.". Схема подключения при этом соответствует рис.1.

6.4.1. Определение световых характеристик  $I_{\Phi} = f(E)$  при  $U = \text{const}$ .

Переключателем S5 задать напряжение питания схемы равным 25В и, изменяя освещенность  $E$ , снять его световую характеристику. Аналогичные зависимости получить для напряжений 50В и 80В. Данные экспериментов занести в табл.8 (по аналогии с табл.1).

По приведенной выше формуле рассчитать чувствительность данного преобразователя.

6.4.2. Определение вольт-амперных характеристик вакуумного фотоэлемента  $\Phi-1$   $I_{\Phi} = f(U)$  при  $E = \text{const}$ .

Данные характеристики получить при двух значениях освещенности:  $E_1=100$  лк и  $E_2=140$  лк. Данные экспериментов занести в табл.9 (по аналогии с табл.3

**После окончания исследований выключить все тумблеры и переключатели. Обязательно отключить макет от сети!**

6.5. По данным п.п.6.1.-6.4. построить графики, проанализировать полученные данные и сделать выводы.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Титульный лист с указанием названия университета, названия кафедры, номера и наименования работы, исполнителей и даты выполнения работы.

7.2. Цель работы.

7.3. Программа работы.

7.4. Схемы экспериментальных установок.

7.5. Таблицы, основные соотношения.

7.6. Примеры расчетов.

7.7. Графики зависимостей.

7.8. Выводы по отдельным пунктам работы и общие выводы.

7.9. Таблица приборов, использованных в работе, с указанием названия прибора, его предела измерения, основной приведенной погрешности.



ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ:

Методические указания по Подготовке и  
выполнению лабораторной работы №428 по курсу  
"Методы и средства измерений" для студентов  
специальности 19.09 - Информационно-  
измерительная техника и технологии

Составители: Б.Б.Винокуров

Рецензент: В.Ф.Вотьяков

Подписано к печати \_\_\_\_\_  
Формат 60x84/16. Бумага №2.  
Плоская печать.Усл.печ.л. \_\_.Уч.-изд.л. \_\_\_\_\_  
Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_\_ Бесплатно.  
Ротапринт ТПУ.634004, Томск, пр.Ленина, 30.